Proiectarea Echipamentelor de Fabricație

O abordare integrată: de la cerințe la Industry 4.0 → 5.0

ciclul V de proiectare • integrare mecatronică • studiu de caz SAP



Prof. dr. ing. habil.
Bogdan MOCAN
autor coordonator

coautori
Conf. dr. ing. habil. Mircea FULEA
Șl. ing. dr. Mircea MURAR
drd. ing. David CHERECHEȘ

U.T.PRESS
Cluj-Napoca, 2026
ISBN 978-606-737-859-7

Mircea FULEA **Mircea MURAR** **David CHERECHEȘ**

Coordonator: Bogdan MOCAN

Proiectarea Echipamentelor de Fabricație

O abordare integrată: de la cerințe la Industry 4.0 → 5.0

U.T. PRESS
Cluj-Napoca,2026
ISBN 978-606-737-859-7

Editura U.T.PRESS
Str. Observatorului nr. 34
400775 Cluj-Napoca
Tel.: 0264-401.999
e-mail: utpress@biblio.utcluj.ro
www.utcluj.ro/editura

Recenzia: Prof.dr.ing. Călin Neamţu
Prof.dr.ing. Mihai Dragomir

Pregătire format electronic on-line: Gabriela Groza

Copyright © 2026 Editura U.T.PRESS

Reproducerea integrală sau parţială a textului sau ilustraţiilor din această carte este posibilă numai cu acordul prealabil scris al editurii U.T.PRESS.

ISBN 978-606-737-859-7

Prefață

Proiectarea echipamentelor de fabricație este una dintre disciplinele cele mai eterogene din inginerie. Un echipament de fabricație modern (un CNC sau un centru de prelucrare, o stație de asamblare, o linie de îmbuteliere, o celulă robotizată) nu este un produs mecanic cu adăugiri electrice, și nici un sistem de control cu carcasă mecanică. Este un sistem cu adevărat integrat, în care mecanica, electrica, pneumatica, hidraulica, senzorica, programarea logică, siguranța funcțională, fiabilitatea și, în 2026, conectivitatea digitală și cybersecurity-ul interacționează strâns. Un inginer specialist într-unul dintre aceste domenii nu poate proiecta singur un echipament viabil. Acest curs se adresează viitorilor PROIECTANȚI de echipamente de fabricație: ingineri în formare la nivel de masterat, capabili să gestioneze această integrare ca pe o competență distinctă, sintetică, diferită de suma specializărilor componente.

Cartea s-a format în decursul a unsprezece ani de predare a disciplinei „Proiectarea Echipamentelor de Fabricație" la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, pentru studenții programului de masterat PACSF al Facultății de Inginerie Industrială, Robotică și Managementul Producției. Audiența ei naturală este aceeași: studenți cu o solidă bază mecanică din ciclul de licență, care fac tranziția spre o gândire de sistem mecatronic. Pentru această audiență, cursul oferă două lucruri pe care literatura existentă le tratează doar fragmentat: o expunere unitară a celor opt subsisteme funcționale (mecanic, electric, pneumatic-hidraulic, senzori, echipamente de comandă, programe de comandă, siguranță funcțională, documentație) la nivelul de detaliu necesar pentru proiectare reală (nu doar pentru înțelegere conceptuală) și o conectare explicită a acestor subsisteme cu metodologia modelului V de proiectare sistematică și cu reglementările europene actuale (Regulamentul 2023/1230 pentru mașini, Regulamentul (UE) 2024/1689 privind inteligența artificială și Regulamentul privind reziliența cibernetică (CRA), ESPR).

Cursul este structurat în trei părți. Partea I, Fundamente metodologice (Capitolele 1–2), fixează cadrul: ciclul V de proiectare adaptat echipamentelor de fabricație, ingineria cerințelor, cu caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare. Partea a II-a, Subsisteme funcționale (Capitolele 3–10), parcurge sistematic cele opt subsisteme: mecanic, electric, pneumatic-hidraulic, senzori și instrumentație, echipamente de comandă, programe de comandă bazate pe Grafcet, siguranță funcțională conform ISO 13849-1, documentație tehnică și marcaj CE. Partea a III-a, Integrare, fiabilitate și direcții emergente (Capitolele 11–14), tratează FMEA și proiectarea pentru fiabilitate, FAT/SAT și punerea în funcțiune virtuală, Digital Twin-ul și Industry 4.0, plus tendințele emergente (roboți colaborativi, sisteme de fabricație reconfigurabile, roboți mobili autonomi, reglementarea inteligenței artificiale, cybersecurity, sustenabilitate și comunicații industriale TSN/5G) care vor defini disciplina în perioada 2026-2030. Anexele A–E oferă instrumente de lucru derivate din metodele cursului: un șablon de caiet de sarcini, un protocol de acceptanță FAT/SAT, un formular DFMEA, registrul de riscuri cu lista funcțiilor de siguranță și o listă de verificare pentru documentația tehnică și marcajul CE.

Un element distinctiv al cărții este SAP (Stație automatizată de asamblare prin presare), studiu de caz conceptual didactic cu arhitectură proprie, inspirată de operații industriale reprezentative. Produsul de referință este ansamblul tub–carcasă. Aceeași configurație de bază este urmărită de la cerințe la validare; soluțiile alternative și valorile care nu au fost demonstrate sunt declarate explicit drept scenarii didactice. Capitolul 14 sintetizează trasabilitatea dintre discipline prin modelul V.

Stilul cursului este deliberat tehnic și concret. Conceptele sunt definite riguros, formulele sunt deduse complet, standardele sunt citate explicit (ISO, IEC, regulamente UE), iar exemplele industriale provin din sectoare reprezentative ale fabricației moderne: auto, FMCG, farmaceutic, electronice, echipamente speciale. Exemplele sunt anonimizate la nivelul fabricilor (descriptori sectoriali, nu nume comerciale), păstrând însă mărcile comerciale ale echipamentelor care reprezintă

taxonomia tehnică a domeniului: un robot colaborativ Universal Robots, un PLC Siemens S7-1500F, un robot mobil autonom MiR sunt referințe ale clasei de echipament, nu studii de caz.

Fiecare capitol este structurat uniform: preambul cu glosar de acronime și standarde aplicabile, dezvoltare tehnică în secțiuni numerotate cu exemple lucrate și casete „În practică", studiu de caz aplicat pe SAP, recapitulare a conceptelor cheie, întrebări de reflecție cu răspunsuri detaliate iar la finalul volumului o bibliografie unică, separată de lecturile complementare. Această uniformitate facilitează lectura non-liniară: capitolele pot fi parcurse în ordine sau abordate independent, după nevoia cititorului.

Mulțumesc colegilor din Departamentul Ingineria Proiectării și Robotică al UTCN pentru discuțiile fructuoase care au contribuit la conturarea conținutului disciplinei, generațiilor de masteranzi PACSF pentru observațiile concrete asupra materialului de curs, și partenerilor industriali pentru exemplele reale care au inspirat studiile de caz din carte. Eventualele erori și omisiuni îmi aparțin integral.

Prof. dr. ing. habil. Bogdan MOCAN

Cluj-Napoca, octombrie 2026

Cuprins

Prefață iii

Cuprins v

Lista de figuri ix

Lista de tabele xviii

Lista de acronime xxii

Convenții de notație xxv

Lista simbolurilor xxvii

PARTEA I · FUNDAMENTE METODOLOGICE 1

1 Proiectarea sistematică a echipamentelor de fabricație 1

1.1 Echipamentele de fabricație în peisajul industrial 4
1.2 Taxonomia echipamentelor și arhitectura mecatronică 7
1.3 Ciclul de viață al proiectării echipamentelor 11
1.4 Modelul V conform VDI/VDE 2206 14
1.5 Abordări complementare de proiectare 18
1.6 Studiu de caz integrat: SAP, stație automatizată de asamblare prin presare 21
1.7 Probleme propuse cu răspunsuri 25
1.8 Concepte cheie și întrebări de reflecție 28

2 Ingineria cerințelor 30

2.1 De ce contează cerințele? 32
2.2 Părți interesate și elicitarea cerințelor 36
2.3 Tipologia cerințelor și formularea SMART 40
2.4 Caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare 43
2.5 Descompunerea funcțională 46
2.6 Desfășurarea funcției calității (QFD): Casa Calității 48
2.7 De la cerințe la arhitectura de sistem 50
2.8 Sinteză și concluzii 54
2.9 Probleme propuse cu răspunsuri 55

PARTEA II · SUBSISTEME FUNCȚIONALE 58

3 Subsistemul mecanic 58

3.1 Structuri portante 61
3.2 Ghidaje liniare și rotative 67
3.3 Mecanisme de transfer și alimentare 72
3.4 Mecanisme de presare și asamblare 75
3.5 Criterii transversale de proiectare 79
3.6 Aplicație integrată: subsistemul mecanic al echipamentului SAP 85
3.7 Probleme propuse cu răspunsuri 89

4 Subsistemul electric 91

4.1 Rolul subsistemului electric în proiectarea echipamentului 94

4.2 De la cerința mecanică la bilanțul electric al echipamentului 96
4.3 Alegerea și dimensionarea acționării electrice 101
4.4 Interfața mecanică motor–sarcină 109
4.5 Variatorul de frecvență și servoamplificatorul: nivelul necesar proiectantului mecanic 110
4.6 Protecții și siguranță electrică 116
4.7 Integrarea fizică a subsistemului electric în mașină 123
4.8 Documentația electrică pe care proiectantul mecanic trebuie să o poată citi 125
4.9 Aplicație integrată: subsistemul electric al stației SAP 126
4.10 Probleme propuse cu răspunsuri 127
4.11 Concepte cheie și întrebări de reflecție 132

5 Subsistemul pneumatic și hidraulic 134
5.1 Pneumatica industrială ca subsistem al mașinii 136
5.2 Proiectarea acționării pneumatice: componente, dimensionare și integrare 142
5.3 Insule de valve și integrarea cu automatizarea 151
5.4 Acționări pentru forțe mari: amplificator de presiune, multiplicator de presiune și soluții pneumohidraulice 156
5.5 Hidraulica de putere: densitate mare de forță și controlul sarcinii 159
5.6 Alegerea tehnologiei de acționare: pneumatic, hidraulic sau electric 165
5.7 Metodologia integrată de proiectare și documentarea ISO 1219 169
5.8 Concepte cheie și întrebări de reflecție 172
5.9 Probleme propuse cu răspunsuri 173

6 Senzori și instrumentație 175
6.1 De la cerința mecanică la sistemul de măsurare 177
6.2 Detectarea prezenței și poziției discrete 181
6.3 Măsurarea deplasării și poziției continue 189
6.4 Măsurarea forței, cuplului și presiunii 197
6.5 Măsurarea parametrilor de proces 203
6.6 Viziune industrială ca subsistem de măsurare 206
6.7 Integrarea senzorială și IO-Link 210
6.8 Concepte cheie și întrebări de reflecție 214
6.9 Probleme propuse cu răspunsuri 215

7 Subsistemul de control 216
7.1 Rolul subsistemului de control 220
7.2 Controlerul programabil (PLC): arhitectură, task-uri și buget temporal 223
7.3 Rețele industriale: fieldbus și Industrial Ethernet 227
7.4 OPC UA și integrare verticală 230
7.5 Interfața operator-mașină (HMI) 232
7.6 Asocierea I/O și definirea hardware-ului 236
7.7 Studiu de caz integrat: arhitectura de control pentru o stație de presare SAP 240
7.8 Concepte cheie și aplicații pe proiectul SAP 242
7.9 Probleme propuse cu răspunsuri 244

8 Controlul secvențial 246
8.1 Rolul controlului secvențial: perspectiva proiectantului mecanic 249
8.2 Granița mecanic–automatist: cine specifică ce 250
8.3 GRAFCET: limbajul comun mecanic-automatist 252
8.4 Diagrame de mișcare și bugetul timpului de ciclu 258
8.5 Studii de caz reprezentative din patru industrii 261
8.6 Moduri și stări de funcționare: implicații mecanice 264
8.7 PackML: model de stare și interfață comună pentru integrare 266
8.8 OEE și influența proiectării mecanice 268
8.9 IEC 61131-3: privire de ansamblu asupra limbajelor și structurării secvențiale 273

8.10 Studiu de caz integrat: variantă didactică ALT a stației SAP 273
8.11 Probleme propuse cu răspunsuri 276
8.12 Concepte cheie și întrebări de reflecție 278

9 Siguranța funcțională 280
9.1 Cadrul legal european al siguranței mașinilor 283
9.2 Evaluarea riscului: ISO 12100 286
9.3 Performance Level (PL) conform ISO 13849-1 289
9.4 Safety Integrity Level (SIL): IEC 62061 290
9.5 Categoriile de oprire IEC 60204-1 și starea sigură a actuatorilor 291
9.6 Poziționarea protecțiilor: ISO 13855:2024 296
9.7 Garduri și distanțe de protecție: ISO 14120 + ISO 13857 298
9.8 Prevenirea pornirii neașteptate: ISO 14118 și LOTO 301
9.9 Aplicații robotice colaborative: ISO 10218:2025 și ISO/TS 15066 304
9.10 Hardware safety: controlere, senzori și actuatoare 306
9.11 Verificarea și validarea funcțiilor de siguranță 308
9.12 Tendințe: AI, cybersecurity și safety 309
9.13 Studiu de caz integrat: funcțiile de siguranță ale stației SAP 310
9.14 Probleme propuse cu răspunsuri 312
9.15 Concepte cheie și întrebări de reflecție 315

10 Documentația tehnică și marcajul CE 318
10.1 Documentația tehnică: rol și responsabilități 321
10.2 Structurarea practică a documentației tehnice: corespondența cu Anexa IV 323
10.3 Declarația UE de conformitate 326
10.4 Standardele armonizate: ierarhia A / B / C 328
10.5 Instrumente de proiectare și automatizarea documentației 331
10.6 Documentația digitală: Regulamentul (UE) 2023/1230 334
10.7 Proces integrat pentru pregătirea marcajului CE 335
10.8 Studiu de caz didactic: documentația tehnică pentru stația SAP 337
10.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție 339
10.10 Probleme propuse cu răspunsuri 341

PARTEA III · INTEGRARE, FIABILITATE ȘI DIRECȚII EMERGENTE 344

11 Fiabilitate, FMEA și Design for Reliability 344
11.1 Poziționarea pe modelul V și rolul fiabilității în proiectare 348
11.2 Indicatori de fiabilitate 349
11.3 FMEA AIAG-VDA 2019: analiza modurilor de defectare 353
11.4 FMEA aplicat pe echipamente: exemple complete 356
11.5 Design for Reliability (DfR): proiectarea pentru fiabilitate 361
11.6 Design for Maintainability (DfM): proiectarea pentru mentenabilitate 363
11.7 Mentenanța predictivă și Industry 4.0 365
11.8 Studiu de caz integrat: analiza fiabilitate pentru stația SAP 369
11.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție 372
11.10 Probleme propuse cu răspunsuri 374

12 Integrare, commissioning și validare 375
12.1 Poziționarea pe modelul V și fazele de acceptanță 379
12.2 FAT: Factory Acceptance Test 382
12.3 SAT: Site Acceptance Test 386
12.4 Virtual Commissioning: testare pe model virtual 390
12.5 ECR / ECO: gestionarea modificărilor post-livrare 393
12.6 Modificarea substanțială: Reg. UE 2023/1230 395

12.7 Studii de caz FAT/SAT din industrie 398
12.8 Studiu de caz integrat: FAT/SAT pentru stația SAP 400
12.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție 401
12.10 Probleme propuse cu răspunsuri 403

13 Digital Twin și Industry 4.0 405
13.1 Poziționarea pe Modelul V: saltul conceptual Industry 4.0 409
13.2 Digital Shadow, Digital Twin și Digital Thread 411
13.3 Asset Administration Shell: identitatea digitală standardizată 414
13.4 OPC UA și integrarea verticală 419
13.5 MBSE și SysML: proiectarea bazată pe modele 422
13.6 Tipare de arhitectură pentru platforme Digital Twin / IIoT 425
13.7 Exemple industriale Industry 4.0 426
13.8 Studiu de caz integrat: scenariu conceptual Digital Thread pentru SAP 429
13.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție 430
13.10 Probleme propuse cu răspunsuri 432

14 Tendințe emergente în proiectarea echipamentelor de fabricație 434
14.1 Introducere: direcții emergente și continuitate metodologică 437
14.2 Robotica colaborativă: cobot și ISO 10218 / ISO/TS 15066 438
14.3 Paradigme de fabricație: DMS, FMS, RMS 442
14.4 Logistică autonomă: AMR și ISO 3691-4 444
14.5 Inteligența artificială și safety: AI Act (UE) 2024/1689 446
14.6 Cybersecurity industrială: IEC 62443, CRA și NIS2 448
14.7 Sustenabilitate și Digital Product Passport: ESPR 451
14.8 TSN și 5G industrial: convergență IT/OT 453
14.9 Sinteză V-Model integrată pe SAP 455
14.10 Concepte cheie și întrebări de reflecție 459
14.11 Probleme propuse cu răspunsuri 461

Anexa A. Șablon de caiet de sarcini 463

Anexa B. Protocol de acceptanță FAT/SAT 465

Anexa C. Formular DFMEA (metoda AIAG-VDA) 467

Anexa D. Registrul de riscuri și lista funcțiilor de siguranță 468

Anexa E. Lista de verificare pentru documentația tehnică și marcajul CE 470

Glosar consolidat 472

Referințe bibliografice 484

Bibliografie complementară 496

Index tematic 501

Lista de figuri

Figura 1.1. Cele cinci familii principale de echipamente de fabricație industrială. Categoria 3 (asamblare) este pivotul ilustrativ al manualului prin echipamentul de referință SAP. 7

Figura 1.2. Cele patru macro-domenii funcționale ale unui echipament de fabricație și interdependența lor. În manual, acestea sunt detaliate în opt subsisteme tehnice și transversale. 10

Figura 1.3. Cele opt etape ale ciclului de viață al unui echipament de fabricație, grupate în patru zone funcționale: proiectare (1–3), realizare (4), punere în funcțiune (5–6) și exploatare (7–8). Săgeata punctată de la etapa 8 către etapa 1 reprezintă reluarea ciclului prin modernizare sau retrofit. 11

Figura 1.4. Euristica 1:10:100, exemplu ilustrativ al creșterii costului relativ de remediere pe măsură ce eroarea este descoperită mai târziu. Valorile nu sunt normative. 13

Figura 1.5. Adaptare didactică a modelului V pe opt niveluri pentru proiectarea echipamentelor de fabricație. Liniile întrerupte indică relațiile de trasabilitate dintre specificații și activitățile de verificare/validare la niveluri de abstractizare corespunzătoare. FAT și SAT sunt exemple de etape de acceptanță, nu definiții ale verificării ori validării. 14

Figura 1.6. Corespondența dintre nivelurile ramurii descendente și activitățile de verificare/validare. Pentru fiecare cerință sau decizie trebuie definită o dovadă la nivelul de abstractizare corespunzător. 15

Figura 1.7. Micro-ciclul de rezolvare a problemelor: analiză, sinteză, evaluare și decizie. Iterația se reia atunci când alternativele nu satisfac criteriile sau când analiza inițială se dovedește incompletă. 16

Figura 1.8. Componentele mecatronice ale stației SAP: axă electrică Z pentru presare, fixare pneumatică CL1/CL2 și integrarea controlului, instrumentației și protecțiilor. Reprezentare conceptuală; alimentarea/evacuarea automate sunt ilustrative, iar geometria și performanțele rămân de definit. 22

Figura 1.9. Secvență GRAFCET conceptuală a ciclului SAP, S0–S8: presare pe axa electrică Z, fixare pneumatică CL1/CL2 și evaluare F–z. Tranzițiile, reacțiile la defect și funcțiile de siguranță se detaliază și se verifică separat. 24

Figura 2.1. Poziționarea Capitolului 2 în modelul V. Cerințele definite pe ramura descendentă devin referințe pentru verificare și validare pe ramura ascendentă. 33

Figura 2.2. Creșterea orientativă a costului corecției unei cerințe descoperite în etape succesive. Valorile 1–5–10–50–100 au rol euristic și trebuie înlocuite, în proiectele reale, cu date istorice proprii organizației. 34

Figura 2.3. Propagarea unei cerințe subdimensionate în subsistemele echipamentului. Evaluarea riscurilor și nivelul de performanță cerut se reanalizează numai pentru funcțiile de siguranță afectate de modificare. 35

Figura 2.4. Tipuri frecvente de defecte ale cerințelor și mecanismele lor de prevenire. Diagrama este o sinteză metodologică, nu o distribuție statistică universală. 36

Figura 2.5. Hartă generică a părților interesate pentru un echipament de fabricație. Rolurile și influența lor trebuie particularizate printr-un registru al părților interesate pentru fiecare proiect. 37

Figura 2.6. Șase tehnici complementare de elicitare. Combinația se alege în funcție de roluri, riscuri, noutatea procesului și disponibilitatea unui echipament de referință. 39

Figura 2.7. Taxonomie didactică în șase categorii pentru verificarea completitudinii cerințelor unui echipament de fabricație. O cerință trebuie formulată atomic, iar relațiile dintre categorii se gestionează prin identificatori și trasabilitate. 40

Figura 2.8. Mnemonica SMART adaptată în acest volum pentru revizuirea rapidă a cerințelor. Acceptarea SMART nu substituie verificarea proprietăților complete prevăzute de ISO/IEC/IEEE 29148. 41

Figura 2.9. Relația dintre caietul de sarcini al beneficiarului și specificația tehnică de realizare a furnizorului. Documentele formează o pereche trasabilă: cerință, răspuns tehnic, metodă de verificare și criteriu de acceptanță. 43

Figura 2.10. Arbore funcțional pentru stația SAP. Nivelul 0 exprimă funcția globală, nivelul 1 grupează subfuncțiile principale, iar nivelul 2 detaliază o subfuncție până la noduri atribuibile unor domenii tehnice. 47

Figura 2.11. Arbore funcție–mijloace pentru presarea tubului în carcasă. Axa electrică Z este configurația de referință (B); presarea pneumatică și hidraulică sunt alternative (ALT), iar intervalul 5–8 kN reprezintă o ipoteză didactică (H). Selecția componentelor necesită calcule și verificări. 47

Figura 2.12. Structura conceptuală a Casei Calității. Matricea corelează cerințele clientului cu caracteristicile tehnice, iar acoperișul evidențiază relațiile favorabile sau conflictuale dintre caracteristici. 49

Figura 2.13. Alocarea conceptuală a funcțiilor stației SAP pe domenii tehnice. Marcajele diferențiază contribuția directă de interfețele multidomeniu; presarea se realizează pe axa electrică Z, iar CL1/CL2 asigură fixarea pneumatică..... 51

Figura 2.14. Arhitectura funcțională conceptuală a stației SAP: control de proces, acționare electrică Z, fixare pneumatică CL1/CL2 și lanț de siguranță distinct. Interfețele de comunicație și funcțiile de siguranță se definitivează prin proiectare și evaluarea riscului. 52

Figura 2.15. Lanț de trasabilitate bidirecțională. Trasabilitatea directă urmărește nevoia până la dovadă; trasabilitatea inversă permite evaluarea impactului unei modificări de componentă asupra cerințelor și nevoilor inițiale. 52

Figura 3.1. Poziționarea Capitolului 3 în modelul V. Domeniul mecanic este dezvoltat în faza de proiectare pe domenii și de proiectare de detaliu, cu verificarea iterativă a interfețelor față de domeniile electric, pneumatic și de control [1]..... 59

Figura 3.2. Cele patru funcții simultane ale structurii portante. Rigiditatea dinamică se verifică față de excitațiile dominante ale echipamentului, iar rigiditatea specifică E/ρ este doar un indicator de material; geometria secțiunii și îmbinările controlează comportamentul ansamblului. 62

Figura 3.3. Anatomia unui cadru sudat din oțel structural. Sunt evidențiate suprafețele prelucrate după sudare, rigidizările locale și secțiunile închise utilizate pentru controlul rigidității și al geometriei ansamblului..... 63

Figura 3.4. Profile extrudate de aluminiu cu canale T: secțiunea transversală tipică (a) și principiul de fixare cu piuliță T (b). Geometria canalului, dimensiunea profilului și compatibilitatea accesoriilor sunt specifice familiei de produs și se verifică în catalogul producătorului. 64

Figura 3.5. Comparație multicriterială pe șapte axe între cele trei tipologii structurale. Fiecare tipologie are profilul ei caracteristic: oțelul sudat este echilibrat, aluminiul modular câștigă la flexibilitate și greutate, iar turnatul domină la rigiditate și precizie cu costul flexibilității. 66

Figura 3.6. Ghidaj liniar cu bile recirculante: anatomie. Elementele de rostogolire circulă în bucle închise între zona încărcată și canalele de recirculare. Materialul, tratamentul termic și duritatea căilor de rulare sunt specifice seriei și se verifică în documentația producătorului [48], [49]. 67

Figura 3.7. Relația dintre raportul C/P și durata nominală L_{10} pentru exemplul unei serii cu capacitatea dinamică C definită la baza de 50 km. Durata în ani se obține numai după calculul cursei cumulate reale; baza de 50 km/100 km se verifică în catalog. 68

Figura 3.8. Masa rotativă indexată cu came. (a) Geometrie cu 8 stații și unghi de indexare 45°. (b) Profilul cam: poziționare succesiunii dwell (oprire), rise (mișcare către poziția următoare), dwell, return. Toate stațiile lucrează simultan în fereastra de oprire..... 70

Figura 3.9. Alimentator vibrator cu bol: secțiune principială. Piesele aruncate în vrac în centrul bolului urcă pe spirala interioară datorită vibrațiilor axiale ale bazei electromagnetice. Lamele de selecție și jeturi de aer dispuse pe traseu elimină piesele incorect orientate; doar piesele corect orientate ajung în șina de alimentare către stația de lucru..... 72

Figura 3.10. Comparație relativă a celor patru familii de soluții de alimentare/transfer pe criterii de proiectare. Scorurile sunt didactice și servesc la structurarea discuției; selecția finală se bazează pe cerințele și datele de catalog ale aplicației. 74

Figura 3.11. ALT–PNEU: exemplu de dimensionare preliminară (Ø125 mm, 9 bar, forță estimată 9,4 kN). Nu reprezintă presarea electrică SAP v1. 76

Figura 3.12. Semnături F–z sintetice și fereastră de acceptare conceptuală; exemple NOK ilustrative, fără măsurări sau praguri validate pentru SAP. 77

Figura 3.13. Mecanism cu excentric (manivelă-bielă-piston): (a) schema cinematică, cu poziția unghiulară θ a manivelei OA, biela AB și culisorul B care apasă piesa; (b) profilul forței F(θ) pe ciclu, cu maximul concentrat în vecinătatea BDC (θ = 180°). În afara zonei utile, presa nu poate genera forțe substanțiale..... 78

Figura 3.14. Comparație radar didactică a celor patru tehnologii de presare pe cinci criterii. Pozițiile relative ilustrează tendințe tipice privind costul, controlul, trasabilitatea, forța și cadența; ele nu reprezintă un clasament universal și trebuie recalibrate pentru aplicația concretă..... 78

Figura 3.15. Arbore orientativ pentru preselectarea tehnologiei de presare. Pragurile rigide au fost înlocuite cu întrebări funcționale; selecția finală necesită calcule și date de catalog pentru aplicația concretă. 79

Figura 3.16. Cele patru combinații precizie/repetabilitate, ilustrate prin ținta de tir. Centrul țintei reprezintă poziția comandată, iar punctele reprezintă măsurări succesive. O repetabilitate ridicată asociată

unei precizii scăzute indică o abatere sistematică ce poate fi corectată prin calibrare; o repetabilitate scăzută indică dispersie și este, în general, mai dificil de remediat. 80

Figura 3.17. Flux de analiză FEM pentru verificarea proiectului mecanic. Interpretarea rezultatelor este validă numai dacă ipotezele, condițiile de frontieră, plasa și criteriile de acceptare sunt documentate și verificate. 82

Figura 3.18. Principiul 3-2-1 pentru situarea univocă a piesei: trei contacte definesc planul primar, două contacte definesc orientarea secundară, iar un contact definește orientarea terțiară. Fixarea aplică forțe pentru menținerea contactelor și nu trebuie confundată cu situarea. 87

Figura 4.1. Modelul V utilizat ca reper în carte. Capitolul 4 dezvoltă contribuția domeniului electric în proiectarea pe domenii și în proiectarea de detaliu; interfețele cu mecanica și controlul se verifică iterativ pe parcursul dezvoltării. 92

Figura 4.2. Configurațiile de împământare TN-S, TN-C-S și TT, conform IEC 60364. Conductorul PE este desenat cu albastru. Diferența esențială este modul în care se închide bucla curentului de defect spre pământ. 97

Figura 4.3. Fluxul descendent de energie în arhitectura electrică tipică a unui echipament de fabricație. Săgețile indică sensul transferului de energie, nu al circulației curentului electric. Distribuția se face printr-un bară de distribuție central spre trei ramuri funcționale: forță (motoare, încălzire), auxiliar (iluminat, prize service) și comandă (PLC, senzori). 99

Figura 4.4. Cele patru familii principale de acționări electrice industriale, plasate pe matricea viteză × precizie a poziționării. Selecția corectă pentru o aplicație dată depinde de poziționarea cerințelor în acest spațiu. 102

Figura 4.5. Motorul asincron trifazat: structura constructivă (stator cu înfășurări, rotor în colivie) și caracteristica mecanică T(n). Câmpul magnetic rotativ generat de stator induce curenți în barele rotorului; interacțiunea acestor curenți cu câmpul produce cuplul motor. 103

Figura 4.6. Comparație conceptuală între motorul asincron cu VFD și servomotorul PMSM, pe planul cuplu disponibil–turație. Servoacționările pot furniza un cuplu de vârf superior cuplului continuu pentru intervale limitate; raportul și durata admisă se verifică în curba cuplu–viteză și în datele termice ale sistemului selectat. 104

Figura 4.7. Construcția unui actuator liniar electric cu șurub cu bile (Ball Screw Actuator). Mișcarea de rotație a servomotorului este transformată în mișcare liniară a piuliței prin angrenare cu bile pe șurubul filetat. Ghidajele liniare paralele preiau forțele radiale. 105

Figura 4.8. Profilurile de mișcare standard utilizate în acționările industriale: trapezoidal (stânga) și S-curve (dreapta). Profilul S-curve elimină discontinuitățile (șocurile) accelerației prezente la trecerea între segmentele profilului trapezoidal. 107

Figura 4.9. Schema bloc internă a unui variator de frecvență (VFD). Cele patru blocuri funcționale: redresor (AC→DC), magistrală DC cu condensator de filtrare, invertor cu tranzistori IGBT (DC→AC variabil) și unitatea de control care generează semnalul PWM după algoritmul V/f, FOC sau DTC. 111

Figura 4.10. Trei familii de strategii de control pentru motoare asincrone în convertoare de acționare industriale: V/f scalar, FOC vectorial și DTC. Figura are rol comparativ; implementarea și performanța depind de platforma concretă. 112

Figura 4.11. Topologie PROFINET tipică pentru un echipament de fabricație cu mai multe acționări. Comanda este centralizată în PLC, iar controlul local al motorului este realizat în convertor. Timpul de ciclu și volumul de date se configurează și se verifică pentru rețeaua și aplicația concretă. 115

Figura 4.12. Funcții complementare de protecție ale unui echipament de fabricație. Dispozitivele răspund la fenomene diferite; selectivitatea se aplică în principal protecțiilor la supracurent aflate în serie. 117

Figura 4.13. Schemă unifilară simplificată cu protecții distribuite pe ramurile de forță, comandă și servicii auxiliare. Configurația exactă se stabilește din schema de protecție și datele instalației. 118

Figura 4.14. Anatomia internă a unui MCB modular DIN. Zona termică (bimetal) protejează împotriva suprasarcinilor lente, prin deformare termică progresivă; zona magnetică (bobină) protejează împotriva scurtcircuitelor, prin acțiune electromagnetică instantanee. Cele două mecanisme acționează asupra aceluiași contact mecanic. 119

Figura 4.15. Reprezentare didactică a caracteristicilor timp-curent pentru MCB-uri de tip B, C și D. Zona termică este similară, iar pragul magnetic instantaneu diferă. Pentru aparataj industrial conform IEC 60947-2 se verifică reglajele și curbele modelului concret. 119

Figura 4.16. Principiul funcționării unui RCD diferențial. Conductoarele active L și N trec împreună printr-un tor magnetic. În regim normal, suma vectorială a curenților este nulă și fluxul magnetic în tor este zero. În prezența unui defect de izolație care generează un curent I_d spre pământ, fluxul devine nenul și induce o tensiune în bobina secundară, care comandă releul de declanșare. 120

Figura 4.17. Impulsuri standardizate de curent utilizate la încercarea SPD-urilor: 8/20 µs și 10/350 µs. Tipul și parametrii dispozitivului se aleg conform categoriei de solicitare și coordonării cu instalația. 122
Figura 4.18. Ilustrare schematică a coordonării timp–curent dintre o protecție de ramură și una din amonte. Confirmarea selectivității pentru aparatele concrete se face cu tabelele și curbele producătorului. 122
Figura 5.1. Lanțul de alimentare cu aer comprimat. Figura separă generarea și tratarea centrală de distribuția către mașină și de reglarea locală a presiunii; scăderea la regulator este intenționată, în timp ce pierderile pe traseu trebuie minimizate. 138
Figura 5.2. Schemă funcțională a unei unități de condiționare a aerului: filtrare, reglarea presiunii și lubrifiere opțională. 139
Figura 5.3. Reprezentare didactică a celor trei axe ale clasificării ISO 8573-1: particule, apă și ulei. Valorile exacte și metoda de măsurare se verifică în standard și în documentația sistemului de tratare. 141
Figura 5.4. Simboluri ISO 1219-1 pentru distribuitoarele uzuale: 3/2 monostabil, 5/2 bistabil, 5/3 cu centru închis. 143
Figura 5.5. Cilindru pneumatic cu dublă acțiune: secțiune longitudinală. Aerul intră alternativ prin orificiile A și B. 144
Figura 5.6. Tipuri uzuale de cilindri pneumatici: comparație schematică conform ISO 1219. 145
Figura 5.7. Forța teoretică de extindere a cilindrului în funcție de diametru și presiune. Curbele sunt utile pentru predimensionare; selecția finală se face la presiunea minimă disponibilă și cu marja de proiectare a aplicației. 147
Figura 5.8. Comparație între arhitectura centralizată și descentralizată pentru un echipament cu 4 cilindri. 152
Figura 5.9. Topologie cu magistrală PROFINET la nivel superior și IO-Link în câmp pentru senzorii și valvele individuale. 154
Figura 5.10. Diferențierea dintre amplificatorul de presiune aer–aer, multiplicatorul de presiune aer–ulei și acționarea pneumohidraulică. Fluidul de ieșire și volumul util de lucru sunt criterii esențiale de selecție. 157
Figura 5.11. Stația hidraulică (HPU): rezervor, pompă, supape, filtre și instrumentație. 161
Figura 5.12. Cilindru hidraulic în secțiune longitudinală: pereți groși, etanșări multiple, tijă groasă. 162
Figura 5.13. Simbolul ISO 1219 al unei servovalve 4/3 cu centru închis și feedback de poziție LVDT. 163
Figura 5.14. Acumulator hidraulic cu vezică de azot, trei stări de funcționare: preîncărcat, acumulare, descărcare. 164
Figura 5.15. Arbore de preselecție a tehnologiei de acționare. Nu există un prag universal de forță; alegerea se validează prin energie, TCO, siguranță, precizie, mediu, spațiu și mentenabilitate. 167
Figura 5.16. Domenii orientative ale acționărilor pneumatice, hidraulice și electrice în spațiul forță–viteză. Zonele sunt conceptuale și nu reprezintă limite de catalog sau praguri normative. 168
Figura 5.17. Schemă pneumatică de principiu pentru fixarea CL1/CL2, cu simboluri funcționale conform convențiilor ISO 1219; nu este documentație de execuție. 170
Figura 6.1. Fluxul de proiectare al funcției de măsurare și lanțul informațional de la mărimea fizică la decizia de control. 178
Figura 6.2. Taxonomia funcțională a senzorilor utilizați în echipamentele de fabricație. 179
Figura 6.3. Diferența conceptuală dintre exactitate și repetabilitate în măsurări repetate. 180
Figura 6.4. Senzor inductiv de proximitate: principiu de funcționare și exemplu orientativ de factori de corecție; valorile exacte se verifică în catalog. 182
Figura 6.5. Senzor capacitiv: principiu de funcționare și aplicații tipice pentru materiale nemetalice. 184
Figura 6.6. Configurații uzuale ale senzorilor fotoelectrici de proces: barieră, retroreflexie și difuz. 185
Figura 6.7. Senzor magnetic montat pe cilindru pneumatic pentru detectarea poziției pistonului. 187
Figura 6.8. Encoder incremental rotativ: disc de codare și semnale A, B și Z. 190
Figura 6.9. Encoder absolut rotativ: principiu de codare multi-pistă cu cod Gray. 191
Figura 6.10. LVDT: bobină primară, două bobine secundare și miez feromagnetic mobil. 192
Figura 6.11. Traductor magnetostrictiv: măsurarea poziției prin timpul de propagare al undei de torsiune. 194
Figura 6.12. Celulă de forță cu extensiometre: corp elastic, punte Wheatstone și caracteristică de transfer. 197
Figura 6.13. Principiul unui lanț de măsurare piezoelectric a forței: element sensibil, amplificator de sarcină și interfață de achiziție. 199
Figura 6.14. Curba forță–cursă utilizată la verificarea unei operații de presare: traseu nominal, ferestre de toleranță și abateri de proces. 200
Figura 6.15. Comparație funcțională între PT100, termocuplu și pirometru în infraroșu. 204

Figura 6.16. Debitmetru Coriolis: principiu de măsurare directă a debitului masic. 205
Figura 6.17. Arhitectura unui sistem de viziune industrială: iluminare, cameră și optică, procesare și comunicație 207
Figura 6.18. Tehnici uzuale de iluminare în viziunea industrială și alegerea lor în funcție de caracteristica urmărită. 208
Figura 6.19. Integrarea IO-Link în arhitectura mașinii: dispozitiv, master, rețea, control și supraveghere. 211
Figura 6.20. Arhitectura senzorială conceptuală a stației SAP: funcții de măsurare și traseul datelor de proces pentru ansamblarea tub–carcasă; funcțiile de siguranță sunt proiectate și validate separat. 213
Figura 7.1. Poziționarea subsistemului de control în modelul V al dezvoltării sistemului mecatronic. 221
Figura 7.2. De la ciclul mecanic la mașină de stări; tranzițiile sunt condiționate de confirmări, interblocări și timeout-uri 221
Figura 7.3. ISA-95 și integrarea semantică prin OPC UA; interoperabilitatea nu înlocuiește segmentarea OT/IT și controlul accesului 222
Figura 7.4. Execuția controlului PLC: task de proces, I/O și task-uri specializate; ordinea și mecanismele concrete depind de platformă. 223
Figura 7.5. Arhitecturi PLC compactă, modulară și cu I/O distribuit; selecția se face din cerințele echipamentului. 224
Figura 7.6. Evoluția tehnologiilor de comunicație industrială; generațiile coexistă în funcție de aplicație și ciclul de modernizare. 228
Figura 7.7. Servicii și clase de comunicație PROFINET pentru configurare/diagnostic, Real-Time și aplicații izocrone; performanța se validează pe configurația reală. 228
Figura 7.8. Principiul EtherCAT cu procesare on-the-fly a datelor în telegramă. 229
Figura 7.9. OPC UA: model informațional, servicii și mecanisme de securitate pentru integrarea controlată a datelor 231
Figura 7.10. Arhitectură HMI orientată pe sarcină și diagnostic; ISO 9241-115:2024 oferă ghidaj pentru navigare, fără a impune o adâncime numerică universală. 234
Figura 7.11. Ciclul de management al alarmelor, adaptat după principiile EEMUA Publication 191 și IEC 62682. 235
Figura 7.12. Asocierea I/O de la funcția mecanică și tag-ul dispozitivului la configurația PLC, variabila simbolică și logica aplicației 236
Figura 7.13. Metodologia de proiectare a subsistemului de control în șapte pași, de la proces și siguranță funcțională la validare și punere în funcțiune. 237
Figura 8.1. Poziționarea Capitolului 8 pe ciclul V de proiectare. Controlul secvențial este faza în care decizia de hardware (Capitolul 7) și comportamentul mecanic (Capitolele 3–6) se transformă într-un caiet de sarcini comportamental și, ulterior, în cod executabil pe PLC. 249
Figura 8.2. Granița mecanic-automatist: ce livrează proiectantul mecanic vs. ce livrează automatistul. Șapte responsabilități per parte, formalizabile ca documente contractuale. 250
Figura 8.3. Flux de lucru în cinci pași, de la specificația mecanică la implementarea PLC. Alocarea responsabilităților este o convenție didactică și se adaptează structurii contractuale a proiectului. 251
Figura 8.4. Elemente de bază GRAFCET și legătura cu implementarea SFC. Stânga: exemplu de etape, tranziții și receptivități. Dreapta: exemple de calificatori de acțiune SFC (N, S, R, L, D, P) utilizați ca punte spre implementare; setul și semantica exactă se verifică în standardul și platforma utilizate. 253
Figura 8.5. Cele patru structuri uzuale de modelare secvențială în GRAFCET: secvență simplă, ramificare alternativă, ramificare simultană și salt/buclă, ilustrate prin exemple mecanice reprezentative. 256
Figura 8.6. Descompunere didactică a specificației GRAFCET pe trei niveluri de detaliu: funcțional, tehnologic și operațional. Nivelurile sunt o convenție pedagogică a acestui capitol și nu reprezintă o clasificare normativă a IEC 60848. 257
Figura 8.7. Exemplu de ciclogramă pentru un ciclu cu patru actuatoare (Y1 fixare, Y2 presare, Y3 marcare, M1 evacuare). Timp total de ciclu 6,0 s → cadență 10 piese/min. Panoul lateral sintetizează informațiile pe care proiectantul mecanic le poate extrage direct din diagramă. 258
Figura 8.8. Bugetul timpului de ciclu pentru o linie de asamblare cu cadența-țintă 12 piese/min. Sus: variantă secvențială, 5,0 s/ciclu. Jos: exemplu didactic de suprapunere controlată a verificării cu fazele finale de procesare și evacuare, rezultând 4,3 s/ciclu (aprox. 14 piese/min). Paralelizarea este admisă numai dacă independența fizică, dinamica și senzoristica o permit. 260
Figura 8.9. Moduri și stări operaționale ale mașinii și relația lor cu funcția separată de siguranță E-STOP. Tranzițiile și necesitatea HOME/RECOVERY se stabilesc pentru arhitectura concretă. 265

Figura 8.10. Modelul PackML cu 17 stări conform ISA-TR88.00.02-2022. Reprezentarea evidențiază fluxul principal, buclele HOLD/SUSPEND și ramura ABORT/CLEARING; oprirea de urgență rămâne o funcție de siguranță distinctă. 267

Figura 8.11. Descompunerea OEE în cele trei componente și principalele pârghii mecanice asociate. Disponibilitatea este influențată de fiabilitate și mentenabilitate (inclusiv MTBF și MTTR), performanța de cinematică și dinamică, iar calitatea de precizie, repetabilitate și stabilitate. 269

Figura 9.1. Poziționarea Capitolului 9 în ciclul V. Siguranța funcțională este o temă transversală: apare în cerințe (PLr/SIL rezultat din evaluarea riscului și standardele aplicabile), arhitectură (de exemplu categoriile B/1/2/3/4 în ISO 13849-1), subsisteme (componente cu date de siguranță documentate), implementare (hardware/software adecvat) și verificare/validare. Testele FAT/SAT pot furniza dovezi, dar nu substituie validarea funcției de siguranță. 283

Figura 9.2. Tranziția de la Directiva 2006/42/CE la Regulamentul (UE) 2023/1230. Pe lângă schimbarea juridică de la directivă la regulament cu aplicare directă, noul cadru tratează explicit teme precum software-ul relevant pentru siguranță, comportamentul auto-evolutiv, cybersecurity și documentația digitală, care erau mult mai puțin dezvoltate în Directiva 2006/42/CE [28]. 284

Figura 9.3. Procesul iterativ de evaluare și reducere a riscului conform ISO 12100 și prioritatea celor trei categorii de măsuri: proiectare intrinsec sigură, protecții/safeguarding și informații pentru utilizare. Figura este o sinteză didactică; aplicarea concretă urmează standardul și analiza proiectului. 286

Figura 9.4. Graful de risc S–F–P pentru determinarea PLr conform ISO 13849-1, Anexa A. Parametrii descriu severitatea, frecvența/durata expunerii și posibilitatea de evitare; selecția lor trebuie justificată pentru aplicația concretă. 287

Figura 9.5. Nivelurile PL (a–e) și intervalele PFH asociate, împreună cu caracteristicile calitative ale categoriilor arhitecturale B, 1, 2, 3 și 4. Nu există o corespondență univocă între categorie și PL; PL realizat depinde de categorie, MTTFd, DCavg, CCF și cerințele sistematice/software. 289

Figura 9.6. Categoriile de oprire conform IEC 60204-1: categoria 0, oprire necontrolată prin îndepărtarea imediată a energiei; categoria 1, oprire controlată urmată de îndepărtarea energiei; categoria 2, oprire controlată cu energia către actuatoare menținută. Pentru oprirea de urgență sunt utilizabile categoriile 0 sau 1, în funcție de evaluarea riscului. 292

Figura 9.7. Exemplu conceptual de stare sigură pentru un actuator pneumatic. Configurația distribuitorului și a circuitului trebuie aleasă astfel încât pierderea comenzii să conducă la starea definită prin evaluarea riscului; mișcarea și timpul de oprire se verifică experimental. 294

Figura 9.8. Exemplu conceptual pentru reținerea unei sarcini hidraulice verticale. Supapele de menținere a sarcinii și măsurile mecanice pentru mentenanță se dimensionează din scenariile de defect și din cerințele mașinii; schema ilustrată nu reprezintă o configurație universal obligatorie. 294

Figura 9.9. Funcții safety pentru o axă electrică. STO elimină capacitatea drive-ului de a produce cuplu, dar nu realizează prin ea însăși frânarea și nu împiedică mișcarea gravitațională. Pentru axe verticale se analizează SS1/SBC, frâne și/sau retenție mecanică [148]. 295

Figura 9.10. Exemple de limitare mecanică pasivă: opritor rigid, absorbitor de energie și dispozitiv mecanic de reținere. Alegerea se face din energia de impact sau sarcina statică, frecvența solicitării, spațiul disponibil, modul de defectare și cerințele de mentenanță. 295

Figura 9.11. Relația de proiectare S = K·T + C utilizată în metodele ISO 13855:2024. Parametrii K și C se selectează pentru geometria de apropiere și tipul dispozitivului, iar T include întregul lanț de răspuns până la încetarea mișcării periculoase. 297

Figura 9.12. Distanțe de protecție conform ISO 13857: trei scenarii de acces, reach-over (peste gard), reach-around (în jurul gardului), reach-through (prin deschideri din gard). Pentru fiecare scenariu, standardul tabulează distanțele minime în funcție de înălțime și dimensiune deschidere. Proiectarea gardurilor începe cu identificarea scenariului dominant și selecția distanțelor corespunzătoare. 299

Figura 9.13. Tipuri de dispozitive de interblocare conform ISO 14119:2024: Type 1, mecanic necodificat; Type 2, mecanic codificat; Type 3, fără contact, necodificat; Type 4, fără contact, codificat. Nivelul de codare și măsurile împotriva eludării se aleg din evaluarea riscului și din utilizarea previzibilă; Type 4 nu este obligatoriu prin simpla cerință de PL. 301

Figura 9.14. Flux didactic în șase pași pentru controlul energiilor periculoase, corelat cu practica LOTO din OSHA 29 CFR 1910.147 și cu principiile de prevenire a pornirii neașteptate din ISO 14118. Nu reprezintă o procedură universală impusă de un singur standard; procedura organizației trebuie adaptată echipamentului și legislației aplicabile [152, 153]. 302

Figura 9.15. Regiuni corporale relevante pentru evaluarea Power and Force Limiting (PFL) conform ISO/TS 15066 și cele patru metode consacrate de operare colaborativă. Valorile biomecanice și combinația măsurilor se stabilesc pentru aplicația concretă și se validează experimental. 305

Figura 9.16. Arhitectură conceptuală a funcțiilor de siguranță pentru SAP: exemple de lanțuri funcționale pentru acces, fixarea pneumatică CL1/CL2 și oprirea de urgență. Starea sigură a axei verticale Z, măsurile pentru energia pneumatică și parametrii PLr/PL, timpii de oprire și validarea se stabilesc separat pentru fiecare funcție. 310

Figura 10.1. Poziționarea Capitolului 10 în ciclul V de proiectare. Documentația tehnică se constituie pe întreg ciclul proiectului: cerințele, evaluarea riscurilor, desenele, calculele, rapoartele de verificare și instrucțiunile sunt generate progresiv și sunt compilate înainte de introducerea pe piață sau punerea în funcțiune..... 322

Figura 10.2. Structurare didactică A–G a documentației tehnice și corespondența ei cu elementele Anexei IV, Partea A. Gruparea A–G este o convenție de lucru a manualului; conformitatea se verifică față de conținutul legal al Anexei IV, nu față de numărul de secțiuni interne. 324

Figura 10.3. Structura declarației UE de conformitate conform Anexei V, Partea A a Regulamentului (UE) 2023/1230. Declarația trebuie corelată cu produsul, legislația aplicabilă, standardele/specificațiile utilizate și procedura de evaluare a conformității. 327

Figura 10.4. Relația dintre standardele Tip A, Tip B și Tip C. Standardele Tip C conțin cerințe pentru o categorie specifică de mașini și au prioritate pentru aspectele pe care le tratează atunci când prevederile lor diferă de standardele Tip A sau B. 329

Figura 10.5. Flux ECAD orientat pe date: de la cerințe și lista I/O la scheme și rapoarte generate dintr-o sursă comună. Beneficiul principal este consistența și trasabilitatea; gradul de automatizare depinde de biblioteci, reguli și integrarea software a organizației..... 332

Figura 10.6. Flux didactic în 10 pași pentru pregătirea marcajului CE. Documentația se constituie pe parcursul proiectării; efortul relativ al fazelor depinde de complexitatea mașinii, procedura de evaluare a conformității, maturitatea organizației și cerințele clientului..... 336

Figura 10.7. Comparație didactică a volumului documentar pentru diferite categorii de proiect. Valorile ilustrează ordinul de mărime și nu reprezintă praguri normative sau benchmark-uri obligatorii..... 338

Figura 11.1. Poziționarea Capitolului 11 în ciclul V de proiectare. Cerințele de dependability, FMEA, DfR și mentenabilitate trebuie inițiate în fazele descendente ale proiectării, apoi verificate și actualizate pe ramura de integrare, validare și exploatare; ele nu sunt activități rezervate momentului livrării. 348

Figura 11.2. Relația dintre MTBF, timpul de reparare/restaurare, availability și rata de defectare în modele simple. Formulele trebuie utilizate împreună cu ipotezele statistice și cu definiția contractuală a timpului de oprire; nu constituie o specificație minimă universală..... 350

Figura 11.3. Reprezentare conceptuală a curbei bathtub: defectări timpurii, regim aproximativ staționar și uzură. Axele temporale și amplitudinile sunt schematice; strategia de screening, mentenanță sau înlocuire se stabilește din datele aplicației, nu din praguri orare universale..... 351

Figura 11.4. Exemple exclusiv didactice de date ipotetice (H) pentru exerciții de fiabilitate și mentenabilitate. Valorile nu reprezintă date industriale tipice, performanțe ale SAP sau informații de catalog; indicatorii exprimați în cicluri nu sunt MTBF în ore. Exemplul liniei cu 20 de stații presupune stații identice, independente și hazard constant. 352

Figura 11.5. Comparație între RPN și Action Priority în metodologia AIAG-VDA 2019. AP folosește combinația S-O-D pentru a orienta acțiunile; valorile din figură sunt didactice, iar prioritatea reală se determină cu tabelele oficiale ale handbook-ului..... 354

Figura 11.6. Cei 7 pași ai metodei AIAG-VDA FMEA. Primele trei etape definesc contextul, structura și funcțiile; etapele 4-5 construiesc lanțurile de defectare și prioritizează acțiunile; etapele 6-7 optimizează și documentează rezultatele. 355

Figura 11.7. Patru direcții DfR utilizate în capitol: derating, redundanța/toleranța la defect, simplitate și utilizarea componentelor cu date dovedite. Efectul asupra MTBF se cuantifică pentru aplicația concretă; nu există factori universali de îmbunătățire..... 361

Figura 11.8. Cinci direcții DfM utilizate didactic: accesibilitate, modularitate, standardizare, diagnostic/testabilitate și identificare/etichetare. Impactul asupra MTTR se măsoară prin task-uri de mentenanță și teste de serviceability, nu prin factori universali. 364

Figura 11.9. Patru strategii de mentenanță care pot coexista: reactivă, preventivă, condition-based/predictivă și prescriptivă. Alegerea corectă depinde de criticitate și de modul de defectare; figura nu reprezintă o ierarhie universală în care o strategie este întotdeauna mai bună decât alta..... 366

Figura 11.10. Exemple de mărimi utilizate în condition monitoring: vibrații, temperatură, semnătură electrică și presiune/debit. Pentru fiecare se definesc senzorul, poziția, rata de eșantionare, baseline-ul, indicatorii de stare, pragurile și acțiunea de mentenanță asociată. 367

Figura 11.11. Patru scenarii didactice pentru evaluarea PdM în sectoare diferite. Valorile economice din figură trebuie înlocuite sau recalibrate cu datele organizației; figura ilustrează structura unei analize ROI, nu promite un interval universal de recuperare. 368

Figura 12.1. Poziționarea Capitolului 12 în ciclul V de proiectare. FAT, SAT și testele de integrare oferă niveluri complementare de verificare/validare; momentul handover-ului și transferul contractual al responsabilităților se stabilesc prin documentele proiectului. 380

Figura 12.2. Exemplu didactic de secvență în 6 faze: Mechanical Acceptance, Electrical Acceptance, Safety Acceptance, FAT, SAT și Performance Qualification. Amplasarea, ordinea și criteriile fiecărei faze se stabilesc prin planul de verificare/validare al proiectului; structura nu reprezintă o listă universal obligatorie din IEC 62381. 380

Figura 12.3. Domenii principale de verificare în cadrul FAT: mecanică, electrică, pneumatică/fluidică, funcționare secvențială, safety și performanță. Conținutul și amploarea verificărilor se stabilesc în funcție de specificația contractuală, arhitectura echipamentului, riscurile identificate și standardele aplicabile. 383

Figura 12.4. Exemplu de clasificare contractuală A/B/C a punctelor de punchlist: A blocant, B important, C minor. Regula de expediere și termenul de închidere pentru fiecare categorie trebuie stabilite în contract/protocol; clasificarea nu este universală. 385

Figura 12.5. Comparație didactică SAT vs. FAT pe nouă dimensiuni: locație, mediu, utilități, personal, produse/sarcini, durată, integrare de linie, test de performanță continuă și handover. Valorile exacte și efectele contractuale se definesc proiect-specific. 386

Figura 12.6. Exemplu didactic de criterii cantitative pentru SAT: cadență, disponibilitate/OEE, calitate, safety, timp de restaurare, competența operatorilor, documentație și status punchlist. Țintele și regulile PASS/FAIL trebuie definite contractual pentru aplicația concretă..... 387

Figura 12.7. Configurații reprezentative pentru Virtual Commissioning: SiL, HIL și model mecatronic/digital twin utilizat în testare. Acestea nu reprezintă trepte normative obligatorii; fidelitatea și configurația se aleg în funcție de obiectivul de verificare și de ciclul de viață. 392

Figura 12.8. Flux didactic ECR/ECO în 4 pași: cerere de modificare, analiză de impact multidisciplinară, aprobare și ordin/implementare controlată. Denumirile documentelor pot varia; principiul este menținerea trasabilității între echipament, software și documentația tehnică. 394

Figura 12.9. Flux didactic de evaluare a unei posibile modificări substanțiale, construit pe art. 3 pct. (16) și art. 18 din Regulamentul (UE) 2023/1230. Figura trebuie utilizată ca instrument de lucru, nu ca prag numeric sau ca substitut al textului juridic [28]. 398

Figura 12.10. Trei scenarii didactice FAT/SAT pentru sectoare diferite: auto (sudare laser), farmaceutic (linie blistere) și ambalare (linie PET). Valorile din figură ilustrează structura unei analize comparative și nu reprezintă standarde sectoriale obligatorii. 399

Figura 13.1. Poziționarea Capitolului 13 în ciclul V de proiectare. Digital Twin, AAS, OPC UA, MBSE și Digital Thread extind digital artefactele create în capitolele anterioare și le conectează prin relații trasabile; implementarea concretă depinde de arhitectura informațională și de cerințele proiectului. 410

Figura 13.2. Relația conceptuală dintre Digital Shadow, Digital Twin și Digital Thread. Figura trebuie interpretată prin tipul de sincronizare și continuitatea datelor, nu prin procente universale de adopție sau printr-o scară normativă de maturitate..... 411

Figura 13.3. Cadru pedagogic în 5 trepte de capabilitate digitală: 0 Offline, 1 Monitorizare conectată, 2 Digital Shadow, 3 Digital Twin, 4 Digital Thread. Treptele sunt orientative și nu includ procente normative de adopție pe țări sau sectoare..... 412

Figura 13.4. Exemplu de structură AAS cu un set posibil de submodele pentru un echipament: Digital Nameplate, Technical Data, Handover Documentation, date operaționale/time series și informații de mentenanță. Portofoliul exact se alege din Submodel Templates IDTA și din cerințele proiectului; figura nu trebuie interpretată ca o listă de șase submodele obligatorii IEC 63278-1..... 415

Figura 13.5. RAMI 4.0: model tridimensional Layers × Hierarchy Levels × Life Cycle. Pentru utilizare actuală se recomandă citarea RAMI 4.0 ca model de referință consacrat prin DIN SPEC 91345/Plattform Industrie 4.0 și corelarea, după caz, cu IEC 62264 și IEC 62890; IEC PAS 63088:2017 este retrasă din 2024..... 416

Figura 13.6. Reprezentare pedagogică a relației IEC 62264/ISA-95 dintre proces, control, manufacturing operations și business systems, cu OPC UA ca mecanism posibil de schimb de informații între niveluri. Figura nu trebuie să sugereze că OPC UA «elimină» nivelurile ISA-95 sau garantează o integrare PLC–MES într-un număr fix de zile..... 420

Figura 13.7. Exemple de Companion Specifications / information models OPC UA relevante pentru machinery: OPC UA for PackML (OPC 30050), EUROMAP 77/83 pentru plastics & rubber machinery, OPC UA for Robotics (OPC 40010-1) și OPC UA for Machinery (OPC 40001-1). Rolul lor este interoperabilitatea semantică; suportul și versiunea trebuie verificate pentru fiecare echipament. 421

Figura 13.8. Cele nouă tipuri clasice de diagrame din SysML v1.x, grupate uzual în structurale, comportamentale, requirements și parametric. În 2026 această figură trebuie însoțită de mențiunea explicită că SysML v2.0 este standardul de generație nouă și nu se reduce la aceeași listă fixă de nouă diagrame. 423

Figura 13.9. Patru tipare reprezentative de arhitectură pentru Digital Twin/IIoT: suită engineering–PLM integrată, ecosistem product/production lifecycle, platformă orientată IIoT/AR și arhitectură cloud/edge modulară. Exemplele de produse sunt ilustrative; figura nu reprezintă un clasament de piață sau o listă de «platforme dominante»..... 425

Figura 13.10. Patru tipuri de cazuri industriale relevante pentru Industry 4.0: fabrică de electronice cu digitalizare extinsă și quality loops, planificare virtuală a unei fabrici auto, linie multi-machine conectată semantic și controler industrial Linux/app-based. Valorile KPI din surse publice trebuie atribuite cazului concret, nu tratate ca ținte universale..... 427

Figura 13.11. Scenariu conceptual propus de Digital Thread pentru stația SAP în șase faze: Design, Dezvoltare, Validare, Operare, Evoluție și EOL. Datele și artefactele sunt conectate prin identificatori, versionare și relații trasabile. Beneficiul se evaluează prin reutilizare, impact analysis și reducerea rework-ului, nu prin procente universale. 429

Figura 14.1. Poziționarea celor șapte direcții emergente în raport cu fundamentul metodologic dezvoltat în Capitolele 1–13. Aplicabilitatea fiecărei direcții depinde de cerințele și arhitectura proiectului. 438

Figura 14.2. Patru metode consacrate de operare colaborativă: SMS, HG, SSM și PFL. Figura este o sinteză didactică; nivelul de risc și măsurile necesare se stabilesc la nivelul aplicației, nu prin alegerea unei etichete de mod. 439

Figura 14.3. Sinteză didactică a zonelor corporale relevante pentru validarea PFL. Culorile și calificativele din figură sunt numai orientative și nu reprezintă o ierarhie normativă de toleranță; valorile exacte de forță și presiune, tipul de contact și procedura de măsurare se verifică în ISO/TS 15066 și în analiza de risc a aplicației. 440

Figura 14.4. Comparație conceptuală între DMS, FMS și RMS. Pozițiile relative sunt orientative și ilustrează diferențe de varietate, volum, flexibilitate și reconfigurabilitate; nu reprezintă praguri normative sau reguli economice universale..... 442

Figura 14.5. Comparație conceptuală AGV–AMR și rolul etapelor de bază ale SLAM. Performanța de navigație depinde de senzori, mediu, algoritmi, infrastructură și software-ul de fleet management..... 445

Figura 14.6. Hartă didactică a regimurilor AI Act. „Piramida în patru niveluri" este o simplificare pedagogică: juridic trebuie diferențiate practicile interzise (art. 5), sistemele high-risk (art. 6 și anexele relevante), obligațiile de transparență pentru anumite sisteme (art. 50), precum și celelalte sisteme AI și regulile distincte pentru GPAI. 447

Figura 14.7. Exemplu pedagogic de segmentare IEC 62443 în zone și conduits. Topologia este ilustrativă, iar Security Level Target și controalele se stabilesc prin evaluarea de risc pentru fiecare zonă și conduit. 449

Figura 14.8. CRA și NIS2: diferența dintre cerințele aplicabile produselor cu elemente digitale și cele aplicabile organizațiilor aflate în domeniul NIS2, împreună cu reperele temporale principale ale aplicării. 450

Figura 14.9. ESPR și Digital Product Passport: structură conceptuală și calendar prudent. Cerințele și termenele DPP depind de grupa de produse și de actele delegate aplicabile; Battery Passport are separat termenul legal de 18 februarie 2027 pentru categoriile relevante..... 452

Figura 14.10. TSN time-aware scheduling și arhitectură conceptuală de rețea 5G industrială privată. Performanța depinde de profil, configurație, spectru, RAN/core și use case; figura nu exprimă limite universale de latență. 454

Figura 14.11. V-Model integrat pe stația SAP, cu Capitolele 1–13 și Capitolul 14 ca strat transversal de teme emergente. Figura este o sinteză didactică a obiectivelor și livrabilelor propuse; caseta „Dovezi de pregătit" indică activități viitoare de documentare, testare și evaluare, nu conformitate demonstrată sau marcaj CE obținut..... 456

Figura 14.12. Lanțul de trasabilitate cerință–soluție–metodă–dovadă–decizie pentru dezvoltarea ulterioară a stației SAP (schemă metodologică originală). 458

Lista de tabele

Tabelul 1.1. Acronime utilizate în Capitolul 1. 3
Tabelul 1.2. Cele cinci familii principale de echipamente de fabricație, criteriile de încadrare și producătorii dominanți. 8
Tabelul 1.3. Cerințele constructive dominante pentru cele cinci familii principale de echipamente de fabricație. Valorile sunt orientative pentru echipamente de complexitate medie și se verifică prin specificația contractuală, calcule și teste de acceptanță. 9
Tabelul 1.4. Comparație didactică între edițiile 2004 și 2021 ale VDI/VDE 2206. 18
Tabelul 1.5. Comparație sintetică între patru abordări utilizate în proiectarea sistemelor inginerești. 20
Tabelul 1.6. Decizii constructive și ipoteze ale configurației SAP de referință. Cadența de 120 ansambluri/oră și forța maximă de 8 kN sunt scenarii preliminare; componentele concrete și criteriile de acceptare necesită calcul și dovezi. 23
Tabelul 2.1. Acronime și notații utilizate în Capitolul 2. 31
Tabelul 2.2. Comparație între caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare pentru un echipament de fabricație, pe baza VDI 2519 și VDI/VDE 3694 [15, 26]. 44
Tabelul 2.3. Extras din caietul de sarcini al stației SAP. Fiecare cerință are identificator, categorie, enunț atomic și metodă de verificare. 44
Tabelul 2.4. Categorii de cerințe mecanice care trebuie analizate explicit în caietul de sarcini al unui echipament de fabricație. 46
Tabelul 2.5. Matrice QFD simplificată pentru stația SAP. Scorurile exprimă relații relative între cerințele clientului și caracteristicile tehnice; țintele se stabilesc separat prin calcule și validare. 50
Tabelul 2.6. Alocarea funcțiilor terminale pe domenii tehnice și soluții preliminare. Soluțiile devin obligatorii numai după aprobarea specificației tehnice de realizare. 51
Tabelul 2.7. Extras din matricea de trasabilitate a stației SAP. Stările sunt: trecut, de verificat la SAT sau în curs. 53
Tabelul 2.8. Exemplu de trasabilitate mecanică nevoie–cerință–specificație–desen–test pentru stația SAP. 54
Tabelul 3.1. Structura Capitolului 3. 59
Tabelul 3.2. Glosar de termeni, simboluri și acronime utilizați în Capitolul 3. 60
Tabelul 3.3. Materiale uzuale pentru cadre sudate. Nivelurile de cost sunt comparative; prețul real depinde de formă, cantitate, certificare, finisaj și momentul achiziției și se validează prin ofertă [34]. 63
Tabelul 3.4. Exemplu conceptual de niveluri de precizie pentru ghidaje profilate. Denumirile claselor și toleranțele sunt specifice producătorului și seriei; valorile se verifică în catalog [48], [49]. 69
Tabelul 3.5. Exemplu conceptual de niveluri de precomprimare. Denumirile, codurile și valorile sunt specifice producătorului/seriei; selecția se face din cerința de rigiditate, frecare, durată și precizie [48], [49]. 70
Tabelul 3.6. Exemple de specificații dimensionale, geometrice și de textură pentru zone critice ale unui echipament. Valorile sunt puncte de pornire didactice și trebuie validate prin calcul, procesul de fabricație și capabilitatea metrologică. 84
Tabelul 3.7. Strategie de verificare la oboseală pentru componentele critice ale SAP. Metoda se alege după tipul componentei și detaliul constructiv; valorile finale necesită rezultate de calcul/FEM și date de material/proces. 85
Tabelul 3.8. Lista mecanică de materiale (BOM) pentru SAP. Tipologiile sunt definite tehnic; furnizorul/modelul se selectează ulterior din componente care satisfac cerințele și interfețele. 86
Tabelul 4.1. Structura Capitolului 4. 92
Tabelul 4.2. Notații utilizate în Capitolul 4. 93
Tabelul 4.3. Sisteme de distribuție de joasă tensiune conform IEC 60364, cu aplicabilitate în mediul industrial. 98
Tabelul 4.4. Tipuri de surse de alimentare DC 24 V utilizate în echipamentele de fabricație industrială. 100
Tabelul 4.5. Cele patru familii principale de acționări electrice utilizate în echipamentele de fabricație industrială. 102
Tabelul 4.6. Familii de cuplaje motor–sarcină și criterii de selecție; valorile admisibile se verifică în catalogul cuplajului ales. 110
Tabelul 4.7. Cei șapte parametri esențiali ai parametrizării unui VFD industrial. 113

Tabelul 4.8. Parametri principali ai exemplului de parametrizare pentru SINAMICS G120. 114
Tabelul 4.9. Criterii de selecție a ecosistemului de acționare pentru un echipament de fabricație. 116
Tabelul 4.10. Funcțiile complementare de protecție și principalele date care trebuie verificate. 117
Tabelul 4.11. Caracteristici uzuale ale MCB-urilor și criterii de alegere în echipamentele de fabricație. 120
Tabelul 4.12. Elemente de integrare mecanică ale subsistemului electric și criterii de verificare. 124
Tabelul 4.13. Legătura dintre cerințele mecanice și consecințele electrice în proiectarea echipamentului. 125
Tabelul 5.1. Sinteza avantajelor și limitărilor pneumaticii în echipamente de fabricație. 137
Tabelul 5.2. Aplicații tipice ale claselor de calitate ISO 8573-1 și recomandări de tratare. 141
Tabelul 5.3. Forța teoretică la extindere pentru diametre uzuale ISO 15552 la 6 bar; valorile nu includ frecarea, contrapresiunea sau marja de proiectare. 146
Tabelul 5.4. Tipurile de montare incluse în ISO 15552:2018 pentru cilindri pneumatici cu montări detașabile; codificarea tipurilor urmează ISO 6099:2018 [50], [92]. 149
Tabelul 5.5. Familii uzuale de materiale și soluții de etanșare; compatibilitatea finală se verifică pentru compusul, fluidul și condițiile de lucru concrete. 151
Tabelul 5.6. Compromisuri între arhitecturile centralizată și descentralizată pentru subsistemul pneumatic. 153
Tabelul 5.7. Aplicații industriale uzuale ale amplificatoarelor de presiune în echipamentele de fabricație. 158
Tabelul 5.8. Diferențe fundamentale între subsistemele pneumatic și hidraulic. 160
Tabelul 5.9. Comparație sintetica a celor trei tehnologii principale de acționare în echipamente de fabricație. 165
Tabelul 6.1. Compararea familiilor principale de senzori de proximitate fără contact; valorile sunt orientative și se verifică pentru seria selectată. 182
Tabelul 6.2. Interfețe mecanice uzuale pentru montajul senzorilor de poziție și prezență; cuplurile și distanțele finale se preiau din documentația produsului. 189
Tabelul 6.3. Comparație între soluții de măsurare a poziției continue: encoder incremental, encoder absolut, LVDT și traductor magnetostrictiv. 196
Tabelul 6.4. Interfețe mecanice uzuale ale encoderelor; toleranțele admise se verifică pentru encoderul și cuplajul selectate. 197
Tabelul 6.5. Interfețe mecanice și de proces pentru senzori de forță, cuplu și presiune; valorile de montaj sunt orientative. 203
Tabelul 6.6. Aplicații uzuale ale viziunii industriale în echipamentele de fabricație. 209
Tabelul 6.7. Selecția arhitecturii de viziune în funcție de complexitatea aplicației, flexibilitate și integrare. 210
Tabelul 7.1. Matrice I/O funcțională pentru exemplul stației de presare. 222
Tabelul 7.2. Exemple de potrivire a arhitecturii PLC cu scara și funcțiile echipamentului; intervalele numerice nu constituie limite universale. 225
Tabelul 7.3. Familii uzuale de arhitecturi de control industrial și caracteristicile lor distinctive. 226
Tabelul 7.4. Comparație funcțională PROFINET, EtherCAT și EtherNet/IP pentru aplicații industriale tipice. 230
Tabelul 8.1. Glosar de termeni și acronime utilizați în Capitolul 8. 247
Tabelul 8.2. Defalcarea formală a livrabilelor între proiectantul mecanic și automatist. Lista reprezintă un nucleu didactic de livrabile pentru colaborarea dintre cele două roluri; responsabilitățile concrete se stabilesc contractual. 251
Tabelul 8.3. Exemple de calificatori de acțiune SFC și posibile utilizări în implementarea comportamentului cerut. Alegerea calificatorului este o decizie software verificată față de cerința fizică. 254
Tabelul 8.4. Cinci tipuri de informații evidențiate direct de ciclogramă. Aceste informații completează specificația GRAFCET și susțin deciziile de proiectare cinematică și de dimensionare. 259
Tabelul 8.5. Comparație transversală a celor patru scenarii didactice. Valorile și reperele normative sunt specifice contextului fiecărei aplicații și trebuie validate pentru proiectul real. 264
Tabelul 8.6. Implicații mecanice ale unui set reprezentativ de moduri/stări de operare și ale funcției E-STOP. Cerințele concrete se stabilesc pentru mașină și evaluarea de risc specifice. 266
Tabelul 8.7. Corespondența dintre unele stări PackML și implicațiile mecanice observabile. Configurația concretă a mașinii în fiecare stare se definește în profilul de implementare și nu este impusă universal de denumirea stării. 268
Tabelul 8.8. Pârghii mecanice care pot influența componentele OEE. Efectul fiecărei intervenții se cuantifică pe datele și convențiile de calcul ale proiectului, nu prin multiplicatori universali. 270

Tabelul 8.9. Livrabile și implicații mecanice pentru modurile/stările utilizate în scenariul didactic ALT. Selecția și condițiile lor sunt specifice aplicației. 275
Tabelul 9.1. Glosar de termeni și acronime utilizate în Cap. 9. 281
Tabelul 9.2. Criterii de alegere între ISO 13849-1 și IEC 62061 pentru o aplicație dată. 291
Tabelul 9.3. Exemple conceptuale de stări sigure pentru actuatoare industriale. Starea sigură reală se stabilește pentru fiecare funcție prin evaluarea riscului și validarea arhitecturii concrete. 293
Tabelul 9.4. Utilizarea ISO 13857:2019 pentru scenarii de reach-through, reach-over și reach-around. Valorile numerice se preiau din tabelul normativ corespunzător geometriei reale. 300
Tabelul 9.5. Parametrii care trebuie evaluați într-o aplicație PFL. Valorile biomecanice exacte și condițiile de măsurare se preiau din ISO/TS 15066 și din cerințele actuale ale aplicației. 305
Tabelul 9.6. Exemple de componente utilizate în funcții de siguranță și date care trebuie verificate. PL/SIL nu este o proprietate a denumirii componentei; performanța funcției complete depinde de configurația concretă, integrare și validare, iar datele/certificările de produs se verifică pentru modelul utilizat [131, 145, 146, 148, 155–157]. 307
Tabelul 9.7. Registru preliminar didactic al pericolelor pentru SAP de referință. Măsurile sunt propuneri de analizat; parametrii riscului, funcțiile de protecție și nivelurile PLr nu sunt încă determinați și validați. 311
Tabelul 10.1. Categorii de desene mecanice utilizate frecvent în modulul B și standarde de prezentare relevante. 325
Tabelul 10.2. Standarde tehnice cu impact direct asupra subsistemelor mecanice și fluidice. 331
Tabelul 10.3. Cartografierea rezultatelor MCAD pe modulele interne ale documentației tehnice. 333
Tabelul 11.1. Exemplu FMEA pentru varianta ALT–PRODUCT + ALT–PNEU + ALT–THROUGHPUT (modul electronic, presare pneumatică și 360 piese/oră). Valorile S/O/D sunt ipoteze didactice; AP* se determină din tabelul oficial AIAG–VDA. Cauzele, pragurile și intervalele de mentenanță nu descriu configurația de referință SAP. 357
Tabelul 11.2. Exemplu didactic FMEA pentru subsistemul electric al unei linii de îmbuteliere. Valorile S/O/D sunt ipoteze de exercițiu; AP* este lăsat de determinat cu tabelul oficial AIAG–VDA și cu cerințele clientului. 358
Tabelul 11.3. Exemplu FMEA pentru mecanismul convențional cu camă ALT–MECH, distinct de axa electrică Z a SAP. Valorile S/O/D sunt ipoteze didactice; AP* se determină din tabelul oficial. Mecanismele de deteriorare ale rulmenților pot fi corelate cu ISO 15243 [186], iar duratele de viață se calculează pentru condițiile reale de sarcină și mediu. 359
Tabelul 12.1. Exemplu didactic de verificări mecanice pentru FAT. Criteriile finale se preiau din desene, toleranțe, calcule, specificațiile producătorilor și standardele aplicabile; ordinea static înainte de dinamic este recomandată atunci când pornirea ar putea amplifica efectele unei neconformități de montaj. 384
Tabelul 12.2. Exemplu de criterii mecanice pentru SAT. Țintele se stabilesc din standardele aplicabile, documentația producătorilor și specificația contractuală; valorile numerice nu trebuie transferate între proiecte fără verificarea domeniului de aplicare. 388
Tabelul 13.1. Cinci perspective complementare pentru reprezentarea digitală a subsistemului mecanic. Ele descriu conținutul și fidelitatea modelului, nu trepte normative de maturitate și nu procente de adopție industrială. 414
Tabelul 14.1. Foaia de parcurs SAP: obiectivul, livrabilul și criteriul de trecere pentru fiecare milestone (cadru didactic). 457
Tabelul 14.2. Elemente ale stației SAP și dovezi necesare pe traseul de verificare și validare. 459
Tabelul A.1. Structura caietului de sarcini. 463
Tabelul A.2. Tabelul de cerințe: model de completare pentru stația SAP. 463
Tabelul B.1. Antetul protocolului de acceptanță. 465
Tabelul B.2. Fișa de verificare FAT/SAT: model de completare pentru stația SAP. 465
Tabelul B.3. Lista de neconformități (punchlist). 466
Tabelul C.1. Foaia de analiză DFMEA: model de completare pentru clema CL1 a stației SAP. 467
Tabelul D.1. Limitele mașinii. 468
Tabelul D.2. Registrul de riscuri: model de completare pentru stația SAP. 468
Tabelul D.3. Lista funcțiilor de siguranță: model de completare. 469
Tabelul E.1. Documentația tehnică pe module: lista de verificare. 470

Lista de acronime

Acronimele de mai jos sunt utilizate pe parcursul cursului. Fiecare acronim este definit la prima apariție în capitolul respectiv; lista aceasta servește ca referință consolidată pentru consultare rapidă.

Acronim	Definiție
AAS	Asset Administration Shell: reprezentare digitală standardizată a unui activ în ecosistemul Industrie 4.0 (IEC 63278 și specificațiile IDTA).
AGV	Automated Guided Vehicle, vehicul ghidat automat; arhitectura de navigație poate utiliza trasee și repere prestabilite. Cerințele de safety pentru driverless industrial trucks sunt tratate în ISO 3691-4:2023.
AI Act	Regulamentul (UE) 2024/1689 privind inteligența artificială
AIAG-VDA	Automotive Industry Action Group, Verband der Automobilindustrie (metodologie FMEA 2019)
AMR	Autonomous Mobile Robot, robot mobil autonom, capabil să utilizeze localizare, cartografiere și planificare dinamică a traseului; ISO 3691-4:2023 este reperul actual pentru safety.
AP	Action Priority: metoda de prioritizare FMEA conform AIAG-VDA 2019
BOM	Bill of Materials: listă structurată de materiale/componente pentru configurația controlată; conținutul și nivelul de detaliu depind de procesul organizației.
CAD	Computer-Aided Design
CBSF	Collision/force-pressure measurement device: dispozitiv utilizat pentru măsurarea forței și/sau presiunii de contact la validarea aplicațiilor PFL.
CE	Marcaj CE: marcaj prin care producătorul indică faptul că produsul este conform cu legislația de armonizare a Uniunii aplicabilă.
CIP	Clean-in-Place, sistem de curățare automată în-line
CNC	Computer Numerical Control
CRA	Cyber Resilience Act, Regulamentul UE 2024/2847
DC	Diagnostic Coverage, acoperirea diagnostică în siguranța funcțională
DfD	Design for Disassembly, proiectare pentru demontare
DfM	Design for Maintainability, proiectare pentru mentenabilitate; în alte surse DfM poate desemna Design for Manufacturing, de aceea sensul trebuie precizat.
DfR	Design for Reliability, proiectare pentru fiabilitate
DMS	Dedicated Manufacturing System
DoC	Declaration of Conformity, declarația UE de conformitate
DPP	Digital Product Passport, pașaportul digital al produsului (ESPR)
DT	Geamăn digital (Digital Twin)
E-Stop	Emergency Stop, buton/funcție de oprire de urgență
ECO	Engineering Change Order, ordin formal de modificare
ECR	Engineering Change Request, cerere formală de modificare
ENISA	European Union Agency for Cybersecurity
ERP	Enterprise Resource Planning
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation, Reg. UE 2024/1781
FAT	Testarea de acceptanță la producător (Factory Acceptance Test)
F-CPU	Failsafe CPU: controler/CPU destinat implementării funcțiilor de siguranță, conform arhitecturii și certificării producătorului.
FEM/FEA	Finite Element Method / Analysis
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FMS	Flexible Manufacturing System

FRL	Filter-Regulator-Lubricator, grup de tratare aer comprimat
FRER	Frame Replication and Elimination for Reliability (IEEE 802.1CB)
GMP	Good Manufacturing Practice
HG	Hand Guiding: metodă consacrată de operare colaborativă; aplicabilitatea și măsurile de safety se stabilesc la nivelul aplicației.
HIL	Hardware-in-the-Loop: configurație de Virtual Commissioning în care hardware-ul real de control este conectat la un plant simulat.
HMI	Human-Machine Interface
IACS	Industrial Automation and Control Systems
IDS	Intrusion Detection System
IEC	International Electrotechnical Commission.
IIoT	Industrial Internet of Things
IO-Link	Comunicație punct-la-punct pentru senzori și actuatoare (IEC 61131-9)
IP	Ingress Protection, clasă de protecție carcasă (IEC 60529)
IRDI	International Registration Data Identifier: schemă de identificare utilizată în dicționare și sisteme semantice industriale.
ISA	International Society of Automation.
ISO	International Organization for Standardization.
IT / OT	Information Technology / Operational Technology.
LiDAR	Light Detection and Ranging, senzor optic 2D/3D
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MCB	Miniature Circuit Breaker, disjunctor magnetotermic
MEC	Multi-access Edge Computing
MES	Manufacturing Execution System
MFA	Multi-Factor Authentication
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTF_d	Mean Time To dangerous Failure (ISO 13849-1)
MTTR	Mean Time To Repair
NIS2	Network and Information Security Directive 2, Dir. UE 2022/2555
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture (IEC 62541)
PACSF	Proiectarea Asistată de Calculator a Sistemelor de Fabricație (program de masterat UTCN)
PackML	Packaging Machine Language: model de stări, moduri și interfețe de date pentru mașini, dezvoltat în ecosistemul OMAC/ISA; OPC UA for PackML este o reprezentare semantică separată.
PdM	Predictive Maintenance, mentenanță predictivă
PFH_d	Probability of dangerous Failure per Hour
PFL	Power and Force Limiting: metodă de operare colaborativă bazată pe limitarea puterii/forței și validarea contactelor relevante.
PL / PL_r	Performance Level / required Performance Level (ISO 13849-1)
PLC	Programmable Logic Controller
PLM	Product Lifecycle Management
PROFINET	Familie Industrial Ethernet standardizată în cadrul IEC 61158/61784, utilizată pentru I/O, diagnostic și, în configurații adecvate, control sincron.
PROFIsafe	Profil de siguranță peste PROFINET
RAMI 4.0	Reference Architecture Model Industrie 4.0: model de referință tridimensional consacrat prin DIN SPEC 91345.
RCD	Residual Current Device, protecție diferențială

RMS	Root Mean Square, valoare eficace, utilizată în contexte electrice și de vibrații; Reconfigurable Manufacturing System, sistem de fabricație reconfigurabil. Sensul rezultă din context.
RPN	Risk Priority Number, metoda de prioritizare FMEA (clasică, pre-2019)
SAP	Stația de Asamblare prin Presare, studiul de caz integrativ al cărții
SAT	Testarea de acceptanță la beneficiar (Site Acceptance Test)
SBOM	Software Bill of Materials
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SIL / SiL	SIL, Safety Integrity Level (IEC 61508/IEC 62061); SiL, Software-in-the-Loop (VDI/VDE 3693). Capitalizarea este intenționată pentru evitarea ambiguității.
SL	Security Level (IEC 62443)
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SMD/SMT	Surface-Mount Device / Surface-Mount Technology
SMS	Safety-rated monitored stop: metodă de operare colaborativă în care mișcarea periculoasă este oprită în condițiile definite.
SRP/CS	Safety-Related Parts of Control Systems, părțile sistemului de comandă care realizează funcții de siguranță, în sensul ISO 13849.
SSM	Speed and Separation Monitoring: metodă de operare colaborativă bazată pe monitorizarea vitezei și separării.
ST	Structured Text, limbaj de programare PLC (IEC 61131-3)
STO	Safe Torque Off, funcție de siguranță pentru drive-uri
SysML	Systems Modeling Language (OMG)
TLS	Transport Layer Security, protocol de criptografie
TSN	Time-Sensitive Networking (IEEE 802.1)
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication (5G)
UTCN	Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
VC	Punere în funcțiune virtuală (Virtual Commissioning)
VDI/VDE	Verein Deutscher Ingenieure / Verband der Elektrotechnik
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VFD	Variable Frequency Drive, convertizor de frecvență

Convenții de notație

Această secțiune fixează convențiile tipografice, terminologice și de citare folosite consecvent pe parcursul cursului. Cititorul este invitat să le parcurgă o singură dată; ele devin invizibile odată internalizate.

Structura uniformă a capitolelor

Fiecare capitol începe cu o pagină de titlu evidențiind numărul capitolului în accent cromatic, urmată de o casetă introductivă „Despre acest capitol”, o casetă cu standardele și reglementările aplicabile, obiectivele de învățare, cunoștințele prealabile și un glosar al termenilor specifici introduși în capitol. Corpul capitolului este structurat în secțiuni numerotate (§X.1, §X.2, §X.3, ...) cu subsecțiuni (§X.1.1, §X.1.2, ...). Fiecare capitol se încheie cu o sinteză aplicată pe SAP, o recapitulare a conceptelor cheie, un set de întrebări de reflecție cu răspunsuri sintetice sau dezvoltate, iar referințele utilizate sunt reunite într-o bibliografie unică la sfârșitul cărții, distinctă de resursele complementare.

Numerotare figuri, tabele, ecuații

Figurile, tabelele și ecuațiile sunt numerotate independent, în cadrul fiecărui capitol, sub forma X.Y, unde X este numărul capitolului. Legenda tabelelor se plasează deasupra tabelului, iar legenda figurilor sub figură. Trimiterile în text utilizează forma „Figura X.Y” sau „Tabelul X.Y”; ecuațiile sunt indicate prin numărul în paranteze, de exemplu „relația (X.Y)”. Ecuațiile sunt editate ca ecuații Word și numerotate automat în cadrul capitolului, cu numărul (X.Y) aliniat la dreapta; variabilele se scriu cu litere cursive, indicii descriptivi cu litere drepte, iar simbolurile sunt reunite în Lista simbolurilor.

Citări și bibliografie

Citările urmează convenția numerică IEEE: fiecare sursă primește un număr la prima citare în text, iar același număr este reutilizat în toate capitolele. Referințele efectiv citate sunt reunite la sfârșitul volumului în secțiunea „Referințe bibliografice”, în ordinea primei apariții. Sursele suplimentare, păstrate pentru aprofundare sau în curs de verificare bibliografică, sunt prezentate separat în „Bibliografie complementară”; prezența lor acolo nu implică utilizarea drept suport pentru o afirmație din text. Cartea nu folosește note de subsol; explicațiile apar în text sau în casetele tipizate.

Casete tipizate de evidențiere

Pe parcursul textului apar casete tipizate cu rol specific: casetele „În practică” prezintă aplicații industriale concrete, decizii tipice și avertismente derivate din experiența practică; casetele „Standarde aplicabile” listează reglementările tehnice relevante pentru secțiunea respectivă; exemplele lucrate prezintă calcule complete cu valori tipice pentru proiectare. Aceste casete sunt clar delimitate vizual (bandă de accent în culoare, font diferit) pentru a permite cititorului să le repereze rapid la scanare vizuală.

Convenții de anonimizare a exemplelor

Exemplele industriale folosesc o convenție de anonimizare diferențiată. Fabricile concrete (beneficiarii finali care instalează și exploatează echipamentele) sunt anonimizate prin descriptori sectoriali, de exemplu „fabrică de componente auto din Europa Centrală” în loc de denumirea comercială. În schimb, mărcile comerciale ale echipamentelor standard sunt păstrate atunci când reprezintă taxonomia tehnică a unei clase: un robot colaborativ Universal Robots, un PLC Siemens S7-1500F, un robot mobil autonom MiR, un convertizor de frecvență Lenze sunt referințe ale clasei de echipament, întrucât identifică precis clasa tehnică discutată. Această convenție păstrează precizia tehnică (cititorul știe exact ce tip de echipament este discutat) fără a expune nominal organizațiile partenere.

Referirea la standarde și reglementări

Standardele tehnice sunt citate prin codul oficial complet la prima apariție (de exemplu ISO 13849-1:2023, IEC 60204-1:2016), urmat de codul scurt în referirile ulterioare în același capitol. Regulamentele UE sunt citate prin codul oficial (Regulamentul UE 2023/1230, Directiva UE 2022/2555) cu mențiunea articolelor relevante. Standardele și regulamentele active la momentul finalizării ediției (septembrie 2026) sunt cele referite ca normative; tranzițiile preconizate (de exemplu aplicabilitatea integrală a CRA în decembrie 2027) sunt menționate explicit ca atare.

Terminologie consacrată

Pentru conceptele impuse în literatura tehnică și în practica industrială internațională sub denumirea lor în limba engleză, volumul păstrează termenul englezesc, scris consecvent în aceeași formă: Industry 4.0 (respectiv Industry 5.0), Digital Twin și cybersecurity. Termenii sunt tratați ca substantive ale limbajului tehnic și primesc, la nevoie, articolul hotărât prin cratimă (de exemplu, Digital Twin-ul). Forma germană Industrie 4.0 apare numai în denumiri proprii și în context istoric (Plattform Industrie 4.0, RAMI 4.0, grupul de lucru din 2013), iar titlurile oficiale ale actelor normative sunt citate în forma lor publicată.

Stația de Asamblare prin Presare (SAP)

SAP (Stație automatizată de asamblare prin presare) este studiul de caz conceptual al cărții: un tub este introdus axial într-o carcasă, iar geometria îmbinării și ajustajul cu strângere se definesc ulterior prin desen și calcul. Configurația propusă utilizează o axă electrică principală pentru presare și acționări pneumatice pentru fixare; procesul este monitorizat prin măsurarea forței și a deplasării. Scenariul de 120 de ansambluri/oră (30 s/ciclu) și forța maximă de proiectare de 8 kN sunt ipoteze didactice preliminare, nu performanțe demonstrate. Cadența de 360 de ansambluri/oră, presarea pneumatică/hidraulică și alte produse constituie variante separate, explicit identificate. Valorile MTBF, disponibilitate și MTTR utilizate în exerciții nu sunt rezultate ale exploatării unei stații construite.

Lista simbolurilor

Lista reunește simbolurile mărimilor utilizate în ecuațiile numerotate și în exemplele rezolvate. Variabilele sunt scrise cu litere cursive, iar indicii descriptivi cu litere drepte, conform ISO 80000-1. Unitatea indicată este unitatea SI coerentă; în text și în exemple se folosesc frecvent multipli uzuali (mm, kN, bar, min $^{-1}$). Același simbol poate desemna mărimi diferite în capitole diferite; semnificația este precizată la prima utilizare în fiecare capitol.

Simbol	Mărime	Unitate SI	Capitol
A	aria activă a pistonului / a secțiunii	m^2	3, 5
A	disponibilitatea (componentă OEE; disponibilitate intrinsecă)	–	8, 11
A_{min}, A_{req}	aria minimă / necesară a pistonului	m^2	5
A_1, A_2	ariile pistonului de aer și ale plunjerului hidraulic	m^2	5
a	durata de exploatare cerută	an	3
a_{max}	accelerația maximă a axei	m/s^2	4
C	capacitatea dinamică de bază (ghidaj, rulment)	N	3, 11
C	termenul de intruziune / penetrare (ISO 13855, ISO/TS 15066)	mm	9, 14
C_{min}	capacitatea dinamică minimă necesară	N	3
C_{pk}	indicele de capabilitate a procesului	–	2, 12
c_{nom}	cadența nominală	piese/min	8
D, d	diametrul pistonului (alezajul)	m	3, 5
d_{min}	diametrul minim necesar al pistonului	m	5
$d_{tijă}$	diametrul tijei	m	5
d	distanța până la obiect (senzor ultrasonic)	m	6
d	coeficientul piezoelectric	C/N	6
E	modulul de elasticitate longitudinal	Pa	3
E	puterea totală radiată pe unitatea de arie	W/m^2	6
F	forța	N	3, 4, 5
F_{acc}, F_f	forța de accelerare; forța de frecare	N	4
F_{max}, $F_{max,design}$	forța maximă de presare (ipoteza de proiectare SAP)	N	1–4, 9
F_{teor}, F_{util}	forța teoretică / utilă a cilindrului	N	3, 5
F_u	forța utilă cerută	N	5
$F_{retragere}$	forța cilindrului la retragere	N	5
f	frecvența rețelei de alimentare	Hz	4
GF	factorul de marcă al extensometrului	–	6
h	pasul șurubului	m/rot	4
h_z	orele de funcționare pe zi	h	3
I	momentul de inerție axial al secțiunii	m^4	3
I	intensitatea curentului electric (valoare efectivă)	A	4
I_{in}	curentul la intrarea convertorului de frecvență	A	4
I_{static}, I_{EV}, I_{regim}, $I_{vârf}$, $I_{sursă}$	curenții bilanțului de alimentare 24 V DC	A	4
I_{cu}, I_n	capacitatea de rupere; curentul nominal	A	4
i	raportul de multiplicare	–	5
K	viteza de apropiere a corpului uman (ISO 13855)	mm/s	9

Simbol	Mărime	Unitate SI	Capitol
k	rigiditatea statică	N/m	3
k_u	coeficientul de utilizare a cilindrului	–	5
L	deschiderea grinzii; distanța de transfer; lungimea cablului	m	3, 4
L_{10}	durata nominală de viață (fiabilitate 90 %)	m; rotații	3, 11
L_{an}, L_{cerut}	cursa cumulată anuală / cerută	m (km)	3
MTBF	timpul mediu între defectări	h	1, 11
MTTR	timpul mediu de restabilire	h	11
m, m_t	masa; masa totală deplasată	kg	4
N_c	numărul de cicluri pe minut	min^{-1}	3
$N_{nominal}$, N_{produs}, N_{bune}, N_{rebut}	cantități de piese în calculul OEE	–	8
n	turația	min^{-1}	4
n_s, n_{max}	turația sincronă; turația maximă a motorului	min^{-1}	4
n_d	numărul de defectări	–	11
OEE	eficacitatea globală a echipamentului	–	8
P	puterea activă	W	4
P	sarcina dinamică echivalentă	N	3, 11
P	performanța (componentă OEE)	–	8
P_{mec}	puterea mecanică la arbore	W	4
P_h, P_{motor}	puterea hidraulică; puterea la motorul pompei	W	5
PF	factorul de putere total la intrarea convertorului	–	4
p	presiunea efectivă	Pa	3, 5
p	pasul șurubului cu bile	m/rot	3, 4
p	numărul de perechi de poli	–	4
p	exponentul relației de durată (3 sau 10/3)	–	3, 11
p_{min}	presiunea minimă garantată la cilindru	Pa	5
Q	debitul volumic	m^3/s	5
Q	calitatea (componentă OEE)	–	8
Q	sarcina electrică generată (senzor piezoelectric)	C	6
R	rezistența electrică	Ω	4, 6
$R(t)$	funcția de fiabilitate	–	11
R_{sistem}, R_i	fiabilitatea sistemului / a componentei i	–	11
S	distanța minimă de instalare a dispozitivului de protecție	mm	9
S_p, S_h, S_r, S_s	distanța de separare de protecție și componentele ei	m	14
s	alunecarea motorului asincron	–	4
s	cursa	m	3
s	abaterea standard de selecție	m	12
T	cuplul	N·m	3, 4
T	temperatura	K	6
T	timpul total de oprire / răspuns	s	9
T_{RMS}	cuplul efectiv (RMS) pe ciclu	N·m	4
T_{WC}, T_{RSS}	toleranța cumulată worst-case / statistică (RSS)	m	3
T_f	timpul total de funcționare	h	11
$T_{planificat}$, $T_{productiv}$	timpul planificat / productiv	min	8
T_r, T_s	timpul de reacție al sistemului; timpul de oprire al robotului	s	14

Simbol	Mărime	Unitate SI	Capitol
t	timpul	s	4, 11
t_{acc}, t_{total}	durata accelerării; durata totală a mișcării	s	4
t_{task}	durata ciclului task-ului de control	s	7
U	tensiunea electrică	V	4
U_{LL}, U_{LN}	tensiunea fază-fază / fază-neutru	V	4
ΔU	căderea de tensiune	V	4
u_c	incertitudinea standard compusă	unitatea mărimii măsurate	6
V	volumul	m^3	5
V_{out}	tensiunea de ieșire a traductorului LVDT	V	6
v	viteza	m/s	4, 5
v_{max}	viteza maximă a axei	m/s	4
v_h, v_r	viteza omului / a robotului	m/s	14
X	reactanța conductorului	Ω	4
$\bar{x}$	media de selecție	m	12
Z_d, Z_r	incertitudinile de poziție (om / robot)	m	14
z_{an}	numărul de zile lucrătoare pe an	–	3
α	coeficientul de temperatură al rezistenței	K^{-1}	6
α	accelerația unghiulară	rad/s^2	4
β	parametrul de formă al distribuției Weibull	–	11
β	modulul de elasticitate volumică al fluidului	Pa	5
δ, δ_{max}, δ_{adm}	deformația (săgeata); valoarea maximă / admisibilă	m	3
Δp, ΔV	variația de presiune; variația de volum	Pa; m^3	5
ε	deformația specifică (extensometru); emisivitatea	–	6
η	randamentul	–	3, 4, 5
η	parametrul de scară al distribuției Weibull	h	11
λ	rata de defectare	h^{-1}	11
σ	constanta Stefan–Boltzmann	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	6
ϕ	unghiul de defazaj (cos ϕ, factorul de putere)	rad	4
ω	viteza unghiulară	rad/s	4

PARTEA I

Fundamente metodologice

1 Proiectarea sistematică a echipamentelor de fabricație

2 Ingineria cerințelor



1 Proiectarea sistematică a echipamentelor de fabricație

Modelul V și VDI/VDE 2206 ca reper metodologic

Despre acest capitol

Echipamentele de fabricație industrială, de la o simplă presă pneumatică până la o linie completă de asamblare cu zeci de stații robotizate, sunt sisteme mecatronice complexe a căror proiectare integrează simultan mecanica, electrica, comanda și siguranța într-o arhitectură coerentă. Calitatea proiectării acestor echipamente influențează direct competitivitatea industrială. În scenariul regional utilizat ca exemplu didactic sunt folosite valori de aproximativ 280.000 de angajați și o pondere de ordinul a 35 % din exporturile industriale într-un perimetru extins Cluj–Sibiu–Timișoara. Aceste valori nu reprezintă statistici oficiale și trebuie tratate exclusiv ca indicatori orientativi, dependenți de anul de referință și de metoda de agregare. În același timp, o oră de oprire neplanificată poate genera pierderi de ordinul miilor sau zecilor de mii de euro, în funcție de cadență, valoarea produsului și efectele în lanț.

Acest capitol introduce cadrul metodologic general al proiectării echipamentelor de fabricație, plasând activitatea inginerului de proiectare într-un proces sistematic și verificabil. Sunt prezentate pe rând taxonomia echipamentelor industriale și arhitectura mecatronică unificată, ciclul de viață al proiectării de la specificația tehnică până la dezafectare, modelul V în acord cu ghidul VDI/VDE 2206 ca reper european pentru proiectarea sistemelor mecatronice și abordările complementare consacrate (Pahl & Beitz, Axiomatic Design, Model-Based Systems Engineering). Capitolul se încheie cu un studiu de caz integrator, echipamentul SAP Tube Pressing Machine, care va servi ca exemplu recurent în restul manualului.

La sfârșitul acestui capitol, cititorul va dispune de cadrul conceptual necesar pentru a urmări în mod coerent capitolele următoare, fiecare dintre acestea tratând un subsistem specific al echipamentului de fabricație în lumina aceleiași metodologii sistematice.

Standarde și referințe normative aplicabile

VDI/VDE 2206:2021, dezvoltarea sistemelor mecatronice și cyber-fizice; modelul V folosit ca reper metodologic în tot volumul [1].

VDI 2221, metodologia proiectării sistematice a produselor tehnice [2].

ISO 13849-1:2023 și IEC 62061:2021, siguranța funcțională a sistemelor de comandă; tratate în Capitolul 9 [3], [4].

IEC 63278-1:2023, Asset Administration Shell, identitatea digitală a echipamentului; tratat în Capitolul 13 [5].

Seria IEC 62443, cybersecurity pentru sistemele de automatizare și control industrial; tratată în Capitolul 14 [6].

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol și a problemelor propuse, cititorul va fi capabil:

- să clasifice un echipament industrial dat într-una dintre cele cinci familii principale (prelucrare prin așchiere, deformare plastică, asamblare, inspecție, ambalare) și să identifice cele patru macro-domenii mecatronice, respectiv cele opt subsisteme detaliate utilizate în structura manualului;
- să descrie cele opt etape ale ciclului de viață al unui echipament, de la specificație (caiet de sarcini / URS) la modernizare sau dezafectare, și să interpreteze critic regula 1:10:100 ca euristică de evaluare a costului descoperirii tardive a erorilor;
- să aplice modelul V conform VDI/VDE 2206 la un echipament concret, identificând trasabilitatea bidirecțională dintre nivelurile de proiectare (descendentă) și nivelurile de verificare (ascendentă);
- să distingă metodologiile complementare de proiectare (Pahl & Beitz, Axiomatic Design al lui Suh, MBSE bazat pe SysML) și să recunoască când și cum se combină acestea cu V-modelul în practica industrială;
- să citească critic un fragment de URS (User Requirements Specification) industrial real, identificând cerințele ambigue și transformându-le în cerințe SMART verificabile;
- să poziționeze fiecare capitol din restul manualului în arhitectura mecatronică introdusă aici, înțelegând relațiile cauzale dintre subsistemele mecanic, electric, fluidic, senzorial, hardware și software de control, siguranță funcțională și documentație tehnică.

Cunoștințe prealabile

Pentru parcurgerea capitolului se presupun cunoscute: noțiunile elementare de inginerie mecanică (organe de mașini, transmisii) și de electrotehnică (circuite electrice, motoare AC); noțiunile de bază privind automatizările industriale (PLC, senzori, actuatoare), echivalente cu programul anilor I–III ai licenței în Mecatronică sau Robotică. Pentru o citire confortabilă a secțiunilor §1.4 și §1.5 sunt utile noțiuni elementare de *Systems Engineering* (descompunere funcțională, trasabilitate cerințe-implementare), recapitulate scurt în text. Manualul se adresează studenților programelor de masterat *Robotică și Inteligență Artificială în Industrie* (RIAI) și *Proiectarea Asistată de Calculator a Sistemelor de Fabricație (PACSF)* ai Universității Tehnice din Cluj-Napoca, dar este accesibil oricărui inginer cu pregătire mecatronică interesat de proiectarea echipamentelor industriale.

Glosar de termeni și acronime

În acest capitol se utilizează consecvent acronimele tehnice de mai jos (Tabelul 1.1). Pentru termenii proveniți din alte limbi este indicată limba de origine, urmată de denumirea consacrată și de echivalentul sau explicația în limba română. Acronimele sunt definite și la prima apariție în text, iar tabelul facilitează consultarea rapidă.

Tabelul 1.1. Acronime utilizate în Capitolul 1.

Acronim	Denumire completă și explicație
AAS	engl.: Asset Administration Shell, reprezentarea digitală standardizată a unui activ industrial, conform IEC 63278; utilizată ca „pașaport digital” al activului
AMR	engl.: Autonomous Mobile Robot, robot mobil autonom, capabil să își adapteze traseul prin localizare și navigație
BDD	engl.: Block Definition Diagram, diagramă de definire a blocurilor în SysML
BOM	Bill of Materials: listă structurată de materiale/componente pentru configurația controlată; conținutul și nivelul de detaliu depind de procesul organizației.
CMM	engl.: Coordinate Measuring Machine, mașină de măsurat în coordonate
CNC	engl.: Computer Numerical Control, comandă numerică computerizată
CPS	engl.: Cyber-Physical System, sistem ciber-fizic
DP	engl.: Design Parameter, parametru de proiectare în metodologia Axiomatic Design
EOL	engl.: End-of-Line, testare finală realizată la capătul liniei de fabricație
FAT	engl.: Factory Acceptance Test, test de acceptanță la producător, efectuat înaintea livrării echipamentului
FMEA	engl.: Failure Mode and Effects Analysis, analiza modurilor de defectare și a efectelor acestora
FR	engl.: Funcțional Requirement, cerință funcțională în metodologia Axiomatic Design
HMI	engl.: Human–Machine Interface, interfață om–mașină
IBD	engl.: Internal Block Diagram, diagramă internă de blocuri în SysML
MBSE	engl.: Model-Based Systems Engineering, ingineria sistemelor bazată pe modele
OEE	engl.: Overall Equipment Effectiveness, eficacitatea globală a echipamentului
OEM	engl.: Original Equipment Manufacturer, producătorul original al echipamentului sau produsului
OPC UA	engl.: Open Platform Communications Unified Architecture, arhitectură unificată pentru comunicații industriale interoperabile, standardizată prin IEC 62541
PLC	engl.: Programmable Logic Controller, automat programabil
QFD	engl.: Quality Function Deployment, metodă de transpunere structurată a cerințelor clientului în caracteristici tehnice; „Casa Calității” este instrumentul său reprezentativ
SAP	Stația de Asamblare prin Presare, studiul de caz integrativ utilizat în carte
SAT	engl.: Site Acceptance Test, test de acceptanță la amplasamentul beneficiarului, după instalarea echipamentului
SIL	engl.: Safety Integrity Level, nivel de integritate a siguranței, conform IEC 61508
SPM	engl.: Special Purpose Machine, echipament cu destinație specială, proiectat și construit la comandă
SysML	engl.: Systems Modeling Language, limbaj de modelare a sistemelor, standardizat de OMG
TPM	engl.: Tube Pressing Machine, echipamentul de presare a tubului utilizat ca exemplu recurent; corespondentul în limba română este SAP
URS	engl.: User Requirements Specification, specificația cerințelor utilizatorului

Acronim	Denumire completă și explicație
VDI	germ.: Verein Deutscher Ingenieure, Asociația Inginerilor Germani

Harta capitolului

Capitolul este organizat în șase secțiuni de conținut, urmate de probleme aplicative și de o secțiune finală de recapitulare și reflecție. §1.1 plasează echipamentele de fabricație în peisajul industrial; §1.2 introduce taxonomia și arhitectura mecatronică; §1.3 descrie ciclul de viață; §1.4 dezvoltă modelul V și VDI/VDE 2206:2021; §1.5 prezintă abordările complementare Pahl & Beitz/VDI 2221, Axiomatic Design și MBSE; §1.6 aplică integrat cadrul pe stația SAP; §1.7 conține problemele propuse; §1.8 sintetizează conceptele-cheie și întrebările de reflecție. Referințele utilizate sunt reunite în bibliografia unică a volumului.

> **Cum se utilizează capitolul**
> Parcurgeți mai întâi §1.1–§1.2 pentru vocabularul comun și arhitectura sistemului; continuați cu §1.3–§1.4 pentru ciclul de viață și logica verificării; utilizați §1.5 ca hartă de selecție a metodologiilor; apoi reconstruiți cazul SAP din §1.6 sub forma unei matrice cerință–soluție–test. Pentru învățare activă, fiecare afirmație numerică trebuie tratată ca ipoteză de proiectare și verificată dimensional, contractual sau experimental.

1.1 Echipamentele de fabricație în peisajul industrial

1.1.1 Definiție și amploare economică

Pentru a ilustra amploarea unui program industrial complex, se poate utiliza următorul scenariu didactic compozit, inspirat din proiecte europene de extindere a unor fabrici de transmisii auto: 47 de centre de prelucrare CNC, 23 de stații de asamblare, 12 mașini de testare end-of-line, 18 celule robotizate și 6 linii automate de paletizare, cu o valoare totală ipotetică de 142 milioane EUR. Valorile nu descriu o achiziție identificabilă și nu sunt utilizate ca date statistice; ele indică doar ordinul de mărime și diversitatea tehnologică a unui proiect de investiții. Estimările comerciale privind piața globală a echipamentelor de fabricație și a mașinilor-unelte diferă semnificativ în funcție de delimitarea segmentului. Pentru proiectant, concluzia relevantă este că electrificarea transportului, reconfigurarea lanțurilor de aprovizionare și automatizarea susțin cererea pentru echipamente integrate; orice analiză economică reală trebuie fundamentată pe surse statistice actualizate și pe un perimetru de piață explicit.

Definiția operațională adoptată în acest manual este următoarea: **echipamentele de fabricație** reprezintă totalitatea sistemelor tehnice industriale utilizate pentru transformarea materiilor prime și a semifabricatelor în produse finite, prin operații controlate de prelucrare, asamblare, testare sau ambalare. Domeniul este vast, de la o presă manuală de fabricație artizanală la o linie completă automatizată cu sute de stații interconectate, și necesită, de aceea, o clasificare sistematică pentru a putea fi tratat metodologic. Această clasificare, dezvoltată în secțiunea următoare, identifică cinci familii principale corespunzătoare celor cinci tipuri principale de operații tehnologice.

1.1.2 Clusterul industrial al României în context european

România ocupă o poziție importantă ca beneficiar și integrator regional de echipamente de fabricație, în special prin concentrarea activităților din industria auto, electronice, de prelucrare mecanică și

bunuri de consum în regiunile Centru, Nord-Vest și Vest. Pentru ilustrarea dimensiunii ecosistemului, manualul utilizează un scenariu orientativ cu aproximativ 280.000 de angajați și o pondere de ordinul a 35 % din exporturile industriale într-un perimetru extins Cluj–Sibiu–Timișoara. Aceste valori nu reprezintă o statistică oficială și trebuie recalibrate în funcție de anul de referință, codurile CAEN incluse și modul de contabilizare a furnizorilor indirecți. Pentru student este mai importantă structura ecosistemului: fabrici de componente și sisteme auto, unități de producție pentru vehicule și transmisii, fabrici de electrocasnice, electronice și băuturi, toate fiind cumpărători recurenți de mașini speciale, celule robotizate, sisteme de inspecție și linii de ambalare.

Pe lângă consumul intern, în acest cluster s-a dezvoltat în ultimele două decenii un strat de furnizori locali specializați în echipamente și automatizări industriale: firme de tip OEM/SPM care proiectează și construiesc echipamente la cerere, integratori de sisteme și furnizori de soluții digitale. SAP este un concept didactic original de stație automatizată de asamblare tub–carcasă, utilizat pentru a exersa proiectarea interdisciplinară; nu descrie performanța certificată a unui utilaj comercial. Încadrarea unei companii concrete ca producător SPM, integrator de automatizări sau integrator IT trebuie făcută pe baza portofoliului său public actual; aceste roluri nu sunt echivalente. Organizațiile din ecosistemul regional deservesc atât piața locală, cât și proiecte de export. Pentru un absolvent de masterat în mecatronică din UTCN sau din alte universități tehnice, parcursul profesional poate include activitate într-o firmă SPM, la un integrator sau la un beneficiar industrial; de aceea, manualul integrează exemple din această zonă.

1.1.3 Actorii ecosistemului: patru roluri industriale

Ecosistemul economic al echipamentelor de fabricație implică patru categorii distincte de actori, fiecare cu un rol bine definit, propria sa logică financiară și propriile cerințe de competențe inginerești. Înțelegerea acestei structuri ajută inginerul-proiectant să-și plaseze munca în lanțul de valoare și să comunice corect cu fiecare interlocutor.

Producătorul de echipamente (OEM / SPM Builder). Proiectează, construiește și livrează echipamentul integrat și coordonează subsistemele mecanic, electric, fluidic, de control și de siguranță, precum și demonstrarea conformității aplicabile. Modelul economic este predominant proiect-la-comandă, iar marja, cifra de afaceri și structura costurilor depind de complexitate, gradul de externalizare, volum, risc și responsabilitățile contractuale. Profilul profesional cerut combină competențe mecatronice cu capacitatea de colaborare interdisciplinară.

Integratorul de sistem. Integrează linii și celule complete din echipamente provenite de la unul sau mai mulți furnizori, gestionează interfețele și coordonează controlul de linie. Valoarea contractului și structura economică depind de domeniul proiectului, garanții, risc, responsabilitatea asupra performanței și nivelul de integrare. Profilul profesional combină automatizări industriale, comunicații, integrare verticală și management de proiect.

Clientul industrial (End User). Produce piese sau produse finite folosind echipamentele cumpărate. Departamentul tehnic intern (Plant Engineering) elaborează specificațiile (caiet de sarcini / URS), evaluează ofertele furnizorilor, supraveghează punerea în funcțiune și asigură mentenanța. Cerere pe piața muncii: ingineri cu competențe de Manufacturing Engineering, Lean Manufacturing și mentenanță predictivă. Exemple: un producător european de electronică auto din Sibiu, un furnizor european de echipamente industriale din Cluj, o uzină OEM auto din Transilvania, un OEM auto cu fabrică la Mioveni.

Furnizorii de componente și subsisteme. Produc componente standard sau configurabile care intră în construcția echipamentului: acționări, senzori, componente pneumatice și hidraulice, PLC, controlere de siguranță și roboți. Structura economică și marjele diferă substanțial în funcție de volum, canalul de distribuție, servicii și proprietatea intelectuală. Pentru absolvenți, rolurile relevante includ R&D, inginerie de aplicație, suport de integrare și validare.

> **În practică**
>
> Pentru un absolvent de masterat în mecatronică, tipul de angajator poate influența semnificativ profilul experienței profesionale acumulate. Activitatea la un OEM/SPM poate oferi expunere la proiectare interdisciplinară, relația cu beneficiarul și ciclul complet al echipamentului; un integrator poate accentua automatizarea, comunicațiile și managementul interfețelor; un End User oferă expunere directă la producția de serie, mentenanță și îmbunătățire continuă; iar un furnizor de componente poate conduce la specializare aprofundată într-o familie tehnologică. Aceste profiluri se suprapun în practică și depind de organizație și de rolul concret. Manualul urmărește în primul rând competențele utile proiectării și integrării de echipamente, fără a exclude celelalte traiectorii.

1.1.4 Industry 4.0, Industry 5.0 și tendințele 2025–2030

Două paradigme succesive au reformulat cerințele de proiectare ale echipamentelor de fabricație. **Industry 4.0**, conturată în Germania la începutul anilor 2010 și consolidată programatic prin raportul final al grupului de lucru Industrie 4.0 din 2013 [7], a adus în prim-plan integrarea sistemelor cyber-fizice, a conectivității și a datelor pe întregul lanț de producție [8]. În acest manual, Industry 4.0 este operaționalizată didactic prin cinci atribute urmărite la nivelul echipamentului: conectivitate prin protocoale standardizate; reprezentare digitală; interoperabilitate; integrare verticală; și funcții de diagnostic/mentenanță bazate pe date. Această listă este o sinteză pedagogică, nu o taxonomie normativă. RAMI 4.0 este utilizat ca model de referință arhitectural pentru corelarea acestor perspective [9]. **Industry 5.0**, formulată de Comisia Europeană ca orientare complementară, accentuează trei principii: centrarea pe factorul uman, sustenabilitatea și reziliența [10], [11].

Impactul practic asupra proiectării echipamentelor noi se traduce în cinci direcții relevante pentru orizontul 2025–2030. Cobotizarea asamblării: roboții colaborativi pot extinde flexibilitatea acolo unde evaluarea riscului și procesul justifică interacțiunea apropiată; integrarea aplicației și a celulei se tratează conform ISO 10218-2:2025 [12], iar limitele și metodele biomecanice relevante pentru PFL se verifică în ISO/TS 15066:2016 [13]. AMR în logistica internă: flotele mobile pot înlocui sau completa transportul rigid, cu cerințe de orchestrare, interoperabilitate și integrare WMS/MES. AI integrată în viziune și control: modelele de învățare automată pot aborda clase de defecte dificil de formalizat algoritmic, dar necesită date reprezentative, validare și monitorizarea performanței. Digital Twin și Asset Administration Shell: AAS oferă o structură standardizată pentru reprezentarea digitală a activelor conform IEC 63278-1:2023 [5]; nici AAS, nici Digital Twin nu constituie însă o certificare universală „Industry 4.0”. Modularizarea interfețelor: arhitecturile modulare pot reduce efortul de reconfigurare atunci când interfețele mecanice, energetice, informaționale și de siguranță sunt definite riguros. Industry 5.0 completează aceste direcții prin criteriile de sustenabilitate, reziliență și centrare pe factorul uman [10].

> **În practică**
> În URS-urile beneficiarilor industriali mari, cerințele digitale pot fi obligatorii contractual, dar nu sunt identice de la un client la altul. Pot apărea: server OPC UA, exportul indicatorilor OEE, politici de cyber-security aliniate seriei IEC 62443 [6], AAS conform IEC 63278-1 [5] sau un model virtual pentru punere în funcțiune virtuală (virtual commissioning). Proiectantul trebuie să distingă între: (1) obligații legale, (2) standarde aplicabile, (3) standarde interne ale beneficiarului și (4) opțiuni tehnice. O cerință precum „Digital Twin obligatoriu" trebuie însoțită de scop, nivel de fidelitate, date, frecvență de actualizare și criteriu de acceptare; altfel rămâne ambiguă.

1.2 Taxonomia echipamentelor și arhitectura mecatronică

1.2.1 Cele cinci familii principale de echipamente

Pentru a putea trata metodologic proiectarea unui echipament concret, prima decizie pe care o ia inginerul este încadrarea într-o familie tehnologică recunoscută. Această încadrare nu este un exercițiu academic: ea determină furnizorii de componente, normele aplicabile, ordinul de mărime al investiției și competențele cerute echipei de proiectare. O presă mecanică de 800 kN și o mașină de bobinat de înaltă cadență au, în comun, doar faptul că sunt ambele echipamente industriale; restul (subsistemul dominant, complexitatea controlului, normele de siguranță aplicabile) diferă fundamental. Clasificarea după criteriul tehnologic principal, operația realizată asupra produsului, produce cele cinci familii prezentate în Figura 1.1 și sintetizate în Tabelul 1.2.

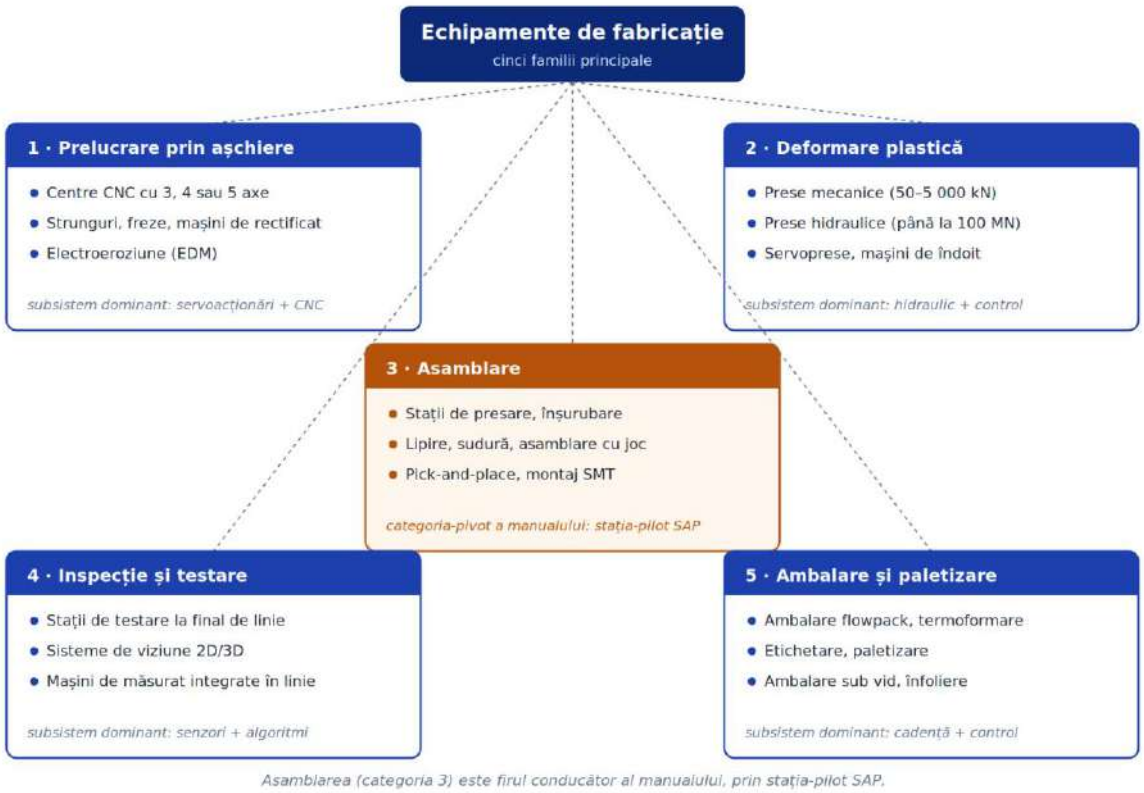


Figura 1.1. Cele cinci familii principale de echipamente de fabricație industrială. Categoria 3 (asamblare) este pivotul ilustrativ al manualului prin echipamentul de referință SAP.

Tabelul 1.2 sintetizează cele cinci familii principale de echipamente de fabricație, cu criteriile de încadrare și producătorii dominanți din fiecare categorie.

Tabelul 1.2. Cele cinci familii principale de echipamente de fabricație, criteriile de încadrare și producătorii dominanți.

Familie	Operație tehnologică	Subsistem dominant	Producători de referință
1. Prelucrare așchiere	Centre CNC 3/4/5 axe, strunguri, freze, rectificatoare, EDM	Servo-acționare + CNC controller; rigiditate mecanică	producători majori de mașini-unelte și centre de prelucrare CNC din Germania, Japonia și SUA; Doosan, Hurco
2. Deformare plastică	Prese mecanice (50–5000 kN), prese hidraulice (până 100 MN), servoprese, mașini de îndoit	Hidraulic + control de forță-cursă; protecții personal	producători majori de prese industriale și de mașini de tăiere/sudare laser din Germania, Elveția și Japonia
3. Asamblare ★	Stații de presare, înșurubare, lipire, sudură, asamblare cu interferență, pick-and-place SMT	Pneumatică + senzori + PLC; trasabilitate forță-cursă	stația-pilot SAP; producători europeni majori de mecatronică, pneumatică industrială și tehnică de prindere; ATS
4. Inspecție / testare	Stații EOL (End-of-Line), CMM integrate în linie, sisteme viziune 2D/3D, testere funcționale	Senzori și algoritmi de decizie; trasabilitate date	producători europeni și japonezi de echipamente de măsurare în proces, senzori piezoelectrici, senzori industriali și sisteme de viziune artificială; Atlas Copco
5. Ambalare / paletizare	Flowpack, termoformare, etichetare, paletizare, vacuum skin, shrink-wrap	Cadență înaltă; sincronizare multi-axă; igienă	producători europeni majori de echipamente de ambalare alimentară și farmaceutică; Sidel

Categoria 3, asamblarea, este pivotul didactic al acestui manual din trei motive. Primul: oferă o diversitate tehnologică suficient de largă pentru exersarea mai multor tipuri de decizii constructive. Al doilea: integrează simultan mecanica, electrica, subsistemele fluidice și controlul, ceea ce o face adecvată pentru exersarea proiectării interdisciplinare. Al treilea: aplicațiile de asamblare sunt relevante pentru ecosistemul industrial regional și pentru publicul țintă al cursului. Echipamentul de referință al manualului (SAP, stația automatizată de asamblare prin presare) aparține acestei categorii și este reluat ca exemplu concret în capitolele următoare.

Cele cinci familii prezentate mai sus diferă nu doar prin operația tehnologică executată, ci și prin constrângerile constructive proprii. Aceste constrângeri determină decizii fundamentale de proiectare mecanică: rigiditatea cadrului, tipul și precizia transmisiilor, izolarea vibrațiilor și sarcinile admisibile, iar ignorarea lor în faza de concept conduce la echipamente funcționale, dar nepotrivite contextului industrial. Tabelul 1.3 sintetizează pentru fiecare familie cerințele constructive dominante; valorile sunt orientative și trebuie înlocuite, într-un proiect real, cu cerințe contractuale verificabile.

Tabelul 1.3. Cerințele constructive dominante pentru cele cinci familii principale de echipamente de fabricație. Valorile sunt orientative pentru echipamente de complexitate medie și se verifică prin specificația contractuală, calcule și teste de acceptanță.

Familie de echipamente	Cerințe constructive dominante	Implicații în proiectarea mecanică
Mașini-unelte CNC	Rigiditate statică și dinamică ridicată; precizie de poziționare tipică ±0,005…0,020 mm; controlul derivației termice.	Cadru din fontă, fontă minerală sau structură sudată ranforsată; șuruburi cu bile/axe liniare; scale liniare și compensare termică.
Stații de asamblare	Repetabilitate tipică ±0,05 mm; cadență 120–600 piese/oră, în funcție de proces; cinematică simplă și accesibilitate.	Profile sau cadre sudate din oțel, ghidaje liniare, dispozitive modulare și actuatoare pneumatice/electrice.
Mașini de testare end-of-line	Izolare față de vibrațiile mediului; repetabilitate metrologică demonstrată; trasabilitate și calibrare.	Fundație sau masă izolată când este necesar, elemente de aliniere și procedură de calibrare la recepție.
Celule robotizate	Domeniu de lucru 800–2500 mm și sarcină utilă 5–200 kg, orientativ; dispozitive modulare și acces sigur.	Cadru cu trasee protejate pentru cabluri și furtunuri, interfețe standardizate și dispozitive cu schimb rapid.
Linii de paletizare	Sarcină și cadență adaptate fluxului; funcționare continuă; robustețe la variația ambalajelor.	Conveioare robuste, grippere cu vacuum sau prindere mecanică și interfețe pentru logistică internă/AMR.

Recunoașterea acestor diferențe constructive este esențială în faza de concept: alegerea unei arhitecturi de mașină-unealtă pentru o aplicație simplă de asamblare poate suprasolicita inutil bugetul, iar utilizarea unei structuri ușoare de asamblare într-o aplicație de rectificare fină poate produce piese neconforme încă din faza de ramp-up. Capitolul 3 detaliază modul în care cerințele se traduc în materiale, secțiuni, transmisii, ghidaje și sisteme de izolare.

1.2.2 Arhitectura mecatronică unificată

Sub diversitatea familiilor tehnologice se află principiul mecatronic al integrării strânse dintre mecanică, electronică/acționări și informație/control [14]. Figura 1.2 prezintă, pentru acest manual, patru macro-domenii: mecanic, electric, pneumatic/hidraulic și informație–control–siguranță. În structura detaliată a cărții, acestea sunt desfăcute în opt subsisteme: mecanic; electric; pneumatic/hidraulic; senzori și instrumentație; hardware de control; software de control; siguranță funcțională; documentație tehnică și conformitate. Împărțirea 4/8 este o convenție didactică proprie volumului, nu o taxonomie normativă. Diferența dintre o presă pneumatică simplă și un centru CNC complex este dată de ponderea, complexitatea și criticitatea acestor subsisteme și a interfețelor dintre ele.

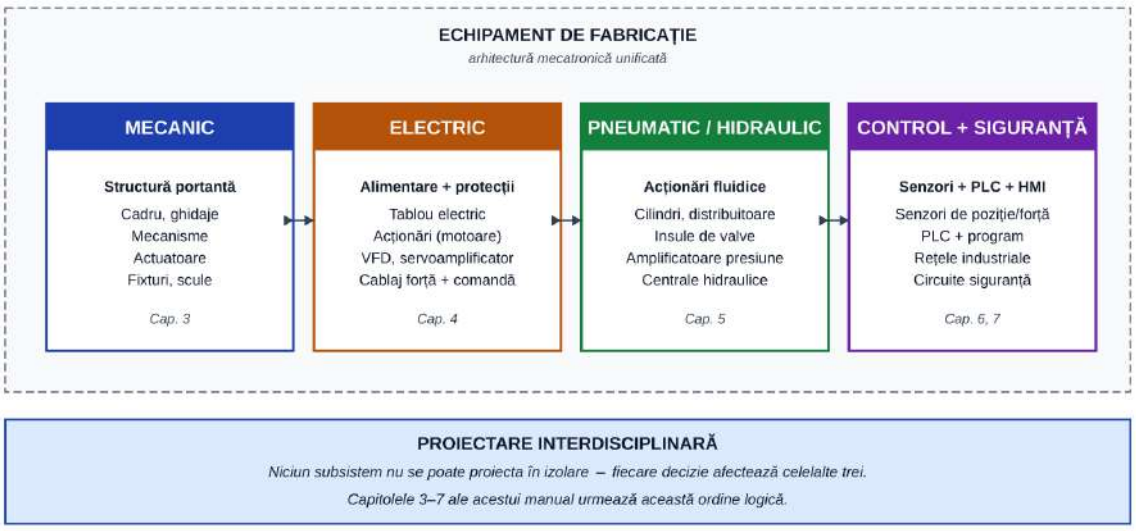


Figura 1.2. Cele patru macro-domenii funcționale ale unui echipament de fabricație și interdependența lor. În manual, acestea sunt detaliate în opt subsisteme tehnice și transversale.

Subsistemul mecanic, tratat detaliat în Capitolul 3, cuprinde structura portantă, ghidajele liniare și rotative, mecanismele de transfer și alimentare, dispozitivele de fixare și uneltele active. Funcția sa principală este să asigure rigiditatea, precizia geometrică, stabilitatea și capacitatea de încărcare necesare procesului tehnologic. Ponderea sa în costul total variază considerabil cu tipul echipamentului și trebuie estimată din BOM și din arhitectura concretă.

Subsistemul electric, tratat detaliat în Capitolul 4, cuprinde alimentarea de la rețea, protecțiile, acționările electrice, convertoarele/drive-urile și cablajul de forță și comandă. Funcția sa este să furnizeze, distribuie și controleze energia electrică necesară echipamentului. Costul se determină din puterea instalată, numărul și tipul axelor, arhitectura de protecție, tablouri, cablare și cerințele de mediu și conformitate.

Subsistemul pneumatic / hidraulic, tratat detaliat în Capitolul 5, cuprinde distribuția energiei fluidice, actuatoarele, valvele și echipamentele auxiliare asociate mașinii. Ponderea tehnică și economică depinde de numărul de funcții fluidice, forțele necesare, ciclul de lucru, infrastructura disponibilă și gradul de integrare; nu există o proporție universală aplicabilă tuturor echipamentelor.

Macro-domeniul informație, control și siguranță, detaliat în Capitolele 6–9, cuprinde senzorii și instrumentația, hardware-ul PLC/HMI, software-ul de control, rețelele industriale și părțile sistemului de comandă referitoare la siguranță. Capitolul 10 tratează transversal documentația tehnică și conformitatea. Costul acestui ansamblu se evaluează prin BOM, licențe, engineering, integrare și validare, nu prin procente generale.

> **De la patru macro-domenii la opt subsisteme**
>
> Mecanic → Capitolul 3; electric → Capitolul 4; pneumatic/hidraulic → Capitolul 5; senzori și instrumentație → Capitolul 6; hardware de control → Capitolul 7; software de control → Capitolul 8; siguranță funcțională → Capitolul 9; documentație tehnică și conformitate → Capitolul 10. Această corespondență elimină aparenta contradicție dintre schema introductivă cu patru domenii și structura detaliată a cărții.

În practică

Eroarea cea mai costisitoare în proiectarea unui echipament nou nu este, de obicei, în calculul unei componente individuale, ci în ignorarea unei interfețe între două subsisteme. Trei exemple tipice care apar repetat în practica industrială: alegerea unui motor asincron cu pornire DOL (Direct-On-Line) fără a verifica dacă tabloul electric și siguranța în amonte admit curentul de pornire de 6–8 ori curentul nominal, Capitolul 4 §4.4 detaliază; selectarea unui cilindru pneumatic cu cursă lungă fără a verifica dacă subsistemul mecanic de fixare poate prelua momentele de încovoiere generate de cursa în extensie, Capitolul 5 §5.2; programarea unei rampe de accelerare a unui servomotor fără a verifica dacă PLC-ul poate citi semnalul de feedback la rata cerută de bucla de control, Capitolul 7. Acest manual se construiește în jurul acestei observații: capitolele se citesc în ordinea în care apar dependințele cauzale (mecanic → electric → fluidic → control), iar fiecare capitol semnalizează explicit interfețele cu celelalte.

1.3 Ciclul de viață al proiectării echipamentelor

1.3.1 Cele opt etape: de la specificație la dezafectare

Un echipament industrial nu se „naște” și nu „moare” instantaneu. Între prima discuție tehnică dintre client și furnizor și momentul în care echipamentul este modernizat, dezafectat sau reciclat pot trece de la câțiva ani la decenii, în funcție de tehnologie, intensitatea utilizării și strategia proprietarului (Figura 1.3). În acest interval, echipamentul parcurge etape distincte, fiecare cu propriile documente, decizii inginerești și actori responsabili. Înțelegerea acestei structuri este importantă pentru proiectant, deoarece deciziile luate în fazele timpurii influențează costurile, performanța și posibilitățile de verificare pe întreg ciclul de viață.

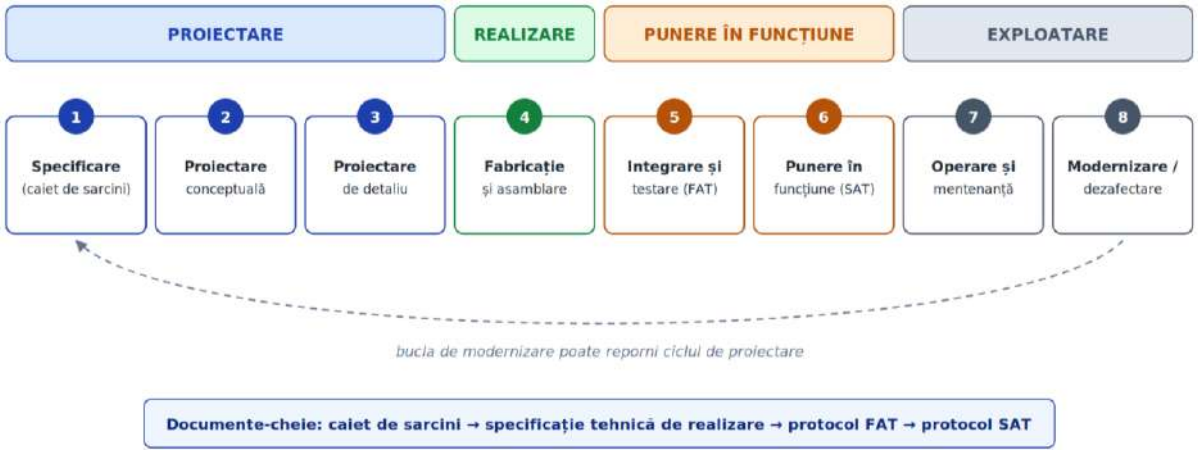


Figura 1.3. Cele opt etape ale ciclului de viață al unui echipament de fabricație, grupate în patru zone funcționale: proiectare (1–3), realizare (4), punere în funcțiune (5–6) și exploatare (7–8). Săgeata punctată de la etapa 8 către etapa 1 reprezintă reluarea ciclului prin modernizare sau retrofit.

Etapele 1–3 (Proiectare). Specificarea (1) este faza în care clientul definește ce trebuie să facă echipamentul, în limbaj funcțional, sub forma caietului de sarcini sau a unei specificații a cerințelor utilizatorului. Proiectarea conceptuală (2) este faza în care furnizorul definește cum intenționează să satisfacă cerințele: arhitectura, principiile tehnice, interfețele și estimările de cost, formalizate în specificația tehnică de realizare sau în documentația tehnică echivalentă. Proiectarea de detaliu (3) produce modelele CAD, schemele electrice și fluidice, BOM-ul, software-ul PLC/HMI și documentația de verificare.

Deciziile timpurii condiționează puternic costul modificărilor ulterioare, dar nu există un procent universal aplicabil tuturor proiectelor.

Etapa 4 (Realizare). Fabricația propriu-zisă a echipamentului include prelucrarea pieselor speciale, achiziția componentelor, montajul mecanic, cablajul electric, instalarea subsistemelor fluidice și încărcarea/configurarea software-ului. Ponderea de cost depinde de tipul proiectului. Erorile descoperite în această etapă tind să afecteze deja componente, documentație și activități de integrare și sunt, de regulă, mai costisitoare decât corecțiile efectuate în fazele timpurii.

Etapele 5–6 (Punere în funcțiune). Integrarea și testarea (5) se face la sediul OEM-ului, cu piese reale furnizate de client; succesul se constată printr-un protocol numit FAT (Factory Acceptance Test), pe care îl semnează ambele părți. Dacă FAT este OK, echipamentul se demontează parțial, se transportă la beneficiar și se reintegrează acolo, etapa de Commissioning (6), încheiată cu un protocol SAT (Site Acceptance Test) similar dar verificat în condițiile reale ale fabricii beneficiarului (alte utilități, alte cerințe de conexiune, instruirea operatorilor).

Etapele 7–8 (Exploatare). Operarea și mentenanța acoperă cea mai mare parte a ciclului de viață și pot continua de la câțiva ani la decenii, în funcție de tehnologie, intensitatea utilizării și strategia proprietarului. Modernizarea sau dezafectarea marchează fie inițierea unui nou ciclu de proiectare prin retrofit, fie scoaterea controlată din uz și gestionarea componentelor/materialelor la sfârșitul vieții.

1.3.2 Documentele-cheie: caietul de sarcini, specificația tehnică de realizare, FAT, SAT

Patru tipuri de documente structurează frecvent relația tehnică dintre client și furnizor: specificația cerințelor, specificația soluției și protocoalele de acceptanță. În practica de limbă germană, caietul de sarcini (Lastenheft) descrie cerințele beneficiarului, iar specificația tehnică de realizare (Pflichtenheft) descrie modul în care furnizorul intenționează să le satisfacă; VDI/VDE 3694:2014 oferă un reper formal pentru utilizarea acestor documente în proiectarea sistemelor de automatizare [15]. Termenul *User Requirements Specification* (URS) este apropiat funcțional de caietul de sarcini în multe proiecte, dar echivalența exactă și efectul contractual depind de organizație și contract. Conținutul, nivelul de detaliu, aprobarea și statutul de document-referință trebuie stabilite explicit pentru proiectul concret.

FAT, Factory Acceptance Test. Se desfășoară, de regulă, la furnizor înainte de transport și verifică cerințele care pot fi demonstrate în configurația de fabrică: funcții, performanțe, interblocări, documentație și, după caz, funcții de siguranță. Obiectele de test, loturile de probă, martorii, criteriile PASS/FAIL și modul de gestionare a neconformităților se stabilesc contractual. **SAT, Site Acceptance Test.** Se desfășoară la beneficiar după instalare și integrarea în utilitățile și infrastructura reală; verifică funcțiile relevante în condițiile amplasamentului și aspectele care nu puteau fi demonstrate complet la FAT. Durata, semnatarii și efectele comerciale ale acceptanței sunt specifice contractului. IEC 62381:2024 oferă un cadru formal pentru FAT/SAT/SIT în automatizarea industriilor de proces [16]; în acest manual este utilizat ca reper metodologic, nu ca standard universal pentru toate mașinile de fabricație.

1.3.3 Regula 1:10:100, economia descoperirii timpurii a erorilor

Costul remedierii unei erori de proiectare crește, de regulă, pe măsură ce proiectul avansează și sunt angajate componente, documentații, resurse de fabricație și opriri de producție. Raportul 1:10:100 este utilizat aici exclusiv ca euristică didactică pentru a face vizibilă escaladarea costului; nu este tratat ca lege exponențială, benchmark universal sau rezultat empiric atribuit unei surse unice. Valorile din Figura

1.4 sunt un scenariu relativ și trebuie recalibrate pentru fiecare organizație pe baza datelor proprii de neconformitate și change management.

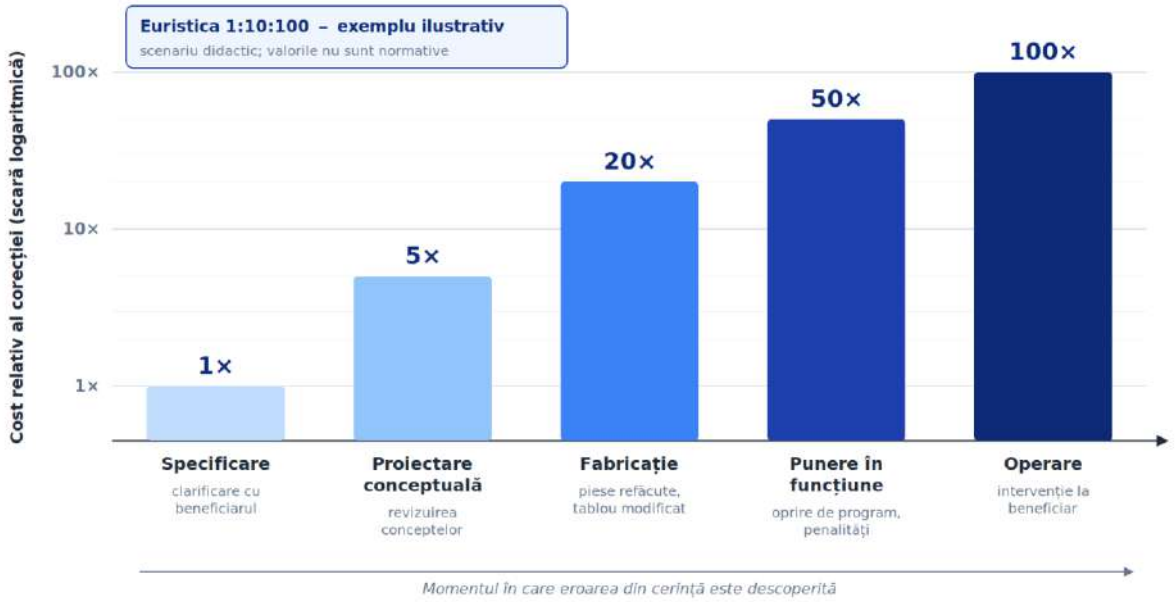


Figura 1.4. Euristica 1:10:100, exemplu ilustrativ al creșterii costului relativ de remediere pe măsură ce eroarea este descoperită mai târziu. Valorile nu sunt normative.

Numerele din grafic arată costul relativ al remedierii aceleiași erori funcționale. O cerință interpretată greșit de OEM și descoperită în timpul fazei de specificare costă, prin convenție, 1 unitate de cost (timpul a 1–2 ședințe de clarificare cu clientul). Aceeași cerință descoperită în faza de proiectare conceptuală costă 5 unități (revizuirea conceptelor, recalcularea costurilor, comunicare cu clientul). În faza de fabricație, 20 unități (refacerea pieselor mecanice, recablarea tabloului). În punere în funcțiune, 50 unități (intervenție la sediul beneficiarului, oprirea programului de fabricație, eventual penalități contractuale). În operare, 100 unități sau mai mult (intervenția costă 100×, plus pierderile de producție care pot fi colosale).

Implicația practică este alocarea suficientă de resurse fazelor de specificare și proiectare conceptuală. Efortul optim nu poate fi exprimat printr-un procent universal; el depinde de noutate, complexitate, costul modificării, criticitatea funcțiilor și maturitatea tehnologică. Valoarea metodologică a modelului V este tocmai menținerea trasabilității între cerințe, arhitectură, proiectare și verificare înainte ca deciziile costisitoare să devină greu reversibile.

În practică

La stația-pilot SAP, procesul tipic de proiect urmează schema: săptămânile 1–3, recepție URS, vizită la beneficiar, analiza cerințelor și transmitere ofertă; săptămânile 4–6, proiectare conceptuală și negocierea specificației tehnice de realizare cu clientul; săptămânile 7–14, proiectare de detaliu pe domenii; săptămânile 15–22, fabricație și asamblare; săptămânile 23–24, FAT cu beneficiarul; săptămânile 25–26, transport și SAT; lansarea producției, săptămâna 27. În acest model, peste 25 % din timpul total al proiectului este alocat fazelor inițiale, investiție recunoscută ca aducătoare a celor mai mari beneficii pe ciclul total de viață al echipamentului.

1.4 Modelul V conform VDI/VDE 2206

1.4.1 Originea și relevanța ghidului VDI/VDE 2206

Asociația Inginerilor Germani (Verein Deutscher Ingenieure, VDI), împreună cu VDE, publică ghiduri tehnice pentru dezvoltarea sistemelor inginerești. Pentru sistemele mecatronice și cyber-fizice, reperul utilizat în acest manual este VDI/VDE 2206:2021, Development of mechatronic and cyber-physical systems [1], [17]. Documentul este o Richtlinie, un ghid tehnic și un cadru logic pentru adaptarea procesului de dezvoltare, nu o lege, un standard internațional ISO/IEC sau o schemă de certificare. Articolul lui Gausemeier și Moehringer documentează contextul modelului de procedură asociat ediției timpurii VDI 2206 [18]. Aplicarea concretă necesită tailoring la contract, risc, maturitatea tehnologică și organizarea echipei.

Importanța VDI/VDE 2206 pentru proiectarea echipamentelor de fabricație este triplă. În primul rând, oferă un cadru coerent pentru dezvoltarea interdisciplinară a sistemelor în care mecanica, electricitatea, automatizarea și software-ul trebuie proiectate împreună. În al doilea rând, cadrul poate integra metode specializate precum VDI 2221/Pahl & Beitz, Axiomatic Design și MBSE, fără a le înlocui. În al treilea rând, conectează activitățile de proiectare cu integrarea, verificarea și transferul sistemului către utilizare. Pentru absolvent, competența esențială nu este memorarea unei diagrame, ci capacitatea de a adapta modelul la contract, risc, maturitatea tehnologică și organizarea echipei.

1.4.2 Structura modelului V: descompunere și integrare

Esența modelului V este reprezentarea procesului de dezvoltare printr-o ramură descendentă de definire și descompunere și o ramură ascendentă de integrare și verificare/validare. Cele opt niveluri numerotate în Figura 1.5 constituie o adaptare didactică pentru echipamentele de fabricație; ele nu trebuie interpretate ca o numerotare normativă impusă textual de VDI/VDE 2206. Valoarea modelului constă în păstrarea corespondenței dintre nivelurile de abstractizare și dovezile care demonstrează satisfacerea cerințelor.

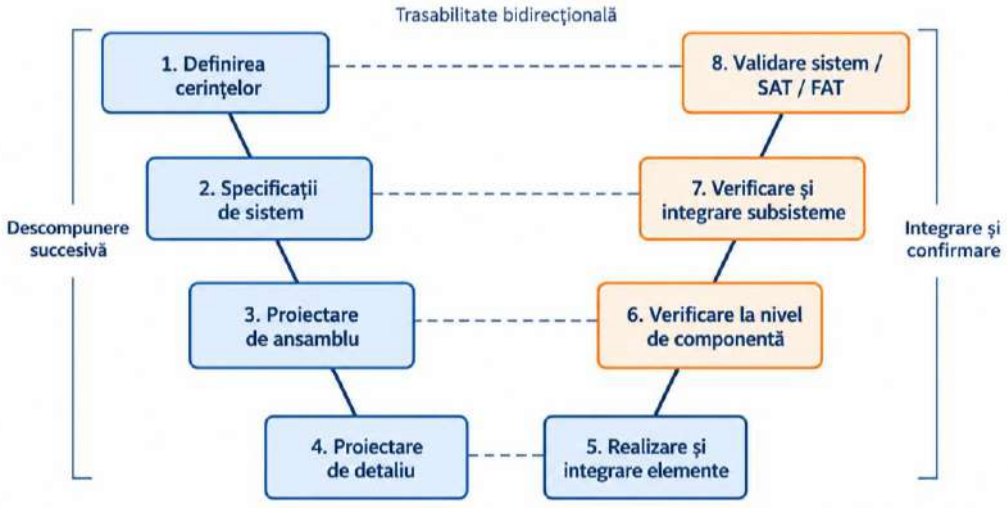


Figura 1.5. Adaptare didactică a modelului V pe opt niveluri pentru proiectarea echipamentelor de fabricație. Liniile întrerupte indică relațiile de trasabilitate dintre specificații și activitățile de verificare/validare la niveluri de abstractizare corespunzătoare. FAT și SAT sunt exemple de etape de acceptanță, nu definiții ale verificării ori validării.

Ramura descendentă: descompunere. Pornește de la nivelul 1 (cerințele de sistem: ceea ce trebuie să facă echipamentul, conținut în caietul de sarcini) și progresează prin patru niveluri tot mai detaliate. Nivelul 2, arhitectura sistemului, stabilește bloc-diagrama funcțională: ce subsisteme există, ce face fiecare, cum interacționează. Nivelul 3, proiectarea pe domenii: fiecare echipă specializată (mecanică, electrică, software) elaborează soluția proprie pentru subsistemul atribuit. Nivelul 4, proiectarea de detaliu: selecția fiecărei componente individuale, dimensionarea, BOM-ul. Nivelul 5, realizarea și integrarea elementară: fabricarea sau achiziția componentelor și asamblarea lor preliminară; verificările individuale sunt evidențiate la nivelul 6. La fiecare nivel descendent, problema globală se descompune în subprobleme mai mici, mai bine definite, dar mai numeroase.

Ramura ascendentă: integrare și verificare. Pornește de la verificarea componentelor (nivelul 6), după realizarea și integrarea elementară de la nivelul 5. Nivelul 6, verificarea la nivel de componentă, include încercări individuale și verificarea interfețelor elementare, potrivit criteriilor definite la proiectarea de detaliu. Nivelul 7, verificarea și integrarea subsistemelor, include verificarea tabloului electric, a circuitului pneumatic și a programului PLC pe banc, urmată de integrarea lor pe echipament și de încercări la nivel de sistem. FAT-ul (Factory Acceptance Test) poate furniza dovezi de acceptanță pentru configurația testată, potrivit protocolului convenit. Nivelul 8, validarea sistemului, urmărește satisfacerea nevoilor utilizatorului în condițiile definite; SAT poate furniza dovezi relevante, dar nu substituie automat întreaga validare. La fiecare nivel ascendent, sistemul recapătă complexitatea, iar verificarea sau validarea se raportează la criteriile și dovezile prevăzute în planul aprobat.

1.4.3 Principiul trasabilității bidirecționale

Principiul-cheie al modelului V este trasabilitatea dintre fiecare decizie de proiectare și dovadă prin care va fi verificată sau validată (Figura 1.6). Verificarea răspunde la întrebarea «a fost sistemul realizat conform specificației?», în timp ce validarea răspunde la întrebarea «sistemul satisface nevoia reală a utilizatorului în contextul de utilizare?». Această distincție împiedică acceptarea unui sistem care respectă formal o specificație incompletă, dar nu rezolvă problema beneficiarului.

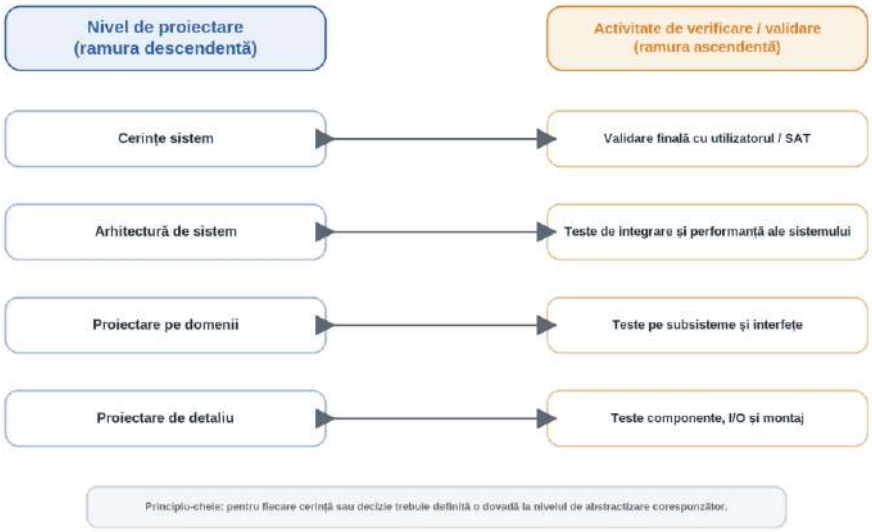


Figura 1.6. Corespondența dintre nivelurile ramurii descendente și activitățile de verificare/validare. Pentru fiecare cerință sau decizie trebuie definită o dovadă la nivelul de abstractizare corespunzător.

Implicația practică este profundă: proiectantul nu ar trebui să detalieze o cerință înainte de a înțelege cum va fi demonstrată satisfacerea ei. O cerință funcțională de tipul «echipamentul trebuie să producă

piese de calitate» nu este verificabilă. Ea trebuie reformulată, de exemplu: «echipamentul va produce piese cu rată de rebut sub 0,5 % la o cadență nominală de 120 piese/oră, evaluată pe un lot de 1.000 de piese în condițiile de referință definite». Capitolul 2 detaliază transformarea cerințelor ambigue în cerințe SMART și trasabile.

> **În practică**
>
> „Aici se pierd cele mai multe proiecte: proiectăm fără să știm cum vom verifica.” Această formulare, frecvent invocată în industria germană, surprinde sintetic problematica trasabilității bidirecționale. În practică, cele mai costisitoare eșecuri industriale de proiectare nu sunt cele tehnice (un calcul greșit, o componentă subdimensionată), ci cele de natura specificației: o cerință din URS care a fost interpretată într-un fel de OEM și în alt fel de client, descoperită abia la SAT. Modelul V previne acest tip de eșec prin obligația explicită de a defini, încă de la formularea unei cerințe, testul prin care va fi verificată.

Instrument de lucru pentru student: matrice cerință–verificare

Matricea de mai jos este un exemplu minimal. Într-un proiect real, fiecare cerință primește identificator unic, sursă, prioritate, responsabil, metodă de verificare, criteriu de acceptare și legături către elementele de proiectare. Verificarea este planificată simultan cu definirea cerinței, nu după finalizarea echipamentului.

ID	Cerință verificabilă	Metodă de verificare	Criteriu de acceptare
R-01	Cadență nominală de 120 piese/oră în condițiile definite în URS.	FAT: rulare continuă și jurnalizarea timpilor de ciclu.	Media ≤ 30 s/ciclu; fără depășiri nejustificate.
R-02	Forță de presare menținută între 5 și 8 kN.	Achiziția curbei forță–cursă cu traductor calibrat.	Curba rămâne în fereastra de proces pentru fiecare piesă.
R-03	Funcția de oprire de urgență atinge PLr stabilit prin evaluarea riscului.	Validare SRP/CS conform ISO 13849-1 și ISO 13849-2.	PL atins ≥ PLr; rezultatele sunt documentate.

1.4.4 Micro-ciclul de rezolvare a problemelor

La fiecare nivel al modelului V, atât pe ramura descendentă, cât și pe cea ascendentă, problema specifică poate fi abordată prin micro-ciclul analiză–sinteză–evaluare–decizie, repetat iterativ până la obținerea unei soluții satisfăcătoare. Figura 1.7 prezintă această structură. Micro-ciclul este aplicabil atât selecției unei componente, cât și arhitecturii globale a echipamentului.

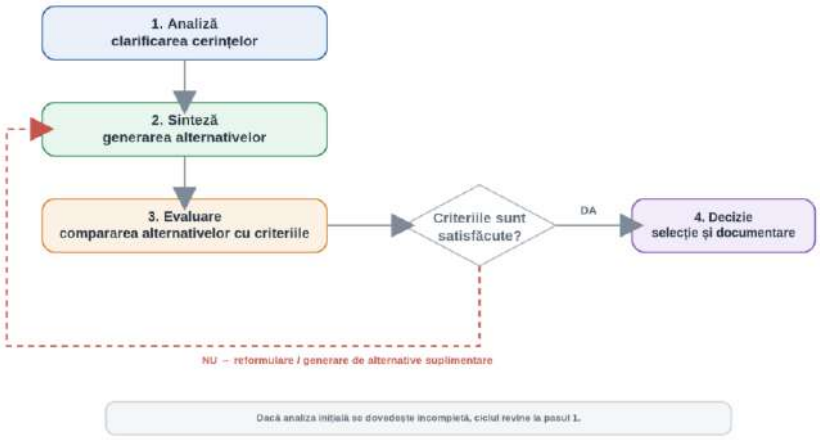


Figura 1.7. Micro-ciclul de rezolvare a problemelor: analiză, sinteză, evaluare și decizie. Iterația se reia atunci când alternativele nu satisfac criteriile sau când analiza inițială se dovedește incompletă.

Pasul 1. Analiză. Studierea problemei și clarificarea cerințelor. Inputul: cerințele primite de la nivelul superior. Outputul: o listă structurată a parametrilor cunoscuți, a parametrilor de optimizat și a constrângerilor. Pentru selecția unui motor de acționare, de exemplu, analiza identifică: parametri cunoscuți (sarcina, profilul de mișcare, mediul de lucru); parametri de optimizat (puterea, eficiența, costul); constrângeri (compatibilitatea cu VFD-ul existent, dimensiuni de gabarit, certificări).

Pasul 2. Sinteză. Generarea de soluții alternative. Inginerul produce mai multe variante candidate, fără a evalua deocamdată care este cea mai bună. Importanța acestui pas este adesea subapreciată: tendința naturală este să converg rapid la prima soluție rezonabilă; în practică, o explorare mai amplă a spațiului soluțiilor produce frecvent rezultate semnificativ mai bune. Pentru exemplul motorului: variantele candidate ar putea fi un asincron 11 kW IE3 + VFD scalar; un PMSM 7,5 kW + servoamplificator FOC; un motor sincron cu reluctanță 9 kW + VFD vector. Toate trei trebuie generate înainte de a evalua oricare.

Pasul 3. Evaluare. Compararea soluțiilor pe baza unui set de criterii ponderate. Criteriile tipice: cost de investiție, cost operațional pe ciclul de viață, performanță tehnică, mentenabilitate, compatibilitate cu standardele fabricii, disponibilitate componente. Ponderile sunt stabilite în funcție de cerințele clientului: un client cu funcționare 24/7 va pondera puternic costul operațional; un client cu producție sezonieră va pondera puternic costul de investiție. Tehnica clasică de evaluare este matricea de decizie ponderată, în care fiecare alternativă primește un scor pe fiecare criteriu și scorul total se calculează ca sumă ponderată.

> **Formalizarea matricei de decizie**
>
> Pentru alternativa j, scorul ponderat poate fi calculat cu $S_j = \Sigma(w_i \cdot s_{ij})$, unde $w_i \geq 0$, $\Sigma w_i = 1$, iar s_{ij} este scorul alternativei j pentru criteriul i. Ponderile și scara de notare trebuie documentate; analiza de sensibilitate verifică dacă soluția selectată rămâne aceeași la variații rezonabile ale ponderilor.

Pasul 4. Decizie. Selectarea soluției optime și documentarea rațiunii. Deciziile de proiectare trebuie documentate explicit: nu doar soluția finală, ci și alternativele considerate, criteriile aplicate și ponderile lor. Această documentare are două funcții: trasabilitatea (în caz de revizuire ulterioară, se poate reconstrui rațiunea originală) și transferul de cunoștințe (un alt inginer care preia proiectul poate înțelege deciziile fără să refacă analiza). În practica modernă, deciziile de proiectare se înregistrează în „Decision Records” sau „Architecture Decision Records” (ADR), documente structurate de 1 pagină per decizie majoră.

Iterarea micro-ciclului este normală: dacă evaluarea arată că niciuna dintre soluțiile sintetizate nu satisface criteriile, ciclul se reia de la sinteză sau, atunci când ipotezele inițiale sunt insuficiente, de la analiza problemei și clarificarea cerințelor. Nu există un număr universal „acceptabil” de iterații. Repetarea fără convergență este, însă, un semnal că trebuie revizuite formularea problemei, criteriile, interfețele sau cerințele de nivel superior.

1.4.5 VDI/VDE 2206:2004 vs. 2021: extensia la sisteme cyber-fizice

Ediția din 2004 a VDI 2206 a fost orientată către dezvoltarea sistemelor mecatronice. VDI/VDE 2206:2021 extinde explicit cadrul către sisteme mecatronice și cyber-fizice și formulează un cadru mai larg pentru dezvoltarea interdisciplinară [1]. Comparația din Tabelul 1.4 trebuie citită ca sinteză didactică: ghidul nu impune protocoale precum OPC UA sau MQTT și nu declară Digital Twin-ul obligatoriu; aceste elemente apar numai dacă sunt derivate din cerințele proiectului și din standardele aplicabile.

Tabelul 1.4. Comparație didactică între edițiile 2004 și 2021 ale VDI/VDE 2206.

Aspect	VDI 2206:2004	VDI/VDE 2206:2021
Domeniu de aplicare	Dezvoltarea sistemelor mecatronice.	Dezvoltarea sistemelor mecatronice și cyber-fizice mecatronice (CPMS).
Rolul software-ului	Parte integrată a sistemului mecatronic, tratată în raport cu domeniile fizice.	Accent sporit pe caracterul interdisciplinar, modelele digitale și interacțiunea dintre domenii.
Conectivitate	Contextul de rețea nu reprezintă tema centrală a ediției.	Contextul CPMS impune definirea interfețelor și a mediului digital; protocoalele concrete provin din cerințe.
Cybersecurity	Nu este tratată ca domeniu metodologic distinct.	Trebuie introdusă prin cerințe și analiza riscurilor; IEC 62443 rămâne referința tehnică specifică, nu VDI/VDE 2206.
Adaptare/iterație	Model de procedură adaptabil, nu proces strict liniar.	Cadru extins și explicit adaptabil; poate integra practici iterative sau agile, în special pentru software.
Digital Twin	Nu este cerință explicită.	Modelele digitale pot susține punere în funcțiune virtuală (virtual commissioning) și Digital Twin, dar nu sunt obligatorii pentru orice proiect.
Structura procesului	Model V și ciclu de rezolvare a problemelor.	Model V extins, activități de bază și module de proces adaptabile proiectului.

Pentru proiectele inițiate în 2026, VDI/VDE 2206:2021 este ediția utilizată în acest manual ca reper metodologic [1]. Aplicarea să nu este obligatorie prin lege și nu înlocuiește standardele de produs, de siguranță sau de cybersecurity. Software-ul, conectivitatea, AAS, punerea în funcțiune virtuală (virtual commissioning) și Digital Twin trebuie introduse numai atunci când sunt relevante și formulate ca cerințe verificabile; pentru cybersecurity și AAS se utilizează standardele de specialitate IEC 62443 și IEC 63278 [6], [5].

1.5 Abordări complementare de proiectare

VDI/VDE 2206 nu este singurul cadru relevant pentru proiectarea sistemelor inginerești. Trei abordări complementare sunt utilizate în acest capitol pentru scopuri diferite: Pahl & Beitz / VDI 2221 pentru proiectarea sistematică a produselor, Axiomatic Design al lui Nam P. Suh pentru analiza relației dintre cerințe funcționale și parametri de proiectare și Model-Based Systems Engineering (MBSE) cu SysML pentru modelarea formală și trasabilitate. Ele nu sunt tratate ca alternative mutual exclusive, ci ca instrumente care pot fi combinate în funcție de subproblema de proiectare.

1.5.1 Pahl & Beitz / VDI 2221: proiectarea mecanică clasică

Manualul Engineering Design: A Systematic Approach al lui Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz, Jörg Feldhusen și Karl-Heinrich Grote este o lucrare de referință pentru proiectarea sistematică. Ediția a 3-a în limba engleză a fost publicată de Springer în 2007 [19]. VDI 2221 Blatt 1:2019 formulează un model de dezvoltare pentru produse și sisteme tehnice [2]. În lectura didactică adoptată aici, activitatea este structurată prin clarificarea sarcinii, proiectarea conceptuală, proiectarea de ansamblu și proiectarea de detaliu, cu evaluări și iterații între etape.

Pahl & Beitz și VDI 2221 oferă o descompunere metodică utilă pentru dezvoltarea soluțiilor și detalierea constructivă [19], [2], în timp ce VDI/VDE 2206 oferă cadrul interdisciplinar și relația dintre dezvoltare, integrare și verificare [1]. În acest manual, V-modelul este folosit ca schelet global pentru echipamente mecatronice, iar metodele Pahl & Beitz sunt utilizate în subproblemele de proiectare constructivă. Corespondențele dintre etapele celor două abordări sunt orientative și servesc organizării didactice, nu reprezintă o corespondență normativă biunivocă.

1.5.2 Axiomatic Design (Nam P. Suh, MIT)

Nam P. Suh a formulat în lucrarea *The Principles of Design* (Oxford University Press, 1990) teoria Axiomatic Design, bazată pe două axiome fundamentale [20]. Spre deosebire de metodologiile care structurează succesiunea activităților de proiectare, Axiomatic Design oferă criterii pentru examinarea relației dintre cerințele funcționale și parametrii de proiectare și pentru compararea soluțiilor fezabile.

Axioma 1. Independența. Cerințele funcționale (FR, Functional Requirements) trebuie formulate astfel încât să poată fi satisfăcute independent. Relația locală {FR} = [A] × {DP} exprimă influența parametrilor de proiectare (DP, Design Parameters) asupra cerințelor funcționale. O matrice diagonală descrie un proiect necouplat (uncoupled); o matrice triunghiulară poate descrie un proiect decuplat (decoupled), dacă DP sunt stabilite în ordinea adecvată. O matrice generală cu interdependențe care nu pot fi eliminate prin ordonare descrie un proiect cuplat (coupled) [20]. Prezența mai multor elemente nenule într-o linie nu demonstrează singură încălcarea axiomei: trebuie analizate structura matricei și ordinea deciziilor. Pentru SAP de referință, forța de presare este controlată de axa electrică Z, iar poziționarea și fixarea de dispozitivul CL1/CL2; influențele reciproce prin deformarea structurii și a dispozitivului trebuie evaluate, nu presupuse inexistente.

Axioma 2. Informația minimă. Dintre soluțiile fezabile care respectă axioma independenței se examinează conținutul informațional al satisfacerii cerințelor: $I = -\log_2 P(\text{succes})$, în cadrul unui model probabilistic explicit [20]. Pentru cerințe independente se poate agrega conținutul informațional al acestora în condițiile ipotezelor modelului. Numărul de componente, toleranțele și numărul de reglaje pot afecta indirect probabilitatea succesului, dar nu definesc singure conținutul informațional; simplitatea constructivă rămâne un criteriu practic distinct. Pentru SAP, compararea presării electrice Z cu alternativa ALT–PNEU necesită în prealabil verificarea cerințelor, a independenței funcțiilor și a datelor privind capabilitatea procesului. Nu rezultă automat că varianta pneumatică este preferabilă numai pentru că are mai puține reglaje.

1.5.3 Model-Based Systems Engineering (MBSE) cu SysML

Model-Based Systems Engineering (MBSE) este o abordare în care modelele devin surse coerente de informații pentru specificare, analiză, proiectare, verificare și validare, în loc ca informația să fie dispersată exclusiv în documente independente. MBSE nu elimină automat caietul de sarcini, specificația tehnică de realizare sau documentația contractuală; relația dintre model și documentele contractuale trebuie definită prin procesul proiectului. INCOSE descrie MBSE în cadrul mai larg al systems engineering [21]. Pentru continuitate pedagogică, cartea utilizează și concepte familiare SysML v1.x, iar SysML v2.0 este tratat ca generația curentă a limbajului OMG, cu semantică și infrastructură de modelare revizuite [22].

Pentru introducerea didactică din acest manual sunt utilizate categorii familiare din SysML v1.x: diagrame de cerințe, diagrame structurale (BDD și IBD), diagrame de comportament și diagrame

parametrice [23]. Diagramele de cerințe pot reprezenta relațiile dintre cerințe și elementele modelului; BDD și IBD descriu structura și interfețele; diagramele de comportament reprezintă stări, activități și interacțiuni; diagramele parametrice exprimă constrângeri și relații cantitative. GRAFCET nu este un caz particular de SysML, ci un limbaj distinct pentru specificarea funcțională a părții secvențiale a unui sistem de comandă, standardizat prin IEC 60848:2013 [24]. SysML v2 modifică limbajul și infrastructura de modelare, dar obiectivul de trasabilitate între cerințe, arhitectură și verificare rămâne relevant [22].

1.5.4 Combinarea metodologiilor în practica industrială

Tabelul 1.5 sintetizează caracteristicile celor patru metodologii pe cinci criterii relevante pentru proiectarea echipamentelor de fabricație. Niciuna dintre metodologii nu este universal superioară: fiecare are o zonă de aplicabilitate optimă.

Tabelul 1.5. Comparație sintetică între patru abordări utilizate în proiectarea sistemelor inginerești.

Criteriu	VDI/VDE 2206 (model V)	Pahl & Beitz / VDI 2221	Axiomatic Design (Suh)	MBSE (SysML)
Focus principal	Sisteme mecatronice și cyber-fizice.	Dezvoltarea metodică a produselor și sistemelor tehnice.	Calitatea relației dintre cerințe funcționale și parametri de proiectare.	Modele coerente pentru sisteme complexe interdisciplinar.
Nivel de aplicare	Cadru macro și activități iterative.	Proces de dezvoltare și metode de lucru pe faze.	Principii de evaluare a arhitecturii.	Reprezentarea formală și trasabilitatea informațiilor.
Verificare/validare	Legată explicit de nivelurile de specificare și integrare.	Evaluări în fiecare fază; verificarea finală depinde de planul proiectului.	Analiza cuplării și a conținutului informațional.	Trasabilitate continuă și verificări automate atunci când modelul și instrumentele permit.
Efort de aplicare	Mediu; necesită tailoring și disciplină de proiect.	Scăzut–mediu, în funcție de complexitate.	Conceptual simplu, dar dificil în sisteme cu multe FR/DP.	Mediu–ridicat; necesită limbaj, instrumente, guvernanță și managementul configurației.
Utilizare tipică (orientativ)	Cadru metodologic pentru proiecte mecatronice și cyber-fizice.	Dezvoltare metodică a produselor și subproblemelor constructive.	Analiza independenței funcționale și a conținutului informațional.	Modelarea sistemelor complexe, trasabilitate și integrare interdisciplinară.

În practică

Un scenariu metodologic coerent pentru un proiect SPM este combinarea selectivă a celor patru abordări, fără a presupune că această combinație este obligatorie sau universală. VDI/VDE 2206 poate furniza cadrul global de la cerințe la integrare și verificare [1]; Pahl & Beitz/VDI 2221 pot structura subproblemele de proiectare constructivă [19], [2]; axiomele lui Suh pot fi utilizate pentru examinarea cuplării dintre cerințe și parametrii de proiectare [20]; iar MBSE/SysML poate susține modelarea și trasabilitatea informației [21]–[23]. Pentru student, obiectivul nu este aplicarea simultană a tuturor metodelor, ci alegerea justificată a instrumentului potrivit pentru problema analizată.

1.6 Studiu de caz integrat: SAP, stație automatizată de asamblare prin presare

1.6.1 Conceptul didactic și contextul industrial

SAP este un concept original elaborat pentru această carte pornind de la funcția industrială de presare axială a unui tub într-o carcasă. Produsul de referință este ansamblul tub–carcasă; materialele, diametrele, lungimea de contact, rugozitatea și toleranțele ajustajului cu strângere sunt încă de definit prin model CAD și justificare tehnologică. Stația descrisă aici nu este un utilaj comercial identificabil, iar fotografiile și schemele provenite de la terți nu constituie documentația ei de execuție.

Fișa de referință PEF–SAP–BASE–001 stabilește arhitectura propusă: o singură axă electrică Z de presare, două funcții pneumatice de fixare CL1/CL2, măsurarea forței și deplasării, PLC/HMI și protecții/funcții safety rezultate din evaluarea riscului. Pentru exemple se adoptă provizoriu o forță maximă de proiectare de 8 kN și un scenariu de cadență de 120 ansambluri/oră (30 s/ciclu). Valorile nu sunt performanțe demonstrate. Cursa, viteza, geometria produsului, domeniul traductorului, bugetul de toleranțe, PLr și criteriile de calitate se stabilesc prin proiectare și verificare. Datele economice, duratele de livrare și cadența de 360 ansambluri/oră apar doar în exerciții/variante explicit separate; în carte nu se declară conformitate CE sau acceptanță FAT/SAT realizată pentru acest concept.

1.6.2 Componentele mecatronice ale SAP

SAP integrează structura portantă și dispozitivul de poziționare, axa electrică Z de presare, fixarea pneumatică CL1/CL2, senzorii și instrumentația, PLC/HMI, alimentarea electrică și măsurile de protecție. Figura 1.8 prezintă conceptual subsistemele acestei configurații. Alimentarea și evacuarea automatizate reprezentate ilustrativ sunt opțiuni de integrare; mecanismele și interfețele lor vor fi definite în proiectare, fără a fi atribuite automat configurației de bază.

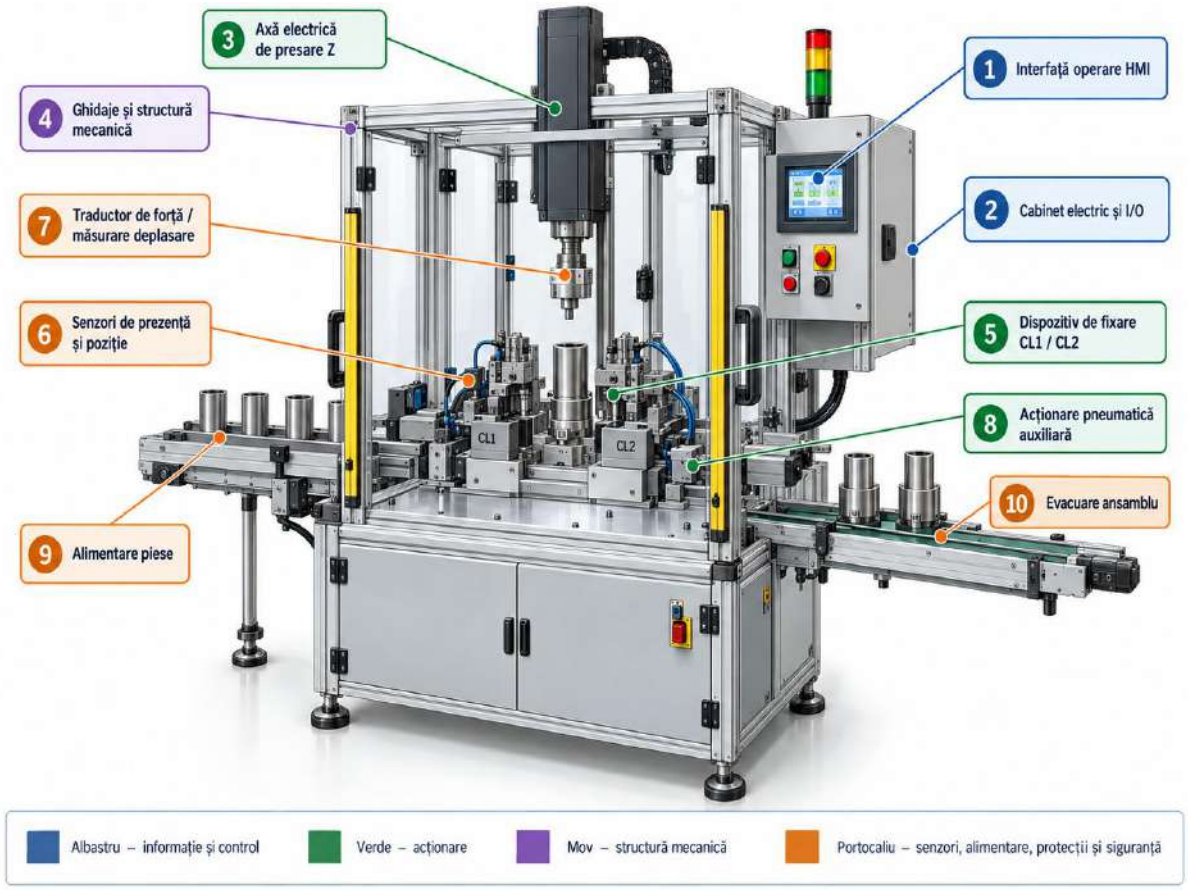


Figura 1.8. Componentele mecatronice ale stației SAP: axă electrică Z pentru presare, fixare pneumatică CL1/CL2 și integrarea controlului, instrumentației și protecțiilor. Reprezentare conceptuală; alimentarea/evacuarea automate sunt ilustrative, iar geometria și performanțele rămân de definit.

Pentru SAP de referință se reține: (1) sistemul portant cu traseu de forță închis; (2) reazemele și dispozitivul de poziționare a tubului și carcasei; (3) două funcții pneumatice de fixare CL1/CL2 cu confirmări; (4) o singură axă electrică Z cu ghidare și mecanism liniar dimensionat pentru presare; (5) măsurarea forței și deplasării, cu traductor selectat pentru intervalul de proiectare și suprasarcina admisibilă; (6) senzori de prezență și stare; (7) PLC, I/O și HMI; (8) distribuția electrică și circuitul pneumatic al mașinii; (9) dispozitivele de protecție și funcțiile safety stabilite prin evaluarea riscului; (10) datele ciclului, rețeta și rezultatul OK/NOK dacă sunt cerute pentru trasabilitate. Alimentarea/evacuarea automată și alte accesorii ilustrate în figura conceptuală sunt opțiuni care se definitivează în proiectare; presarea pneumatică sau hidraulică rămâne variantă ALT distinctă.

Componentele mecatronice introduse mai sus sunt clasificate funcțional, dar pentru proiectant devin operaționale numai prin specificații constructive: materiale, dimensiuni, toleranțe, interfețe, clase de protecție și criterii de acceptare. Aceste decizii, detaliate în Capitolul 3 și corelate cu fiabilitatea, integrarea și monitorizarea digitală în Capitolele 11–13, definesc identitatea fizică a SAP. Tabelul 1.6 sintetizează deciziile constructive cheie și introduce verificări dimensionale care permit studentului să controleze consistența numerică a arhitecturii.

Tabelul 1.6. Decizii constructive și ipoteze ale configurației SAP de referință. Cadența de 120 ansambluri/oră și forța maximă de 8 kN sunt scenarii preliminare; componentele concrete și criteriile de acceptare necesită calcul și dovezi.

Decizie constructivă	Arhitectura SAP de referință (B/H/TBD)	Detaliere și criteriu de verificare
Cadru portant	Cadru portant cu traseu de forță închis; materialul, secțiunile și masa sunt TBD din calcule și CAD.	Rigiditatea și deformația admisibilă se alocă din bugetul de toleranțe; verificare analitică/FEM și apoi măsurare numai dacă există prototip.
Cinematică principală	O singură axă Z electrică pentru apropiere și presare axială; cursă utilă și profil din produs și ciclogramă (TBD).	Cinematica simplă reduce riscul de coliziune și complexitatea controlului; secvența este interblocată.
Actuator de presare	Servomotor + mecanism liniar (de exemplu șurub cu bile), dimensionate pentru profilul F–z și ipoteza $F_{max,design}$ = 8 kN.	Calcul cuplu $T \approx F \cdot p/(2\pi \cdot \eta)$ și verificare vârf/RMS, dinamică, randament, suprasarcină, rigiditate, frânare și compatibilitatea mecanismului.
Ghidaj liniar	Ghidaje și sistem de feedback adecvate axei Z; clasa, preîncărcarea și repetabilitatea se selectează după cerința de produs (TBD).	Precizia procesului include și dispozitivul de fixare, rigiditatea și piesa; sarcina și durata de viață se verifică din catalog și prin calcul.
Senzori esențiali	Prezență tub/carcasă, confirmări CL1/CL2, poziție Z și traductor de forță cu domeniu >8 kN și rezervă la suprasarcină; alegerea este TBD.	Poziția este confirmată discret, iar curba forță–cursă este achiziționată și corelată cu piesa.
Sistem de control	PLC/I/O și HMI, cu drive servo compatibil; interfețele și funcțiile safety sunt definite în proiect.	Timpul de scanare PLC nu derivă direct din timpul de ciclu; achiziția dinamică a forței poate necesita modul dedicât și rată de eșantionare superioară.
Siguranță	Safeguarding și funcții safety de stabilit prin evaluarea riscului; nu se atribuie PLr/cortină înaintea analizei.	PLr se determină și PL atins se verifică la nivelul funcției de siguranță, conform ISO 13849-1:2023 [3]; rezultatul nu este o proprietate a unei componente izolate.
Izolarea vibrațiilor și fundația	Patru elemente elastomerice între cadru și pardoseală, dacă analiza dinamică indică necesitatea.	Reduc transmiterea vibrațiilor și permit nivelarea; selecția se bazează pe masă, frecvențe și rigiditatea pardoselii.

EXEMPLU COMPARATIV ALT–PNEU: forța cilindrului

Pentru p = 30 bar = 3,0 MPa și diametrul D = 63 mm, aria pistonului este $A = \pi D^2/4 \approx 3{,}117 \times 10^{-3}$ m^2, iar forța teoretică este $F = pA \approx 9{,}35$ kN. Forța utilă trebuie redusă cu pierderile, frecările și marja de proiectare. Exemplul arată de ce cilindrul pneumatic Ø50 mm la 5 bar nu poate genera 9,8 kN: forța sa teoretică este numai aproximativ 0,98 kN.

Scenariul 120 ansambluri/oră corespunde unui tact nominal de 30 s/ciclu. Forța maximă ipotetică de 8 kN constituie intrare pentru dimensionarea axei electrice, a reazemelor, a structurii și a traductorului; forța efectivă de asamblare trebuie determinată din geometrie, ajustaj, materiale și încercări. Cursa utilă, repetabilitatea, rata de achiziție, fereastra forță–deplasare și funcțiile safety nu se deduc automat din această valoare și rămân de definit și verificat. În sensul ISO 13849-1:2023, nivelul de performanță se demonstrează la nivelul funcției de siguranță și al SRP/CS aferent, nu prin simpla alegere a unui PLC sau F-CPU [3].

1.6.3 Ciclul de asamblare: descriere Grafcet

IEC 60848:2013 oferă cadrul GRAFCET pentru specificarea funcțională a comportamentului secvențial [24]. Figura 1.9 prezintă secvența conceptuală SAP cu nouă etape S0–S8: disponibil, încărcare/detectare, fixare CL1/CL2, apropiere pe Z, presare electrică și achiziție F–z, evaluare OK/NOK, retragere Z, eliberare și descărcare. Receptivitățile reprezintă condiții funcționale de principiu; semnalele exacte, temporizările, tratarea defectelor și recuperarea se stabilesc în proiectarea de detaliu.

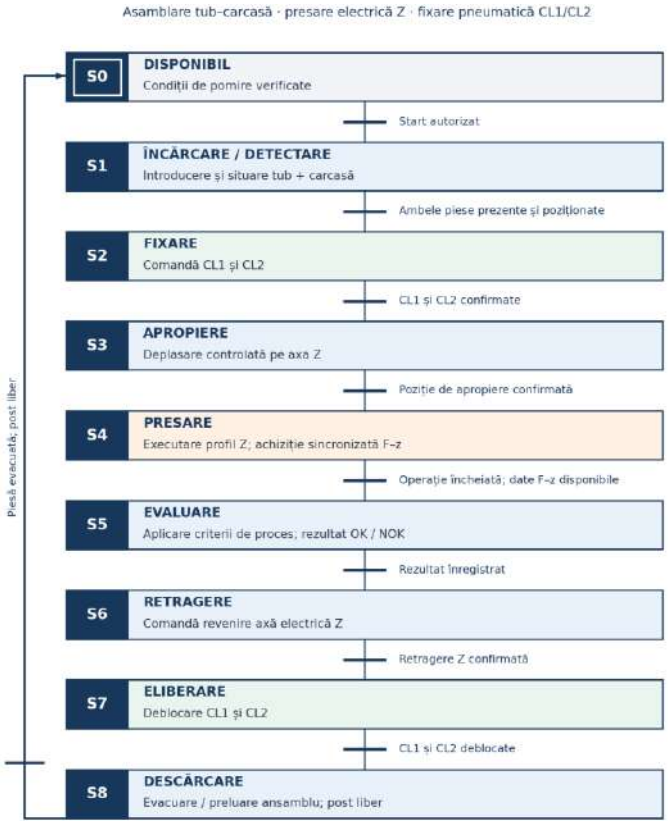


Figura 1.9. Secvență GRAFCET conceptuală a ciclului SAP, S0–S8: presare pe axa electrică Z, fixare pneumatică CL1/CL2 și evaluare F–z. Tranzițiile, reacțiile la defect și funcțiile de siguranță se detaliază și se verifică separat.

Ciclul conceptual pornește din starea disponibilă, după verificarea condițiilor de pornire. Tubul și carcasa sunt introduse și situate, iar prezența lor este confirmată. Funcțiile pneumatice CL1/CL2 fixează piesele; confirmarea ambelor fixări permite apropierea pe axa electrică Z, urmată de presare și achiziția sincronizată a semnalelor de forță și deplasare. După încheierea presării, evaluarea criteriilor de proces produce un rezultat OK/NOK, înregistrat înainte de retragerea axei Z. Numai după confirmarea retragerii se comandă eliberarea fixărilor și descărcarea ansamblului, iar postul liber permite revenirea în S0. Criteriile de acceptare sunt TBD; funcțiile safety și recuperarea după defect sunt specificate separat, în baza evaluării riscului.

1.6.4 Modelul V aplicat pe SAP: sinteză

Aplicarea modelului V pe SAP urmărește opt niveluri didactice. La nivelul cerințelor sunt definite operația tub–carcasă, scenariile H de forță și cadență, funcția de verificare F–z și datele de trasabilitate solicitate. Arhitectura alocă presarea unei singure axe electrice Z, fixarea cilindrilor pneumatici CL1/CL2, măsurarea senzorilor adecvați și secvența unui PLC/HMI. Proiectarea pe domenii determină structura, transmisia, pneumatica auxiliară, instrumentația, I/O și protecțiile din evaluarea riscului. Selecția componentelor și BOM-ul se definitivează după calcule și compatibilitatea interfețelor. Pe ramura ascendentă se planifică verificări pe componente, integrare, FAT și SAT; fără rezultate documentate nu se afirmă că aceste teste au fost trecute.

Exemplul rezolvat 1.1. Lectură critică a unui fragment URS

Enunț. Inginerul de proiectare al stației-pilot SAP primește următorul paragraf într-un caiet de sarcini real al unui client industrial: „Stația trebuie să fie fiabilă și să producă piese de calitate. Viteza de producție trebuie să fie cât mai mare posibil. Costul total trebuie să fie rezonabil, iar mentenanța să fie ușoară.” Cerința este, în această formulare, neverificabilă: niciun element nu poate fi măsurat obiectiv, motiv pentru care, conform principiului trasabilității bidirecționale din modelul V (§1.4.3), nu poate fi acceptată. Sarcina inginerului este să transforme acest paragraf în cerințe SMART (Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound), prin negocierea cu clientul pe baza datelor reale ale fabricii.

Pasul 1. Identificarea termenilor non-verificabili. „Fiabilă”: fără valoare numerică. „Calitate”: nedefinit operațional. „Cât mai mare posibil”: fără limită superioară. „Rezonabil”: subiectiv. „Ușoară”: calitativ, nu cantitativ. Toți cei cinci termeni cheie din cerință sunt non-verificabili.

Pasul 2. Întrebări de clarificare. Inginerul se prezintă la beneficiar cu o listă de întrebări concrete: care este MTBF (Mean Time Between Failures) acceptabil? cum se măsoară „calitatea”, rebut <X%? abateri dimensionale <Y mm? toleranțe pe forță? care este cadența țintă? există o limită superioară (ex. 200 piese/oră) dincolo de care alte costuri devin dominante? care este bugetul-țintă? care este durata maximă acceptabilă de intervenție de mentenanță în caz de defect? Clientul răspunde cu valori concrete extrase din planul de producție.

Pasul 3. Reformularea SMART. Cerința inițială se transformă în patru cerințe verificabile: (1) Stația va avea o țintă MTBF ≥ 1.500 ore în condiții normale de operare; demonstrarea se va realiza printr-un plan de fiabilitate convenit contractual, pe baza datelor cumulate de exploatare, iar primele 6 luni post-SAT vor furniza datele inițiale. (2) Stația va produce piese cu rebut <0,5 % și |abatere dimensională a tubului presat| ≤ 0,02 mm, măsurat pe loturi de 1.000 piese consecutive. (3) Cadența nominală 120 piese/oră ±5 %, garantată în condițiile de funcționare descrise în Anexa A a contractului (presiune aer 6,0 ±0,5 bar, temperatură 18–28 °C, alimentare manuală cu piese). (4) Timpul maxim de oprire pentru o intervenție corectivă tipică (înlocuire cilindru, schimbare senzor) ≤30 minute, garantat prin design modular. Buget-țintă: 95.000 € livrat la sediu.

Concluzie. Cerințele reformulate sunt acum verificabile: fiecare are o valoare numerică, o metodă de măsurare și un context aplicabil. Această reformulare nu este o formalitate birocratică, ci substanța proiectării sistematice: fără ea, un proiect bine intenționat poate eșua complet la SAT pentru că niciuna dintre părți nu are același înțeles al „calității” sau „fiabilității”. Capitolul 2 al manualului tratează detaliat tehnicile de elicitare a cerințelor și de transformare în formă SMART.

1.7 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos consolidează aplicativ conceptele introduse în capitol. Cinci dintre ele pleacă de la situații industriale plauzibile întâlnite în firmele SPM din clusterul auto românesc; ele permit cititorului să exerseze gândirea sistematică pe care o cere proiectarea modernă a echipamentelor de fabricație, înainte de a aborda subsistemele individuale tratate în capitolele următoare.

Problema 1.1. Identificarea subsistemelor mecatronice

La o vizită de teren la fabrica unui mare producător european de electronică auto din Sibiu, inginerul-stagiar primește spre analiză o stație de inspecție end-of-line a senzorilor de presiune din anvelope (TPMS, Tire Pressure Monitoring System). Stația realizează: (a) preluarea senzorului de pe o paletă de transfer prin dispozitiv de prindere (gripper) pneumatic; (b) plasarea senzorului într-un dispozitiv (nest) de testare cu contacte electrice; (c) testarea funcțională (alimentare, citirea protocolului radio, verificarea presiunii de calibrare); (d) marcarea piesei OK/NOK; (e) returnarea piesei pe paletă într-una din două zone (OK / NOK).

De rezolvat: (a) Identificați cele patru subsisteme funcționale (mecanic, electric, pneumatic, control + siguranță) și componentele specifice fiecăruia conform §1.2.2. (b) Estimați ponderea relativă de cost a fiecărui subsistem pentru o astfel de stație. (c) Argumentați care este subsistemul dominant în această aplicație și de ce.

Răspuns. (a) Mecanic: cadrul, paleta de transfer și dispozitivul ei de poziționare, gripperul, nest-ul de testare cu elementele de centrare, mecanismul de sortare OK/NOK. Pneumatic: gripperul, cilindrii de transfer și de închidere a nest-ului, insula de valve, tratarea aerului. Electric: alimentarea și protecțiile, alimentarea senzorului testat prin contactele nest-ului, unitatea de marcare. Control și siguranță: PLC, echipamentul de test RF și de verificare a presiunii, HMI, legătura cu MES, apărătorile interblocate și oprirea de urgență. (b) Ponderile depind de proiect; ca ordin de mărime didactic, testul și controlul pot reprezenta 35–45 % din cost, mecanica 30–40 %, iar pneumatica și partea electrică câte aproximativ 10–15 %. Valorile se înlocuiesc cu oferta reală. (c) Subsistemul dominant este cel de test și control: funcția principală a stației este măsurarea, iar celelalte subsisteme servesc la poziționarea repetabilă a piesei pentru test.

Problema 1.2. Plasarea unei activități pe modelul V

Considerăm o stație de înșurubare din industria auto cu cadență 240 înșurubări/oră, dotată cu controler de cuplu Atlas Copco și transmisie de date de diagnoză către MES-ul fabricii prin OPC UA. Pe parcursul ciclului de viață al echipamentului, urmează să aibă loc următoarele activități: (1) clientul precizează cuplurile-țintă cerute de specificația tehnică a piesei; (2) departamentul software al furnizorului scrie programul PLC; (3) FAT-ul include un test de 1.000 înșurubări consecutive cu măsurarea cuplului efectiv; (4) inginerul de mentenanță elaborează lista de piese de schimb; (5) clientul cere modificarea programului PLC pentru o variantă nouă de produs (retrofit minor); (6) la achiziția controlerului de cuplu, se compară 3 oferte și se alege Atlas Copco; (7) protocolul SAT este semnat de inginerul șef al beneficiarului.

De rezolvat: Plasați fiecare dintre cele șapte activități pe nivelurile modelului V conform Figurii 1.5. Identificați activitățile aparținând ramurii descendente, ramurii ascendente și ciclului de modernizare (etapa 8 din Figura 1.3). Argumentați alocarea pe baza definițiilor din §1.4.2.

Răspuns. Ramura descendentă: (1) definirea cuplurilor-țintă aparține nivelului cerințelor de sistem (caiet de sarcini); (6) compararea ofertelor și alegerea controlerului de cuplu aparține proiectării pe domenii și de detaliu. Baza modelului V: (2) scrierea programului PLC este implementare. Ramura ascendentă: (3) testul de 1.000 de înșurubări este verificarea la integrarea sistemului, în cadrul FAT; (7) semnarea SAT închide validarea la beneficiar. (4) Lista de piese de schimb se elaborează în proiectarea de detaliu și se predă la handover, ca parte a documentației de exploatare. (5) Modificarea programului

pentru o variantă nouă aparține ciclului de modernizare (etapa 8) și reia un V redus: cerere de modificare, analiză de impact, implementare și reverificare.

Problema 1.3. Lectură critică URS și transformare SMART

Următorul paragraf provine dintr-un caiet de sarcini real al unui client farmaceutic român: *„Mașina de etichetare trebuie să fie versatilă, capabilă să proceseze diverse tipuri de flacoane farmaceutice. Calitatea aplicării etichetei trebuie să fie corespunzătoare standardelor industriei. Mașina trebuie să fie ușor de utilizat și să nu necesite specializare avansată din partea operatorilor. Curățarea trebuie să fie compatibilă cu cerințele GMP."*

De rezolvat: (a) Identificați toți termenii non-verificabili din paragraf, conform metodologiei din Exemplul rezolvat 1.1. (b) Formulați un set de 5–7 întrebări de clarificare pe care le-ați adresa beneficiarului. (c) Reformulați paragraful sub formă de cerințe SMART, cu valori numerice plauzibile pentru o aplicație farma. (d) Identificați un test corespunzător pentru fiecare cerință SMART, conform principiului corespondenței biunivoce.

Răspuns. (a) Termeni neverificabili: „versatilă", „diverse tipuri", „corespunzătoare standardelor industriei", „ușor de utilizat", „să nu necesite specializare avansată", „compatibilă cu cerințele GMP" (fără zona și agenții de curățare precizați). (b) Întrebări posibile: ce formate de flacoane (diametru, înălțime, material)? ce cadență? ce toleranță de poziționare și de înclinare a etichetei? cum se inspectează eticheta (prezență, poziție, cod)? ce timp de schimbare a formatului este acceptat? ce calificare și ce durată de instruire au operatorii? ce agenți și ce proceduri de curățare se folosesc și în ce clasă de curățenie lucrează mașina? (c) Exemple de cerințe: flacoane Ø16–40 mm și înălțime 40–120 mm; cadență 150 flacoane/min; poziția etichetei ±0,5 mm și înclinare ≤ 1°; schimbarea formatului ≤ 15 min, fără scule; un operator nou este instruit în ≤ 4 h; suprafețele în contact cu produsul sunt din inox 316L, cu Ra ≤ 0,8 µm, compatibile cu agenții de curățare declarați. (d) Teste: rulare cu fiecare format la FAT; măsurarea poziției etichetei pe un eșantion de 100 de flacoane; rulare de 30 min la cadența nominală; cronometrarea schimbării formatului; instruire documentată și evaluată; certificate de material, măsurarea rugozității și un test de curățare documentat.

Problema 1.4. Calcul economic conform regulii 1:10:100

Pentru un proiect SPM cu un cost total de 120.000 € și un termen de livrare de 6 luni, presupunem că o cerință din URS a fost interpretată greșit de echipa de proiectare. Costurile de remediere stimate pe ipoteza regulii 1:10:100 sunt: dacă eroarea este descoperită în faza de specificare (săptămâna 2), 200 €; dacă în proiectarea conceptuală (săptămâna 5), 1.000 €; dacă în fabricație (săptămâna 16), 4.000 €; dacă la punere în funcțiune la beneficiar (săptămâna 25), 10.000 €; dacă în operare (luna 8 după livrare), 20.000 € plus penalități contractuale.

De rezolvat: (a) Construiți un grafic de escaladare a costului remedierii în funcție de momentul descoperirii. Nu utilizați denumirea earned value, deoarece Earned Value Management compară valoarea planificată, valoarea realizată și costul efectiv, nu costul unei neconformități în faze succesive. (b) Argumentați, pe baza cifrelor, cât timp suplimentar ar fi rezonabil să fie alocat clarificării cerințelor pentru reducerea probabilității erorii. (c) Evaluați dacă alocarea a peste 25 % din timpul proiectului fazelor inițiale este justificată, utilizând valoarea așteptată a riscului: probabilitate × impact.

Răspuns. (a) Costul remedierii crește de la 200 € (specificare) la 1.000 €, 4.000 €, 10.000 € și peste 20.000 € în operare, adică de peste 100 de ori între prima și ultima fază; graficul se construiește cu momentul descoperirii pe abscisă și costul pe ordonată (scară logaritmică). (b) Exemplu de raționament: dacă fără clarificare suplimentară probabilitatea ca eroarea să fie descoperită abia la punerea în funcțiune este 30 %, iar o săptămână de clarificare o reduce la 10 %, valoarea așteptată a riscului scade de la 0,30 · 10.000 = 3.000 € la 0,10 · 10.000 = 1.000 €. Săptămâna suplimentară este justificată dacă îl costă pe furnizor mai puțin de aproximativ 2.000 €. (c) Pentru 26 de săptămâni, 25 % înseamnă circa 6,5 săptămâni. Alocarea se justifică dacă suma reducerilor de risc pentru toate cerințele critice depășește costul acestor săptămâni; calculul se face pe lista de cerințe, cu probabilități estimate explicit, nu printr-un procent fix.

Problema 1.5. Aplicarea Axiomei Independenței

Considerăm o variantă didactică distinctă ALT–PNEU, care nu modifică SAP de referință: axa electrică Z este înlocuită cu un cilindru pneumatic dublu efect cu cursă reglabilă, iar regulatorul de presiune al multiplicatorului de presiune pneumohidraulic este reglat de același semnal de control care comandă deschiderea cilindrului de fixare 2C1. Variabilele de control sunt: DP1 = presiunea regulatorului multiplicatorului; DP2 = poziția distribuitorului care comandă cilindrul 2C1; DP3 = poziția distribuitorului care comandă cilindrul de presare. Funcțiile cerute sunt: FR1 = forța de presare = 5–8 kN; FR2 = forța de fixare 2C1 = constantă, 200 N; FR3 = poziția cilindrului de presare în S2 (retras).

De rezolvat: (a) Construiți matricea de proiectare [A] care leagă vectorul {FR} de vectorul {DP}, marcând prin „X” influențele nenule. (b) Clasificați matricea ca diagonală (uncoupled), triunghiulară (decoupled, cu ordine de reglare adecvată) sau cuplată; justificați dacă este respectată axioma independenței. (c) Dacă designul este cuplat, propuneți o modificare arhitecturală care permite decuplarea funcțiilor (de exemplu, separarea regulatoarelor de presiune). (d) Analizați distinct compromisul cost–simplitate; nu îl confundați cu axioma informației.

Răspuns. (a) Deoarece presiunea regulatorului multiplicatorului (DP1) este comandată de același semnal ca distribuitorul cilindrului de fixare (DP2), DP1 nu este independent: modificarea lui DP2 schimbă și forța de presare. Matricea are forma FR1 = [X X X], FR2 = [0 X 0], FR3 = [0 0 X] față de {DP1, DP2, DP3}, dar DP1 și DP2 formează de fapt un singur parametru de proiectare. (b) Numărul de parametri independenți (2) este mai mic decât numărul de funcții (3), deci proiectul este cuplat: forța de presare nu poate fi reglată fără a afecta comanda fixării, iar axioma independenței nu este respectată. (c) Decuplarea se obține prin separarea comenzilor: un regulator proporțional propriu pentru multiplicator, comandat separat de PLC. Matricea devine triunghiulară sau diagonală, iar reglarea se face în ordinea DP2, DP3, DP1. (d) Compromisul cost–simplitate (un regulator suplimentar și o ieșire analogică în plus, față de punere în funcțiune mai dificilă și forță de presare instabilă) este o decizie economică. Axioma informației privește probabilitatea de a satisface FR-urile în toleranța cerută, nu costul.

1.8 Concepte cheie și întrebări de reflecție

1.8.1 Recapitulare: conceptele de bază

- Echipamentul de fabricație este un sistem interdisciplinar; cele patru macro-domenii sunt detaliate în opt subsisteme pentru proiectarea și integrarea coerentă a mașinii.

- Cerințele și metodele de verificare trebuie definite împreună, astfel încât fiecare cerință relevantă să fie trasabilă până la dovada de acceptare.
- Modelul V este un cadru adaptabil pentru descompunere, integrare, verificare și validare; nu este o succesiune rigidă și nici o obligație legală.
- Regula 1:10:100 este utilizată exclusiv ca euristică pentru vizualizarea costului descoperirii tardive a erorilor, nu ca benchmark universal.
- Pahl & Beitz/VDI 2221, Axiomatic Design și MBSE/SysML sunt abordări complementare, utilizabile pentru subprobleme diferite în interiorul cadrului global de dezvoltare.
- SAP este studiul de caz conceptual integrator: axa electrică Z și fixarea pneumatică CL1/CL2 formează configurația de referință, iar valorile 120 ansambluri/oră și 8 kN sunt ipoteze didactice preliminare.

1.8.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipă. Răspunsurile sintetice apar după fiecare întrebare; pentru exersarea independentă, se recomandă parcurgerea întâi a întrebării fără consultarea răspunsului.

Q1. De ce modelul V nu trebuie interpretat ca un proces strict liniar?
Pentru că dezvoltarea este iterativă, iar deciziile și interfețele dintre domenii sunt revizuite pe măsură ce sistemul este descompus și apoi integrat. Valoarea modelului constă în corespondența dintre nivelurile de proiectare și dovezile de verificare/validare.
Q2. De ce regula 1:10:100 este prezentată ca euristică și nu ca lege economică?
Pentru că raporturile de cost depind de organizație, tipul defectului, faza proiectului și consecințele asupra fabricației și exploatării. Figura ilustrează tendința de escaladare, iar valorile reale trebuie susținute de date proprii.
Q3. Cum se diferențiază configurația SAP de referință de variantele ALT?
Configurația de referință utilizează o axă electrică Z pentru presare și CL1/CL2 pentru fixare pneumatică. Presarea pneumatică sau hidraulică și alte valori de cadență sunt variante didactice distincte și nu trebuie transferate automat în configurația de bază.
Q4. Cum pot fi combinate VDI/VDE 2206, Pahl & Beitz/VDI 2221, Axiomatic Design și MBSE?
VDI/VDE 2206 poate furniza cadrul interdisciplinar global; Pahl & Beitz/VDI 2221 poate structura dezvoltarea constructivă; Axiomatic Design poate analiza relația FR–DP și cuplarea; MBSE poate susține modelarea și trasabilitatea.
Q5. Ce transformă o cerință generică într-o cerință verificabilă?
Formularea trebuie să precizeze obiectul, valoarea sau limita relevantă, condițiile de aplicare și metoda/criteriul de acceptare. În logica modelului V, dovada de verificare este planificată odată cu cerința.

2 Ingineria cerințelor

De la nevoia clientului la arhitectura de sistem

Despre acest capitol

Cerințele constituie fundamentul economic, contractual și tehnic al oricărui echipament de fabricație. Ghidurile de Systems Engineering și requirements engineering tratează ambiguitatea, incompletitudinea, inconsistența și neverificabilitatea drept defecte care trebuie prevenite și controlate prin procese explicite [21, 25]. Creșterea costului corecției este ilustrată în acest volum prin euristica 1–10–100; valorile sunt pedagogice și nu reprezintă un raport universal pentru echipamente mecatronice.

Capitolul tratează identificarea părților interesate, elicitarea, taxonomia cerințelor, calitatea formulării, relația dintre caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare conform VDI 2519 și VDI/VDE 3694 [15, 26], descompunerea funcțională, arborele funcție–mijloace, desfășurarea funcției calității (QFD), arhitectura prin diagramă bloc și trasabilitatea nevoie–dovadă.

La final, cititorul va putea redacta și revizui un caiet de sarcini verificabil, va putea evalua răspunsul tehnic al furnizorului și va putea construi o arhitectură de sistem trasabilă, utilizabilă ca intrare pentru proiectarea de detaliu.

Standarde și referințe normative aplicabile

ISO/IEC/IEEE 29148:2018, ingineria cerințelor: procese, caracteristicile cerințelor bine formulate și structura specificațiilor [25].

VDI 2519, întocmirea caietului de sarcini și a specificației tehnice de realizare (Lastenheft / Pflichtenheft) [26].

VDI/VDE 3694:2014, specificarea cerințelor pentru sistemele de automatizare [15].

ISO 12100:2010, principii generale de proiectare și evaluarea riscului, sursă de cerințe de siguranță [27].

Regulamentul (UE) 2023/1230 privind produsele de tip mașină, cerințele esențiale de sănătate și securitate preluate în caietul de sarcini [28].

IEC 60204-1:2016+A1:2021 și IEC 60529:1989+A1:1999, echipamentul electric al mașinii și gradele de protecție IP [29], [30].

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol și a problemelor propuse, cititorul va fi capabil:

- să identifice părțile interesate relevante pentru un echipament de fabricație și să clasifice nevoile acestora pe roluri;
- să formuleze cerințe specifice, măsurabile, acceptate, realizabile și trasabile, pornind de la nevoi exprimate informal;
- să distingă între caietul de sarcini al beneficiarului și specificația tehnică de realizare a furnizorului și să redacteze o specificație coerentă conform practicii VDI 2519 și VDI/VDE 3694;
- să descompună funcția globală într-un arbore funcțional cu minimum trei niveluri de detaliu;
- să utilizeze arborele funcție–mijloace pentru explorarea alternativelor și selecția multicriterială;
- să aplice desfășurarea funcției calității (QFD) pentru corelarea cerințelor cu caracteristicile tehnice și identificarea conflictelor;
- să aloce funcțiile pe domenii tehnice și să elaboreze o diagramă bloc de arhitectură;
- să implementeze trasabilitatea bidirecțională între nevoi, cerințe, soluții, componente și teste.

Cunoștințe prealabile

Pentru parcurgerea capitolului se presupun cunoscute noțiunile generale privind ciclul de viață și modelul V, vocabularul subsistemelor mecanice, electrice, pneumatice, de control și de siguranță, precum și principiile managementului de proiect industrial. În ediția 2026 trebuie avut în vedere regimul de tranziție european: Directiva 2006/42/CE rămâne aplicabilă până la 19 ianuarie 2027, iar Regulamentul (UE) 2023/1230 se aplică, în forma consolidată, de la 20 ianuarie 2027 [28, 31]. Cerințele de proiect trebuie formulate astfel încât dosarul tehnic și evaluarea conformității să poată fi actualizate pentru cadrul aplicabil la data introducerii echipamentului pe piață sau a punerii sale în funcțiune.

Glosar de termeni și acronime

În acest capitol se utilizează consecvent următoarele acronime și notații, definite la prima utilizare în textul propriu-zis și regrupate aici pentru referință rapidă:

Tabelul 2.1. Acronime și notații utilizate în Capitolul 2.

Acronim	Denumire completă și explicație
AHP	engl.: Analytic Hierarchy Process, proces de analiză ierarhică pentru decizii multicriteriale
ALM/RM	engl.: Application Lifecycle Management / Requirements Management, gestionarea ciclului de viață al aplicației și a cerințelor
BOM	Bill of Materials: listă structurată de materiale/componente pentru configurația controlată; conținutul și nivelul de detaliu depind de procesul organizației.
CAD	engl.: Computer-Aided Design, proiectare asistată de calculator
CAPEX	engl.: Capital Expenditure, cheltuieli de capital
CC	Cerințele clientului, etichetă didactică locală pentru zona QFD; a nu se confunda cu marcajul CE.
CUM	Soluțiile tehnice prin care furnizorul răspunde cerințelor
ECR	engl.: Engineering Change Request, cerere de modificare inginerească
ERP	engl.: Enterprise Resource Planning, sistem de planificare a resurselor întreprinderii
FAT	engl.: Factory Acceptance Test, test de acceptanță la producător
F-CPU	engl.: fail-safe CPU, unitate centrală de procesare cu funcții de siguranță

Acronim	Denumire completă și explicație
HMI	engl.: Human–Machine Interface, interfață om–mașină
MES	engl.: Manufacturing Execution System, sistem de execuție a producției
MTBF	engl.: Mean Time Between Failures, durata medie între defectări
MTTR	engl.: Mean Time To Repair, durata medie de reparare
NB	engl.: Notified Body, organism notificat
OPC UA	engl.: Open Platform Communications Unified Architecture, arhitectură interoperabilă pentru schimb de date industriale
PID	engl.: Proportional–Integral–Derivative, regulator proporțional–integral–derivativ
PL / PLr	engl.: Performance Level / required Performance Level, nivel de performanță / nivel de performanță cerut
PLC	engl.: Programmable Logic Controller, automat programabil
PLM	engl.: Product Lifecycle Management, gestionarea ciclului de viață al produsului
QFD	engl.: Quality Function Deployment, desfășurarea funcției calității; metoda Casei Calității
RFQ	engl.: Request for Quotation, cerere de ofertă
RMS	engl.: Root Mean Square, valoare eficace
SAP	Stație de asamblare prin presare, studiul de caz didactic al capitolului
SAT	engl.: Site Acceptance Test, test de acceptanță la amplasamentul beneficiarului
SMART	Mnemonică adaptată în acest volum: Specifică, Măsurabilă, Acceptată, Realizabilă, Trasabilă
VoC	engl.: Voice of the Customer, vocea clientului

La prima utilizare, termenii străini sunt redați prin denumirea completă precedată de abrevierea limbii, de exemplu engl.: Voice of the Customer, urmată de forma scurtă VoC. Lista de mai sus regrupează toate acronimele utilizate în capitol.

Harta capitolului

Parcursul capitolului: §2.1 De ce contează cerințele?; §2.2 Părți interesate și elicitarea cerințelor; §2.3 Tipologia cerințelor și formularea SMART; §2.4 Caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare; §2.5 Descompunerea funcțională; §2.6 Desfășurarea funcției calității (QFD), Casa Calității; §2.7 De la cerințe la arhitectura de sistem; §2.8 Sinteză și concluzii.

2.1 De ce contează cerințele?

Scenariu didactic. O echipă de proiectare întârzie livrarea unei stații de asamblare deoarece cerința inițială menționa o forță de presare de 5 kN, în timp ce încercările pe eșantioane reprezentative indică necesitatea unei forțe de 8 kN. Modificarea nu afectează doar actuatorul, ci și structura, alimentarea pneumatică sau hidraulică, traductorul de forță, logica de control și documentația de verificare. Exemplul ilustrează o proprietate esențială a sistemelor mecatronice: o cerință defectuoasă este o eroare sistemică, deoarece se propagă în subsistemele dependente de parametrul respectiv.

2.1.1 Plasarea pe Modelul V

Capitolul 1 a introdus modelul V ca structură de referință pentru ciclul de viață al unui echipament de fabricație. Ramura descendentă cuprinde definirea nevoilor, specificarea cerințelor, arhitectura și proiectarea de detaliu, iar ramura ascendentă cuprinde integrarea, verificarea și validarea. Capitolul 2 tratează nivelul cerințelor și furnizează referințele față de care vor fi evaluate ulterior soluția și echipamentul realizat (Figura 2.1).

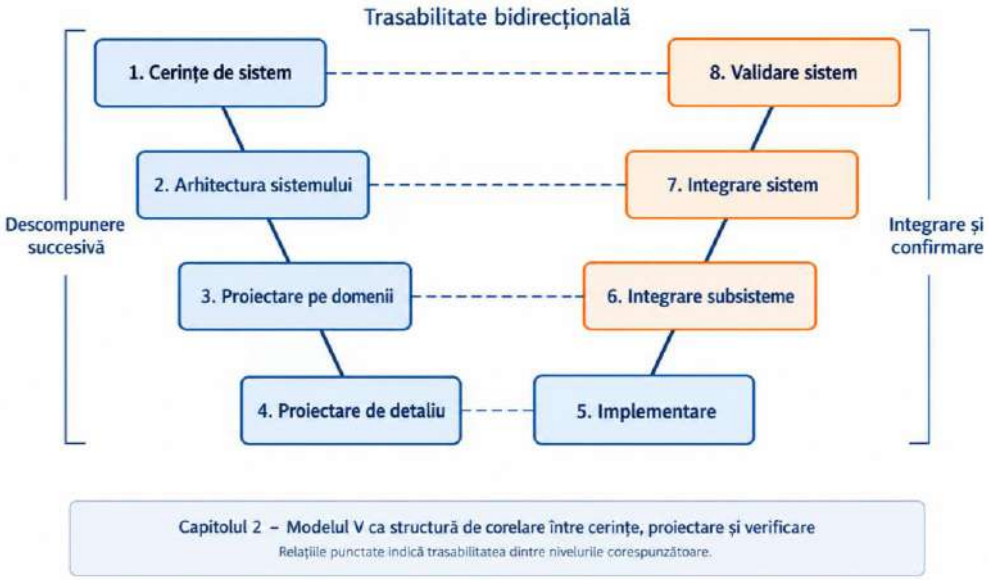


Figura 2.1. Poziționarea Capitolului 2 în modelul V. Cerințele definite pe ramura descendentă devin referințe pentru verificare și validare pe ramura ascendentă.

Importanța poziției este dublă. În amonte, cerințele definesc obligațiile funcționale, de performanță, de interfață și de conformitate. În aval, aceleași cerințe devin referințe pentru verificare și validare. Testele de acceptanță la producător (FAT) și la amplasamentul beneficiarului (SAT) trebuie să demonstreze, prin metode și criterii de acceptanță stabilite din timp, că echipamentul satisface specificația aprobată. Un test trecut față de o cerință greșită demonstrează doar conformitatea cu documentul, nu adecvarea pentru utilizarea reală.

2.1.2 Dovezi empirice și limitele interpretării statistice

Ghidurile de inginerie a sistemelor și experiența proiectelor complexe tratează calitatea cerințelor drept un factor major al performanței proiectului. Procentele publicate diferă substanțial în funcție de domeniu, eșantion și definiția eșecului, de aceea nu trebuie transferate mecanic din proiecte software către echipamente mecatronice. Concluzia robustă este însă aceeași: ambiguitatea, omisiunea, instabilitatea și lipsa unei metode de verificare produc replanificare, modificări de arhitectură și retestare [21, 25].

Problema nu este redusă la competența individuală, ci rezultă din comunicarea interdisciplinară. Beneficiarul cunoaște nevoia și contextul de utilizare; operatorul cunoaște activitatea reală; proiectantul cunoaște soluțiile; specialiștii în siguranță și standardizare cunosc obligațiile aplicabile. Cerințele bune sunt rezultatul unui proces colaborativ, documentat și iterativ.

2.1.3 Regula 1–10–100: economia corecției unei cerințe

Literatura clasică de inginerie software a documentat creșterea costului corecției odată cu avansarea proiectului; Boehm este una dintre sursele istorice frecvent citate pentru această idee [32]. Raporturile numerice provin însă din contexte și epoci diferite și nu trebuie transferate ca lege universală la echipamente mecatronice. Mecanismul rămâne util pedagogic: în faza de specificare se modifică în principal documente; în proiectare se revizuiesc modele și calcule; după fabricație pot fi înlocuite componente, refăcute programe și repetate testele. Figura 2.2 utilizează de aceea o scară exclusiv orientativă.

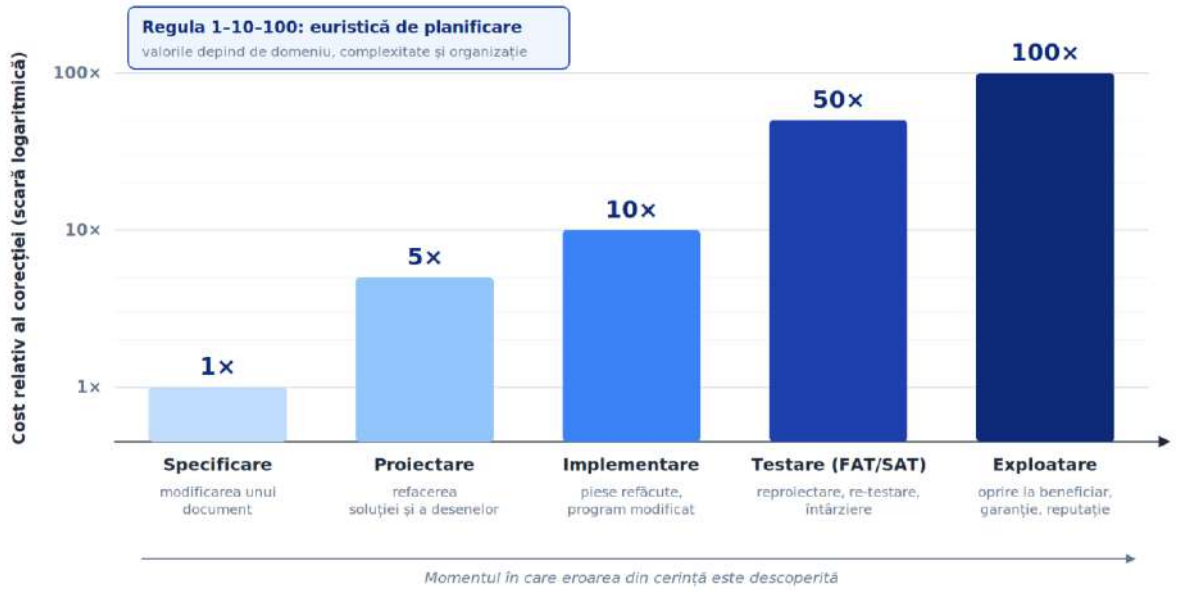


Figura 2.2. Creșterea orientativă a costului corecției unei cerințe descoperite în etape succesive. Valorile 1–5–10–50–100 au rol euristic și trebuie înlocuite, în proiectele reale, cu date istorice proprii organizației.

Problema 2.1. Estimarea impactului descoperirii tardive a unei cerințe

Context. Considerăm cerința P-02 din caietul de sarcini al stației SAP: „forță de presare 5–8 kN”. Comparăm două scenarii: corectarea înaintea aprobării specificației și corectarea după construcție, în timpul FAT sau al punerii în funcțiune. Valorile economice sunt estimări didactice și trebuie înlocuite cu devize reale în aplicațiile industriale.

Scenariul A: corecție în specificare. Modificăm două celule într-un tabel Excel. Implicații în aval: zero. **Cost relativ ≈ 1** (≈ 500 € pentru patru ore inginer + revizie minoră a documentului).

Scenariul B: corecție după construcție, la FAT sau la punerea în funcțiune. Actuatorul și structura au fost dimensionate pentru o forță insuficientă; consecințe în lanț:

- mecanic: redimensionarea dispozitivului de fixare, a ghidajelor și a cadrului;
- acționare: înlocuirea actuatorului, a distribuției și a sursei de presiune;
- electric și instrumentație: actualizarea senzorilor, cablajului și protecțiilor;
- control: recalibrarea buclei de proces, actualizarea programului PLC și a interfeței operator;
- siguranță: revizuirea evaluării riscurilor, redeterminarea PLr și revalidarea funcțiilor afectate;
- logistică și contract: întârzierea livrării, repetarea FAT/SAT și eventuale penalități.

Într-un proiect real, costul corecției după construcție poate deveni mult mai mare decât costul clarificării din faza de specificare, deoarece implică simultan componente, ore de inginerie, retestare și

efecte contractuale. Raportul trebuie calculat din costurile și istoricul organizației, nu preluat automat din regula 1–10–100.

Concluzie. Pentru cerințele critice de proces, metodologia adoptată în acest volum cere obținerea de date reprezentative și confirmarea ipotezelor cu beneficiarul înainte de aprobarea specificației; metoda concretă de verificare sau validare se stabilește în funcție de cerință, risc și contract.

2.1.4 Propagarea defectelor: cascada inter-domeniu

Particularitatea echipamentelor de fabricație, și mai general a sistemelor mecatronice, este că o cerință greșită nu rămâne localizată. **Ea se propagă în toate subsistemele** care depind de parametrul respectiv. Figura 2.3 ilustrează cascada declanșată de subestimarea forței de presare în caietul de sarcini al stației SAP.

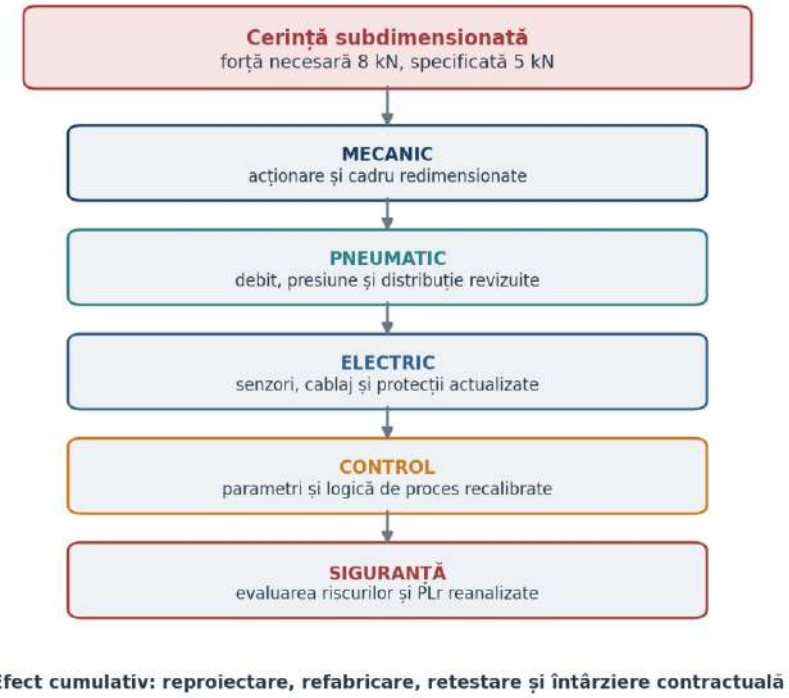


Figura 2.3. Propagarea unei cerințe subdimensionate în subsistemele echipamentului. Evaluarea riscurilor și nivelul de performanță cerut se reanalizează numai pentru funcțiile de siguranță afectate de modificare.

Domeniul siguranței poate fi afectat indirect. O forță mai mare nu conduce automat la un nivel de performanță superior; PLr se determină pentru fiecare funcție de siguranță pe baza estimării riscului. Modificarea poate însă schimba severitatea, expunerea sau posibilitatea de evitare, ceea ce impune revizuirea evaluării riscurilor și, pentru funcțiile proiectate conform ISO 13849-1, reevaluarea calculului PL (de exemplu cu un instrument precum SISTEMA) și revalidarea funcțiilor afectate [3, 27]. Intervenția unui organism notificat depinde de categoria produsului și de procedura de evaluare a conformității aplicabilă, nu de simpla modificare a forței [28].

2.1.5 Tipologia defectelor de cerințe

În cadrul didactic al acestui capitol sunt urmărite cinci clase recurente de defecte: cerințe incomplete, ambigue, inconsistente, neverificabile și volatile. Clasificarea este o grilă de revizuire, nu o taxonomie statistică universală; proprietățile formale ale informațiilor de cerințe trebuie verificate în raport cu ISO/IEC/IEEE 29148 [25]. Figura 2.4 asociază fiecărei clase un mecanism de prevenire.

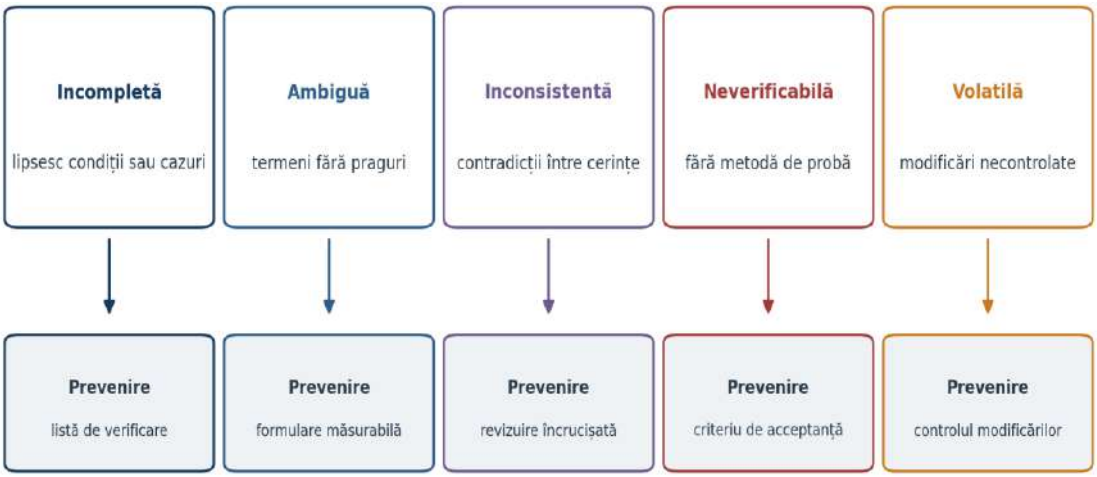


Figura 2.4. Tipuri frecvente de defecte ale cerințelor și mecanismele lor de prevenire. Diagrama este o sinteză metodologică, nu o distribuție statistică universală.

Fiecare categorie de defect are un **antidot specific**, pe care îl vom dezvolta în secțiunile următoare:

- Cerințe incomplete: prevenite prin liste de verificare care acoperă funcționarea, performanța, siguranța, interfețele, mediul și obligațiile normative;
- Cerințe ambigue: prevenite prin termeni măsurabili, valori, toleranțe și condiții de verificare;
- Cerințe volatile: controlate prin registru de modificări, evaluarea impactului și aprobare formală;
- Cerințe inconsistente sau contradictorii: detectate prin revizuire încrucișată, matrice de interfețe și analiza conflictelor;
- Cerințe neverificabile: prevenite prin definirea simultană a metodei, instrumentului, condițiilor și criteriului de acceptanță.

> **În practică**
> O cerință nu se aprobă până când nu există o metodă de verificare: mărime măsurată, instrument, condiții, număr de repetări și criteriu de acceptanță. Regula este mai importantă decât orice procent generic privind frecvența defectelor.

În concluzie, cerințele reprezintă baza tehnică și contractuală a proiectului. Investiția în clarificare, măsurare și validare timpurie reduce numărul de artefacte care trebuie revizuite ulterior și limitează riscul disputelor la FAT și SAT.

2.2 Părți interesate și elicitarea cerințelor

Scenariu didactic. Un echipament respectă cota de alimentare menționată în caietul de sarcini, dar operatorii constată că zona este dificil accesibilă pentru o parte a personalului. Defectul nu provine din nerespectarea documentului, ci din omiterea utilizatorilor reali în procesul de definire. Exemplul arată că cerințele trebuie să integreze nevoile tuturor părților interesate relevante, nu doar ale persoanei care aprobă achiziția.

2.2.1 Identificarea părților interesate

În sensul ISO/IEC/IEEE 29148, o parte interesată (engl.: stakeholder) este o persoană, un grup sau o organizație care influențează sistemul ori este afectată de acesta. Pentru un echipament de fabricație trebuie analizate cel puțin rolurile din Figura 2.5; lista se adaptează proiectului și poate include, suplimentar, calitatea, logistica, tehnologia informației, protecția mediului sau reprezentanții procesului din amonte și aval [25].

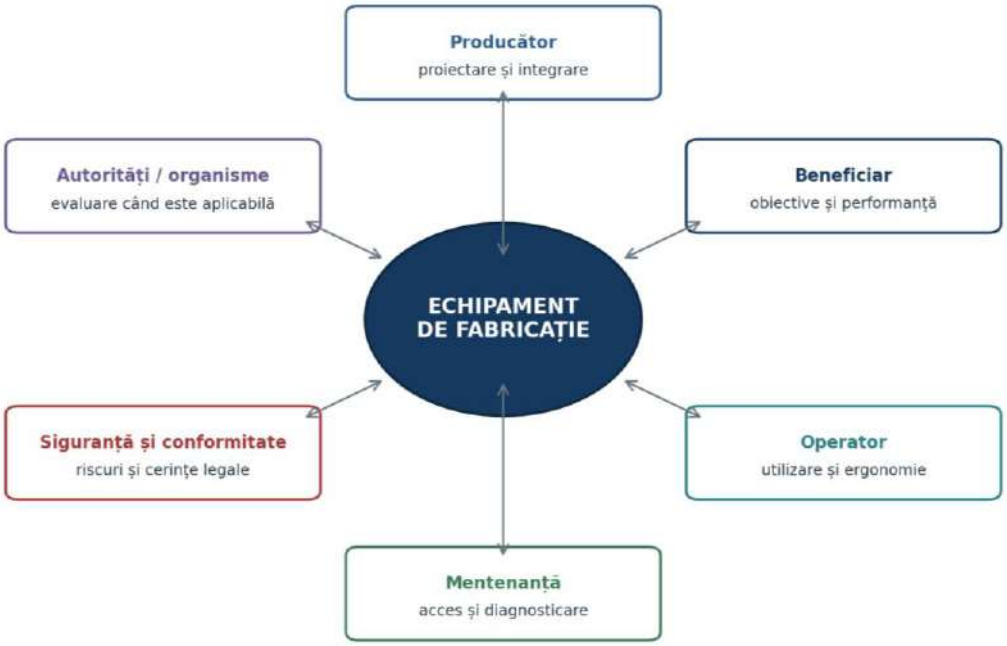


Figura 2.5. Hartă generică a părților interesate pentru un echipament de fabricație. Rolurile și influența lor trebuie particularizate printr-un registru al părților interesate pentru fiecare proiect.

Beneficiarul (clientul industrial)

Definește ce rezultate trebuie să furnizeze echipamentul: produsul și variantele sale, cadența, nivelul de calitate, trasabilitatea și interfețele cu linia. Pentru stația SAP, cerințele de performanță trebuie exprimate prin valori măsurabile și condiții de testare, nu doar prin descrieri generale.

Operatorul de linie

Interacționează zilnic cu echipamentul. Cerințele de ergonomie trebuie determinate prin analiza sarcinii, date antropometrice, posturi de lucru și scenarii de utilizare. EN 1005-4 oferă principii pentru evaluarea posturilor și mișcărilor, dar nu justifică singur o cotă universală de lucru. Interfața, mesajele de diagnostic și acțiunile operatorului se validează cu utilizatori reprezentativi [33].

Departamentul de mentenanță

Asigură disponibilitatea echipamentului în exploatare. Cerințele sale privesc accesul la componente, standardizarea pieselor de schimb, diagnosticarea, documentația, izolarea energiilor și timpul mediu de reparare (MTTR). Pragurile se stabilesc pe clase de defect și prin scenarii de intervenție, nu printr-o singură valoare generică.

Echipa de siguranță și conformitate

Transformă cadrul legal și standardele aplicabile în cerințe verificabile. În 2026, proiectele trebuie să gestioneze explicit tranziția de la Directiva 2006/42/CE la Regulamentul (UE) 2023/1230 [28, 31]. Evaluarea riscurilor conform ISO 12100, proiectarea funcțiilor de siguranță conform standardului ales pentru SRP/CS, echipamentul electric, instrucțiunile și dosarul tehnic se planifică din faza de cerințe, deoarece generează livrabile și activități de verificare/validare pe întregul ciclu de viață [3, 27, 29].

Autoritățile și organismele notificate

Procedura de evaluare a conformității depinde de tipul echipamentului, de încadrarea în Anexa I și de utilizarea standardelor armonizate sau a specificațiilor comune. Pentru categoriile din Anexa I partea A, procedurile prevăd implicarea unui organism notificat; pentru partea B există mai multe rute, iar controlul intern poate fi posibil în condițiile stabilite de regulament. Prin urmare, necesitatea organismului notificat se decide prin analiza procedurii aplicabile, nu printr-o regulă generică pentru toate mașinile [28].

2.2.2 Elicitarea: descoperire activă, nu colectare pasivă

Termenul „elicitare” desemnează procesul activ de descoperire, clarificare și negociere a nevoilor părților interesate. Cerințele nu există, de regulă, într-o formă direct utilizabilă: beneficiarul exprimă obiective, operatorul descrie dificultăți, iar standardele formulează obligații generale. Inginerul transformă aceste surse în cerințe coerente, verificabile și trasabile [21, 25].

Problema 2.2. Planificarea unei campanii de elicitare pentru stația SAP

Context. Echipa de inginerie primește o solicitare de ofertă pentru o stație de asamblare tub–carcasă. Documentul inițial conține opt enunțuri generale. Se planifică o campanie de elicitare pe trei săptămâni.

Săptămâna 1: Interviuri structurate (pe roluri).

- Beneficiar, Manager Producție: chestionar tehnic privind cadența, varietatea, indicatori de calitate;
- Beneficiar, Manager Calitate: criteriile de acceptanță și măsurătorile de eșantionare deja existente;
- Beneficiar, Maistru linie: utilizarea în cele trei schimburi, sezonalitatea, incidente cunoscute la echipamentele similare.

Săptămâna 2: Observație directă la amplasament. Echipa urmărește utilizarea echipamentului existent și documentează posturile, mișcările, frecvența intervențiilor, vizibilitatea semnalizărilor și cauzele opririlor.

Săptămâna 3: Analiză normativă și analiză comparativă. Se pun în corespondență obligațiile legale și standardele aplicabile, apoi se compară soluții similare pentru a identifică riscuri cunoscute și caracteristici diferențiatoare. Orice valoare preluată din comparație trebuie validată pentru procesul propriu.

Rezultat. Caiet de sarcini consolidat, cu cerințe atomice, identificatori unici, sursă, justificare și metodă de verificare. Indicatorii procentuali privind reducerea modificărilor trebuie calculați din istoricul organizației, nu presupuși.

2.2.3 Tehnici de elicitare: metode complementare

Nicio tehnică de elicitare nu este suficientă pentru toate proiectele și toate tipurile de informație. Practica de requirements engineering recomandă utilizarea unor metode complementare, selectate în funcție de părțile interesate, riscuri, accesul la proces și maturitatea soluției [21, 25]. Figura 2.6 sintetizează șase tehnici utile pentru echipamentele de fabricație.

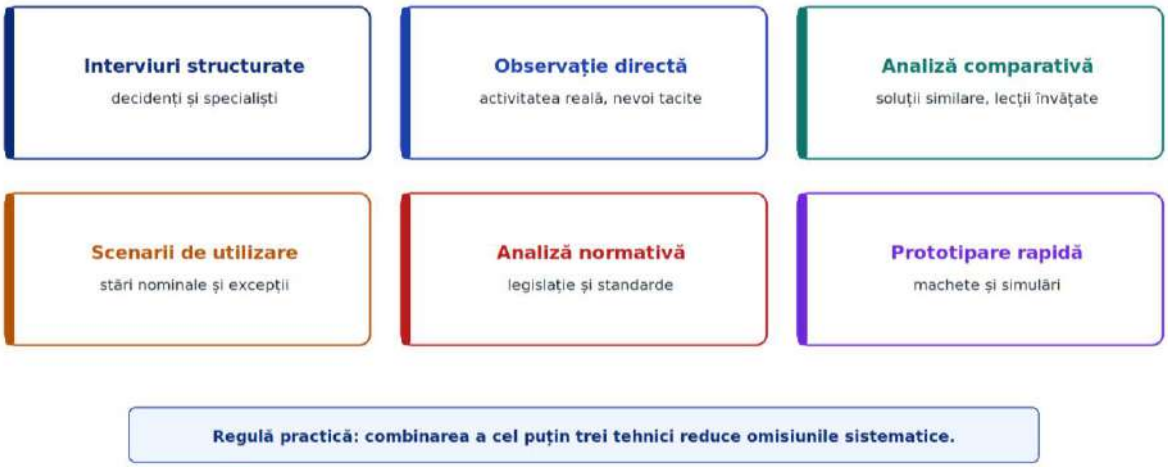


Figura 2.6. Șase tehnici complementare de elicitare. Combinația se alege în funcție de roluri, riscuri, noutatea procesului și disponibilitatea unui echipament de referință.

Caracteristicile celor șase tehnici merită aprofundate:

- Interviuri structurate: chestionar predefinit aplicat individual fiecărui rol-cheie. Recomandare practică: niciodată nu interviezi clientul și operatorul în aceeași încăpere; operatorul nu va contrazice șeful, iar nevoile sale tacite vor rămâne nedezvăluite.
- Observație directă la amplasament: urmărirea activității reale pentru identificarea gesturilor, deciziilor și constrângerilor pe care utilizatorul nu le exprimă spontan;
- Analiză comparativă (engl.: benchmarking), compararea echipamentelor similare, a proiectelor anterioare și a datelor de catalog; rezultatele oferă ipoteze de lucru, nu cerințe definitive;
- Scenarii de utilizare: descrierea comportamentului la pornire, funcționare nominală, erori, oprire, schimbare de produs și mentenanță;
- Analiza normativă: extragerea cerințelor impuse de legislația și standardele aplicabile. Pentru un echipament destinat pieței europene, analiza poate include, după caz, Regulamentul (UE) 2023/1230, ISO 12100, ISO 13849-1, IEC 60204-1, standardele EMC aplicabile și standardele de tip C relevante pentru categoria de mașină [3, 27–29]. Lista exactă se stabilește prin analiza domeniului de aplicare și nu este identică pentru toate echipamentele.
- Prototipare rapidă: machete, simulări 3D și prototipuri funcționale utilizate pentru validarea timpurie a geometriei, interacțiunii și secvențelor de lucru.

În practică

Ca regulă didactică în acest volum, pentru proiectele noi se recomandă triangularea informației din surse complementare, de exemplu: un interviu cu rolul decident, observația directă a utilizatorului și analiza obligațiilor normative. Documentația de elicitare trebuie să indice sursa, data și justificarea fiecărei cerințe.

2.3 Tipologia cerințelor și formularea SMART

Exercițiu didactic de audit. Un set de cerințe pentru o stație de control conține enunțuri hibride, formulări vagi și cerințe fără metodă de verificare. După atomizare și clasificare, numărul cerințelor crește, dar fiecare enunț devine mai ușor de analizat și testat. Secțiunea propune o taxonomie didactică în șase categorii și o mnemonică de verificare a calității formulării.

2.3.1 Taxonomie didactică în șase categorii

ISO/IEC/IEEE 29148 definește procesele și proprietățile informațiilor de cerințe, fără a impune exact taxonomia în șase clase utilizată aici. Pentru proiectarea echipamentelor, împărțirea din Figura 2.7 este o grilă didactică utilă pentru verificarea completitudinii: funcționale, de performanță, de siguranță, de interfață, de mediu și normative [25].

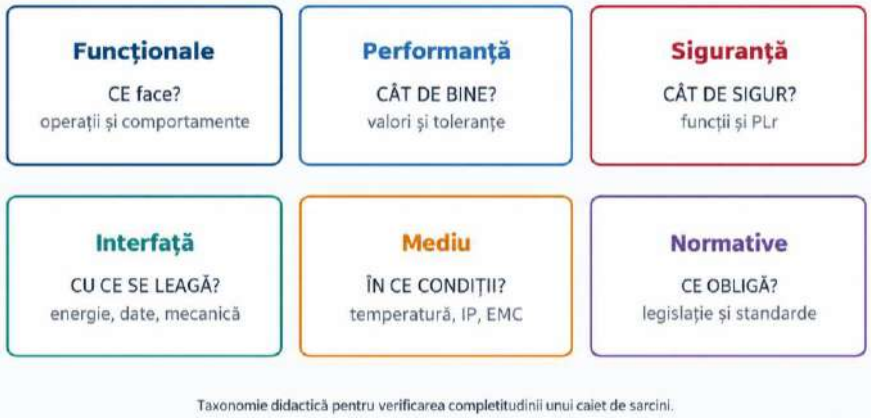


Figura 2.7. Taxonomie didactică în șase categorii pentru verificarea completitudinii cerințelor unui echipament de fabricație. O cerință trebuie formulată atomic, iar relațiile dintre categorii se gestionează prin identificatori și trasabilitate.

Cerințe funcționale (CE face echipamentul)

Descriu **comportamentul observabil** al echipamentului: ce operații execută, în ce ordine, cu ce intrări și ieșiri. Forma canonică recomandată este *„Echipamentul trebuie să [verb] [obiect] [condiție]”*. Exemple corecte (stația SAP): *„F-01: Echipamentul trebuie să fixeze tubul în housing prin presare verticală cu forță specificată în P-02”*; *„F-04: Echipamentul trebuie să respingă automat piesele cu forță finală de presare în afara intervalului P-02 ± 5 %”*. Verb activ, obiect concret, condiție măsurabilă referințând o altă cerință cu identificator unic: acestea sunt marcajele unei cerințe funcționale corect formulate.

Cerințe de performanță (CÂT DE BINE face)

Atașează **valori cantitative** funcțiilor descrise mai sus: viteză, debit, precizie, repetabilitate, capacitate, cadență. Exemple SAP: *„P-01: Cadență ≥ 120 piese/oră în regim nominal, măsurată pe un eșantion de 60 minute consecutive”*; *„P-03: Repetabilitate de poziționare a tubului ± 0,1 mm (3σ) măsurată cu instrument digital pe 30 cicluri consecutive”*. Atenție la unitatea de măsură, la baza statistică (medie? maxim? deviație standard?) și la condițiile de măsură (echipament gol vs. în producție; nominal vs. la maxim).

Cerințe de siguranță

Decurg din evaluarea riscurilor conform ISO 12100 [27]. Pentru părțile sistemelor de comandă referitoare la siguranță, nivelul de performanță cerut (PLr) se determină pentru fiecare funcție prin estimarea riscului; ISO 13849-1 nu stabilește automat PLr pentru o aplicație [3]. Exemplu: „S-01: la deschiderea apărătorii mobile, mișcarea periculoasă trebuie oprită prin funcția SF-01, cu PLr rezultat din evaluarea de risc și validat conform planului de testare”.

Cerințe de interfață

Descriu modul în care echipamentul se conectează la surse de energie, echipamente vecine și sisteme informaționale. Exemplu: alimentare 3 × 400 V AC, 50 Hz, curent maxim precizat și condiții de protecție; PROFINET IO pentru comunicația în celulă; OPC UA sau o interfață convenită pentru schimbul de date cu MES. Nivelurile rețelei și protocoalele nu trebuie amestecate într-o singură cerință.

Cerințe de mediu

Definesc condițiile în care echipamentul trebuie să funcționeze: temperatură, umiditate, contaminare, grad de protecție IP, vibrații externe și compatibilitate electromagnetică. Valorile se stabilesc din mediul real de utilizare și din fișele tehnice ale componentelor; codul IP se interpretează conform IEC 60529 [30]. Cerința trebuie să indice dacă limita se aplică întregului echipament, tabloului sau numai componentelor expuse.

Cerințe normative (constrângeri)

Sunt obligații provenite din legislație, evaluarea riscurilor, standarde armonizate și standarde de tip C aplicabile. În ediția 2026 trebuie precizat explicit cadrul temporal: Directiva 2006/42/CE până la 19 ianuarie 2027 și Regulamentul (UE) 2023/1230 de la 20 ianuarie 2027 [28, 31]. Exemplu: „N-01: dosarul tehnic, instrucțiunile și declarația de conformitate vor respecta actul juridic aplicabil la data introducerii pe piață sau a punerii în funcțiune”.

2.3.2 Calitatea unei cerințe individuale: criteriile SMART

Categoria arată domeniul cerinței; calitatea arată dacă enunțul poate fi utilizat contractual și verificat. În acest volum, SMART este folosit ca mnemonică adaptată (Figura 2.8): Specifică, Măsurabilă, Acceptată, Realizabilă și Trasabilă. Mnemonica nu înlocuiește proprietățile complete din ISO/IEC/IEEE 29148, precum necesitatea, lipsa ambiguității, consistența, singularitatea, fezabilitatea și verificabilitatea [25].



Figura 2.8. Mnemonica SMART adaptată în acest volum pentru revizuirea rapidă a cerințelor. Acceptarea SMART nu substituie verificarea proprietăților complete prevăzute de ISO/IEC/IEEE 29148.

Aplicăm testul pe enunțul „Echipamentul trebuie să fie suficient de rapid”. Cerința nu este specifică și nu conține un indicator măsurabil, condiții sau metodă de verificare. Reformulare: „P-01: cadență de minimum 120 piese/oră, măsurată timp de 60 min consecutive în regim nominal, conform protocolului FAT-01”. Enunțul devine măsurabil și trasabil; fezabilitatea și acceptarea trebuie confirmate separat de echipa de proiect și beneficiar.

În practică

Fiecare cerință se revizuiește pentru atomicitate, necesitate, claritate, consistență, fezabilitate, verificabilitate și trasabilitate. Mnemonica SMART este un filtru rapid; cerința intră în versiunea de referință aprobată numai după rezolvarea observațiilor.

Aplicarea criteriilor de calitate la cerințele mecanice evidențiază termeni aparent intuitivi, dar neverificabili: rigid, robust, silențios sau bine aliniat. Exemplele următoare arată cum se transformă aceste adjective în mărimi, condiții de măsurare și criterii de acceptanță.

Rigiditatea cadrului. Formulare vagă: „Echipamentul trebuie să fie suficient de rigid”. Formulare verificabilă: „Deflexia cadrului în punctul de aplicare a sarcinii nu trebuie să depășească 0,05 mm la o sarcină statică de 8 kN, aplicată în poziția de lucru; măsurarea se realizează cu comparator calibrat conform protocolului FAT-M01”. Valoarea de 0,05 mm trebuie justificată prin bugetul de toleranțe al procesului.

Materiale și finisaje. Formulare vagă: „Cadrul să fie din oțel de calitate, cu vopsea rezistentă”. Formulare verificabilă: „Cadru sudat din profile S355JR conform EN 10025-2:2019 [34]; sistem de acoperire selectat pentru categoria de corozivitate C3 și durabilitatea cerută conform ISO 12944-2 și ISO 12944-5 [35, 36]; culoare RAL 7035 și grosime uscată minimă stabilită în specificația sistemului de vopsire”.

Vibrațiile în funcționare. Formulare vagă: „Echipamentul să funcționeze fără vibrații anormale”. Exemplu didactic de cerință verificabilă: „Accelerația RMS măsurată pe cadrul stației, în punctele V1–V3 și în banda 10–500 Hz, nu trebuie să depășească 0,5 m/s^2 în regim nominal”. Pragul de 0,5 m/s^2 este o ipoteză de proiect și trebuie justificat prin sensibilitatea procesului și prin măsurări. ISO 20816-3:2022 se utilizează numai pentru mașinile care intră în domeniul său de aplicare și nu furnizează automat un criteriu pentru o stație mică de presare [37].

Toleranțe geometrice. Formulare vagă: „Poziționarea să fie corectă”. Formulare verificabilă: „Axa de presare trebuie să se încadreze într-o zonă cilindrică de poziție de ⌀0,10 mm față de reperele A–B, conform ISO 1101:2017 [38]; planeitatea mesei de lucru nu trebuie să depășească 0,10 mm pe 1 000 mm”. Valorile sunt exemple didactice și trebuie derivate din bugetul de toleranțe al procesului; specificația finală trebuie reprezentată coerent în cerință, desen și protocolul de măsurare.

Exemplul rezolvat 2.1. De la o cerință vagă la cerințe verificabile pentru stația SAP

Enunț. În discuția inițială, beneficiarul formulează cerința: „Stația trebuie să fie rapidă, precisă și sigură.” Să se transforme formularea într-un set de cerințe care respectă criteriile SMART din §2.3.2 și să se stabilească metoda de verificare pentru fiecare.

Pasul 1. Descompunerea pe proprietăți. Formularea conține trei proprietăți distincte: productivitatea („rapidă”), calitatea îmbinării („precisă”) și siguranța („sigură”). Ele devin cerințe separate, cu identificator propriu, deoarece pot fi satisfăcute sau ratate independent și se verifică prin metode diferite.

Pasul 2. Cuantificarea. Pentru fiecare proprietate se stabilește mărimea măsurabilă care o descrie și valoarea-țintă acceptată de beneficiar:

- P-01 (productivitate): timp de ciclu mediu ≤ 30 s, corespunzător cadenței de 120 de ansambluri pe oră;
- P-02 (proces): forță de presare reglabilă între 5 și 8 kN, cu eroarea de măsurare de cel mult 2 % din valoarea indicată (§2.4.3);
- Q-01 (calitate): cota de inserare a tubului H = 25,00 ± 0,15 mm, cu indicele de capabilitate $C_{pk} \geq 1{,}33$ (valori didactice, de confirmat pe desenul produsului);
- S-01 (siguranță): funcțiile de siguranță ale stației se determină prin evaluarea riscului conform ISO 12100, iar fiecare funcție atinge nivelul de performanță cerut (PL_r) stabilit în acea evaluare (Capitolul 9).

Pasul 3. Testul SMART. P-01 este specifică și măsurabilă (timpul se înregistrează în PLC), realizabilă dacă ciclograma din Capitolul 8 confirmă bugetul de timp, relevantă pentru beneficiar și verificabilă la un moment definit (FAT). Q-01 devine verificabilă numai după ce se fixează condițiile de măsurare: mijlocul de măsurare, numărul de piese și starea mașinii. S-01 nu impune o valoare dinainte, dar este verificabilă, pentru că trimite la un proces definit, cu rezultat documentat.

Pasul 4. Metoda de verificare. P-01, test la FAT pe 50 de cicluri consecutive cu piese reale, cu timpul înregistrat de PLC; P-02, test cu traductor de referință etalonat, în trei puncte ale domeniului (5; 6,5 și 8 kN); Q-01, studiu de capabilitate la FAT (Exemplul rezolvat 12.1); S-01, validare conform ISO 13849-2, documentată în dosarul tehnic.

Rezultat. Formularea inițială, neverificabilă, a devenit patru cerințe cu identificator, valoare-țintă și metodă de verificare. Cuvintele „rapidă”, „precisă” și „sigură” nu mai apar în specificație: fiecare a fost înlocuit de mărimea care îl face verificabil.

2.4 Caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare

Practica inginerească germană utilizează cuplul Lastenheft–Pflichtenheft (în acest volum, caiet de sarcini și specificație tehnică de realizare) pentru separarea cerințelor beneficiarului de descrierea realizării de către furnizor. VDI 2519 Blatt 1:2001-12 oferă o procedură generală pentru întocmirea acestor documente, iar VDI/VDE 3694:2014 tratează explicit planificarea și proiectarea sistemelor de automatizare [15, 26]. Aceste ghiduri nu înlocuiesc contractul și standardele aplicabile, dar furnizează o structură utilă pentru definirea responsabilităților.

2.4.1 Cele două documente, două responsabilități

Definițiile sunt simetrice și complementare (Figura 2.9):

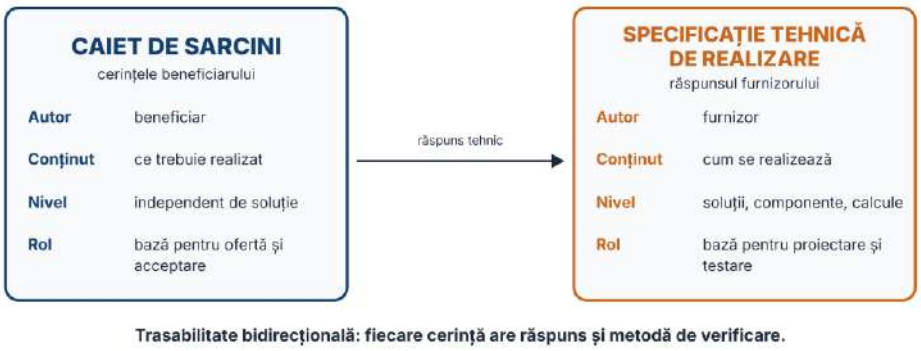


Figura 2.9. Relația dintre caietul de sarcini al beneficiarului și specificația tehnică de realizare a furnizorului. Documentele formează o pereche trasabilă: cerință, răspuns tehnic, metodă de verificare și criteriu de acceptanță.

Caietul de sarcini este redactat de beneficiar și descrie ce rezultate trebuie obținute, în ce condiții și cum vor fi acceptate. În principiu, documentul rămâne independent de soluție. Totuși, poate conține constrângeri tehnologice justificate, de exemplu standardizarea unei platforme PLC sau a unui protocol de comunicație; aceste constrângeri trebuie marcate explicit și motivate, deoarece limitează spațiul de soluții al furnizorului.

Specificația tehnică de realizare este elaborată de furnizor și descrie cum va fi satisfăcută fiecare cerință: arhitectură, componente, calcule, interfețe, parametri și metode de verificare. După acceptarea formală, devine referință tehnică pentru proiectare și testare. Fiecare element trebuie trasat către una sau mai multe cerințe din caietul de sarcini, iar fiecare cerință trebuie să aibă răspuns tehnic.

2.4.2 Tabelul comparativ și diviziunea responsabilităților

Diferențele dintre cele două documente și modul în care se împart responsabilitățile între beneficiar și furnizor sunt sintetizate comparativ în Tabelul 2.2, pe baza VDI 2519 și VDI/VDE 3694.

Tabelul 2.2. Comparație între caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare pentru un echipament de fabricație, pe baza VDI 2519 și VDI/VDE 3694 [15, 26].

Aspect	CAIET DE SARCINI (CE)	SPECIFICAȚIE TEHNICĂ DE REALIZARE (CUM)
Autor	Beneficiarul (clientul)	Furnizorul (antreprenor general)
Moment	Înainte de licitație / RFQ	După adjudecare, înainte de proiectare detaliu
Conținut	Cerințe funcționale, performanță, siguranță, normative	Soluții tehnice concrete, componente, calcule, interfețe
Nivel de detaliu	Independent de soluție	Specific soluției alese
Rol contractual	Bază pentru ofertă și negociere	Bază pentru proiectare, FAT, SAT
Standard de referință	VDI 2519 [26]; ISO/IEC/IEEE 29148 [25]	VDI/VDE 3694 [15]; ISO/IEC/IEEE 29148 [25]
Amploare	Dependentă de complexitate, risc și cerințele contractuale	Dependentă de soluție, interfețe și nivelul de detaliere convenit

2.4.3 Exemplu de caiet de sarcini: extras pentru stația SAP

Tabelul 2.3 prezintă un extras didactic din caietul de sarcini generic al stației SAP, organizat pe categorii de cerințe. Identificatorii F-01, P-01 etc. susțin trasabilitatea, dar valorile de proiectare, procedurile de test și rezultatele rămân ipoteze ori livrabile de pregătit, nu date verificate ale unei mașini construite.

Tabelul 2.3. Extras din caietul de sarcini al stației SAP. Fiecare cerință are identificator, categorie, enunț atomic și metodă de verificare.

ID	Categorie	Cerință	Verificare
F-01	Funcțională	Asamblare prin presare axială a unui tub într-o carcasă; ajustaj și geometrie TBD.	FAT: ciclu complet
F-02	Funcțională	Clasificare OK/NOK după fereastra F–z și criteriile geometrice definite și validate (TBD).	Inducere defect în 10 cicluri
P-01	Performanță	Cadență scenariu H: 120 ansambluri/oră (tact nominal 30 s); fezabilitate de demonstrat.	Eșantion 60 min, contor MES

ID	Categorie	Cerință	Verificare
P-02	Performanță	$F_{max,design}$ = 8 kN (ipoteză H); profil și eroare de măsurare TBD după produs/metrologie.	Protocol de forță–deplasare și buget de incertitudine, cu traductor compatibil cu 8 kN + suprasarcină.
P-03	Performanță	Repetabilitate de poziționare ± 0,10 mm (3σ), măsurată pe 30 cicluri	Instrument digital, 30 cicluri
S-01	Siguranță	Funcție de oprire de urgență conform IEC 60204-1 [29]; PLr determinat prin evaluarea riscului	Calcul și validare funcție de siguranță
S-02	Siguranță	Mijloace de protecție și funcții de siguranță stabilite prin evaluarea riscului; comandă bimanuală numai dacă soluția o justifică.	Protocol de validare stabilit prin evaluarea riscului
I-01	Interfață	Alimentare 3×400 V AC, 50 Hz, max 16 A (IEC 60204-1 [29])	Verificare tablou la SAT
I-02	Interfață	PROFINET IO în celulă și interfață OPC UA către MES	Test de integrare cu simulator MES
M-01	Mediu	Temperatură 5–40 °C; umiditate relativă max. 80 %, fără condens	Declarații și fișe tehnice
M-02	Mediu	IP54 tablou, IP65 senzori expuși	Test stropire IP54, IEC 60529 [30]
N-01	Normativă	Conformitate cu actul juridic aplicabil la data introducerii pe piață / punerii în funcțiune	Audit dosar tehnic și declarație

Problema 2.3. Transformarea unei cerințe din caietul de sarcini într-o soluție din specificația tehnică de realizare

Cerință din caietul de sarcini (P-02): „Forță de presare reglabilă între 5 și 8 kN; eroarea de măsurare maximum 2 % din valoarea indicată; criteriile se verifică în regim nominal”.

Răspuns în specificația tehnică de realizare (extras structurat):

- Soluție de bază (B): axă electrică Z de presare, servomotor și mecanism liniar; forța, cuplul, cursa, viteza și regimul RMS se dimensionează din profilul F–z și din ciclogramă.
- Variantă ALT–PNEU: un cilindru Ø50 mm la 12 bar generează teoretic $F = p\pi D^2/4 \approx 2{,}36$ kN, deci NU îndeplinește cerința ipotetică de 8 kN. O variantă pneumatică fezabilă trebuie redimensionată și verificată la presiunea admisă de toate componentele.
- Soluție electrică (B): selecție servomotor/drive pentru profilul de forță și viteză; monitorizare și comandă pe forță/deplasare, cu dinamică și eroare evaluate pentru lanțul efectiv, fără a deduce precizia forței direct din numărul de biți al conversiei.
- Soluție de măsurare (B/TBD): traductor de forță cu domeniu compatibil cu $F_{max,design}$ = 8 kN și cu suprasarcinile previzibile; selecția, calibrarea și bugetul de incertitudine trebuie să demonstreze eroarea cerută. Un traductor cu domeniul maxim 5 kN este insuficient.
- Soluție control (B/TBD): control de mișcare pe drive/PLC cu supravegherea profilului F–z, semnale sincronizate și reacții la abateri. Frecvența buclei și limitele de abatere se stabilesc prin model, teste și cerințele procesului; funcțiile de siguranță sunt definite separat prin evaluarea riscului.

Trasabilitate. Cerința P-02 generează cerințe pentru mecanismul electric, structura portantă, dispozitivul de fixare, măsurare și control, fiecare cu identificator și test propriu. Varianta ALT–PNEU este

evaluată separat. Satisfacerea cerinței nu poate fi afirmată decât după demonstrarea forței, a incertitudinii, a profilului și a stabilității în verificările documentate.

> **În practică**
> Fiecare cerință din caietul de sarcini trebuie să aibă răspuns în specificația tehnică de realizare, iar fiecare soluție propusă trebuie să aibă o justificare trasabilă. Excepțiile și soluțiile suplimentare se marchează explicit pentru negociere și aprobare.

Pentru echipamentele cu pondere mecanică ridicată, caietul de sarcini trebuie să acopere explicit cerințele structurale, geometrice, dinamice, de materiale și finisaje, precum și de interfață și accesibilitate. Absența lor creează zone neclare în contract sau conduce la suprainginerie. Tabelul următor poate fi utilizat ca grilă de interviu și de revizuire.

Tabelul 2.4. Categorii de cerințe mecanice care trebuie analizate explicit în caietul de sarcini al unui echipament de fabricație.

Categorie mecanică	Aspecte urmărite	Exemplu SAP (formulare verificabilă)
Structurale	Rigiditate cadru, masa max echipament, deflexii admisibile sub sarcina, frecvențe proprii minime	Deflexie ≤ 0,05 mm la 8 kN; masă totală ≤ 350 kg; frecvența proprie minimă se stabilește prin analiza excitațiilor procesului.
Geometrice	Gabarit total, toleranțe de poziționare ISO GPS, coaxialități, planeități, paralelisme	Exemplu didactic: gabarit ≤ 1 200 × 800 × 1 700 mm; poziția axei de presare în zonă cilindrică ⌀0,10 mm față de reperele A–B conform ISO 1101 [38]; planeitate masă ≤ 0,10 mm/m. Valorile se justifică prin proiect.
Dinamice	Vibrații transmise la fundație, frecvențe excitație vs proprii, șocuri la pornire/oprire	Exemplu didactic: accelerație RMS pe cadru ≤ 0,5 m/s^2 în banda 10–500 Hz, în punctele V1–V3; evitarea rezonanțelor în domeniul de lucru. Pragurile se validează pentru proces; ISO 20816-3 se aplică numai în domeniul său [37].
Materiale și finisaje	Clase de oțel/aliaj, tratamente termice, finisaje (vopsea, anodizare, cromare), grad de protecție IP	Exemplu didactic: cadru S355JR conform EN 10025-2:2019 [34]; sistem de acoperire pentru C3 conform ISO 12944-2/-5 [35, 36]; protecția tabloului se specifică prin cod IP conform IEC 60529 [30].
Interfețe și accesibilitate	Cote de montare, prinderi fundație, accesibilitate pentru PM, distanțe pentru întreținere	Exemple didactice: cote de prindere, spațiu de service și timpi-țintă pentru acces; valorile finale se stabilesc din layout, analiza mentenabilității și scenariile de intervenție.

Recomandare practică. În faza de elicitare, fiecare categorie din Tabelul 2.4 devine o familie de întrebări: ce sarcini și deflexii sunt admise, ce repere și toleranțe definesc geometria, ce condiții de mediu afectează finisajul și ce spațiu este necesar pentru intervenții. Lipsa răspunsului trebuie înregistrată ca ipoteză sau acțiune deschisă, nu ignorată.

2.5 Descompunerea funcțională

Cerințele bine formulate spun ce rezultate trebuie obținute. Pentru a le distribui în arhitectură este necesară descompunerea funcțională: funcția globală se divide în subfuncții suficient de clare pentru a fi atribuite unor domenii tehnice. Această logică este comună proiectării sistematice și Systems Engineering [19, 21]. În acest capitol sunt utilizate două instrumente complementare: arborele funcțional și arborele funcție–mijloace.

2.5.1 Arborele funcțional: descompunerea ierarhică a funcției globale

Arborele funcțional (engl.: Function Tree) este o reprezentare ierarhică în care rădăcina exprimă funcția globală sub forma verb + obiect, iar nivelurile următoare arată subfuncțiile necesare (Figura 2.10). Arborele trebuie să rămână, pe cât posibil, independent de soluție. Termeni precum „cilindru”, „motor” sau „senzor” apar abia când se trece la alternativele de realizare.

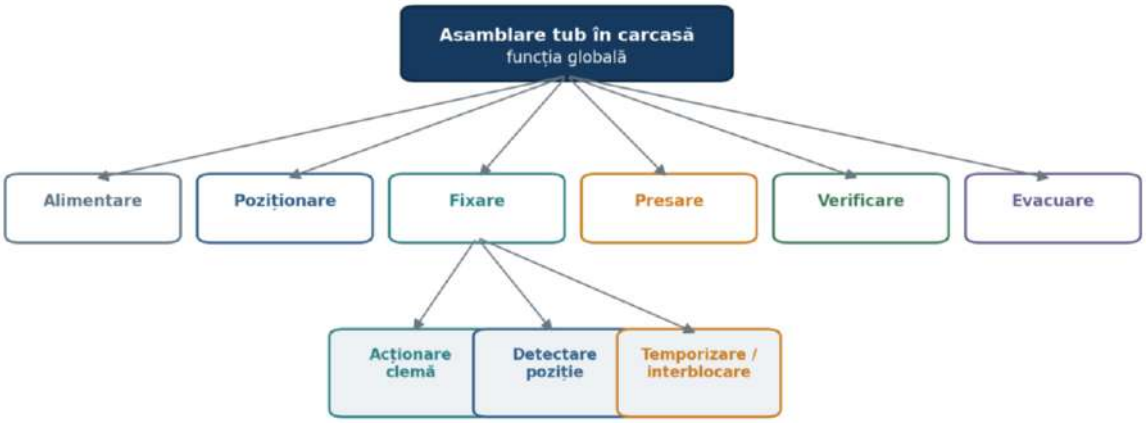


Figura 2.10. Arbore funcțional pentru stația SAP. Nivelul 0 exprimă funcția globală, nivelul 1 grupează subfuncțiile principale, iar nivelul 2 detaliază o subfuncție până la noduri atribuibile unor domenii tehnice.

În exemplul didactic sunt utilizate trei niveluri, însă adâncimea descompunerii se stabilește prin criteriul de alocare: un nod devine terminal atunci când poate fi atribuit clar unui domeniu tehnic, unei soluții sau unui criteriu verificabil.

2.5.2 Arborele funcție–mijloace: explorarea alternativelor de soluție

Arborele funcțional descrie ce trebuie realizat. Arborele funcție–mijloace (engl.: Function-Means Tree), utilizat în literatura proiectării sistematice, asociază funcțiilor alternative tehnice de realizare [19]. Axiomatic Design poate fi utilizat ulterior pentru verificarea independenței funcționale și pentru structurarea deciziilor de proiectare [20], iar metodele multicriteriale pot sprijini selecția; aceste instrumente nu trebuie confundate cu originea arborelui funcție–mijloace (Figura 2.11).

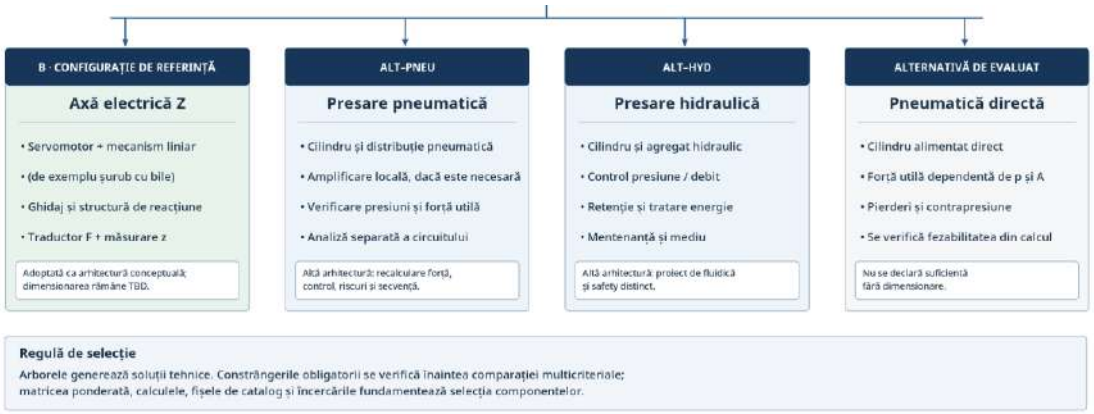


Figura 2.11. Arbore funcție–mijloace pentru presarea tubului în carcasă. Axa electrică Z este configurația de referință (B); presarea pneumatică și hidraulică sunt alternative (ALT), iar intervalul 5–8 kN reprezintă o ipoteză didactică (H). Selecția componentelor necesită calcule și verificări.

Procesul tipic de evaluare include trei pași:

- Generarea alternativelor: se propun cel puțin trei soluții distincte, pe baza experienței, analizei comparative și datelor de catalog;
- Definirea criteriilor: cost, precizie, dinamică, mentenabilitate, consum energetic, integrare și risc tehnic, cu ponderi aprobate înaintea evaluării;
- Selecția multicriterială: matrice ponderată, AHP sau altă metodă documentată; scorul nu înlocuiește verificarea constrângerilor obligatorii.

Problema 2.4. Aplicarea arborelui funcție–mijloace pentru detecția poziției tubului

Funcție-țintă: detectarea prezenței tubului în poziția corectă de fixare cu repetabilitate ≤ 0,1 mm și timp de răspuns ≤ 10 ms.

Alternative ilustrative. Valorile de precizie și timp de răspuns trebuie confirmate din fișele tehnice ale produselor selectate:

- A1. Senzor magnetic pe cilindru: confirmă poziția pistonului, nu direct poziția tubului. Soluția este simplă, dar adecvarea la cerința de repetabilitate trebuie demonstrată pe lanțul mecanic complet. DE VERIFICAT.
- A2. Senzor inductiv pe șasiu: detectează direct prezența tubului în zona de fixare. Distanța nominală, histerezisul, repetabilitatea și timpul de răspuns depind de modelul selectat. CANDIDAT PREFERAT, DE VERIFICAT.
- A3. Senzor laser de distanță: permite măsurarea directă a poziției și poate oferi rezoluție superioară, cu cost și complexitate de integrare potențial mai mari. ALTERNATIVĂ DE EVALUAT.
- A4. Cameră de viziune industrială: permite evaluarea flexibilă a poziției și a altor caracteristici, dar timpul de ciclu, iluminarea, robustețea algoritmului și costul de integrare trebuie validate. ALTERNATIVĂ DE EVALUAT.

Selecție preliminară: A2 (senzor inductiv montat direct în zona de fixare) numai dacă datele de catalog și testele pe configurația reală confirmă repetabilitatea ≤ 0,1 mm și timpul de răspuns ≤ 10 ms. Decizia se documentează în specificația tehnică de realizare împreună cu modelul, distanța nominală, histerezisul, condițiile de montaj și protocolul de validare.

> **În practică**
> Explorarea explicită a alternativelor reduce fixarea prematură pe prima soluție disponibilă. Arborele funcție–mijloace nu garantează soluția optimă, dar obligă echipa să documenteze opțiunile, criteriile și motivele eliminării lor.

2.6 Desfășurarea funcției calității (QFD): Casa Calității

Desfășurarea funcției calității (engl.: Quality Function Deployment, QFD) transpune sistematic nevoile clientului în caracteristici tehnice și face vizibile relațiile și conflictele dintre acestea [39]. Casa Calității este instrumentul matricial reprezentativ utilizat pentru această transpunere [40]. Rezultatul nu este o soluție automată, ci o justificare transparentă a priorităților tehnice.

2.6.1 Cele cinci zone ale Casei Calității

Figura 2.12 prezintă structura conceptuală a Casei Calității: matricea centrală corelează cerințele clientului cu caracteristicile tehnice, iar acoperișul evidențiază relațiile favorabile sau conflictuale dintre caracteristici.

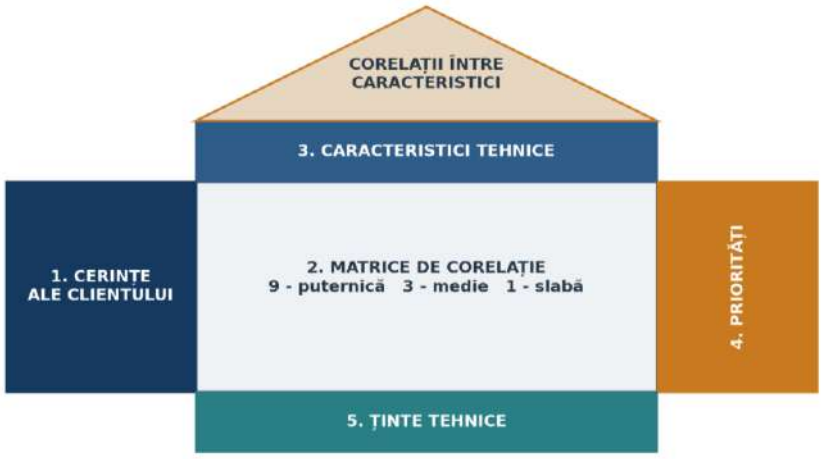


Figura 2.12. Structura conceptuală a Casei Calității. Matricea corelează cerințele clientului cu caracteristicile tehnice, iar acoperișul evidențiază relațiile favorabile sau conflictuale dintre caracteristici.

Construirea unei Case a Calității urmează cinci pași secvențiali:

- Pasul 1. Cerințele clientului (zona stângă, „CC”): lista cerințelor extrase din caietul de sarcini, exprimate în „vocea clientului” (Voice of Customer, VoC). Pentru stația SAP: cadența mare, controlul forței, repetabilitate, siguranță, ușurința mentenanței.
- Pasul 2. Caracteristicile tehnice (zona superioară, „CUM”): parametrii tehnici controlabili care influențează satisfacerea cerințelor. Pentru SAP: forța nominală, precizia traductorului, frecvența eșantionării PLC, MTBF al componentelor critice, indicele MTTR estimat.
- Pasul 3. Matricea de corelație (zona centrală): fiecare celulă (cerință × caracteristică) primește o intensitate a relației. În exemplul didactic se utilizează convenția 9–3–1 pentru relație puternică–medie–slabă; alte convenții sunt admisibile dacă sunt definite și utilizate consecvent [40].
- Pasul 4. Prioritățile cerințelor (zona dreaptă): fiecare cerință primește în exemplul didactic o pondere pe scara 1–5, stabilită împreună cu beneficiarul. Scara este o convenție de lucru, nu o cerință normativă QFD.
- Pasul 5. Scorurile de importanță și țintele tehnice (zona inferioară): pentru caracteristica j se calculează scorul relativ $S_j = \Sigma_i$ (ponderea cerinței i × intensitatea corelației i,j). Scorul este un indice adimensional de prioritizare, nu o valoare-țintă exprimată în kN, Hz sau ore. Țintele tehnice se stabilesc separat, cu unități și criterii de acceptare, din cerințe, calcule, analiză comparativă și verificare/validare. Un scor ridicat indică o caracteristică importantă pentru analiza de proiect, nu garantează automat investiția sau performanța.
- Acoperișul. Corelațiile între caracteristici: triunghiul superior identifică perechile de caracteristici care intră în conflict tehnic (ex.: „forță mare” se opune „compactitate”; „precizie ridicată” se opune „cost mic”). Conflictele explicite forțează decizii de proiectare informate.

2.6.2 Matrice QFD aplicată stației SAP

Tabelul 2.5 prezintă matricea QFD simplificată pentru SAP. Scorurile sunt indici adimensionali; țintele H/TBD se stabilesc separat. $F_{max,design}$ = 8 kN este o ipoteză a axei electrice Z, nu o performanță demonstrată sau rezultatul variantei ALT–PNEU.

Tabelul 2.5. Matrice QFD simplificată pentru stația SAP. Scorurile exprimă relații relative între cerințele clientului și caracteristicile tehnice; țintele se stabilesc separat prin calcule și validare.

Cerință client (CE)	Prio.	Forță de presare	Precizie traductor	Rată achiziție/control	MTBF	MTTR
Cadență 120 p/h	5	●	○	●	–	–
Forță 5–8 kN ± 2%	5	●	●	◐	–	–
Repetab. ±0,1 mm	4	–	●	◐	○	–
Siguranță (PLr TBD)	5	○	–	●	●	–
Ușurința mentenanței	3	–	–	–	●	●
SCOR PONDERAT	–	95	86	117	76	27
ȚINTE (H/TBD)	–	8 kN (H)	≤ 0,5 % FS	≥ 100 Hz (de validat)	≥ 30 000 h	≤ 30 min

2.6.3 Identificarea conflictelor: acoperișul Casei

Acoperișul matricii (triunghiul de corelație între caracteristicile tehnice) este zona în care emerg **conflictele de proiectare**. Pentru stația SAP, două conflicte relevante au fost identificate:

- **Forța de presare vs. compactitate (gabarit):** creșterea forței solicitate poate influența dimensiunile axei electrice Z, ale mecanismului liniar și ale cadrului. În configurația SAP de referință se verifică forța maximă, traseul reacțiunii, rigiditatea și gabaritul prin calcul și selecție de catalog; dimensiunea finală este TBD. Amplificarea presiunii și cilindrul pneumatic de presare apar exclusiv în ALT–PNEU. Un cilindru Ø50 mm la 12 bar dezvoltă teoretic aproximativ 2,36 kN, nu 8 kN.
- Frecvența de achiziție și control vs. cost: o rată mai mare poate necesita module analogice și controlere mai performante. Valoarea se stabilește din dinamica procesului și nu justifică automat utilizarea unui F-CPU, deoarece funcțiile de siguranță se proiectează separat.

> **În practică**
> În practică, amploarea Casei Calității se adaptează numărului de cerințe și caracteristici tehnice relevante. Matricea trebuie să rămână suficient de compactă pentru a fi revizuită de echipă; dacă devine greu de utilizat, cerințele pot fi grupate sau matricea poate fi descompusă pe subsisteme. Scorurile sunt instrumente de prioritizare, nu dovezi de conformitate.

2.7 De la cerințe la arhitectura de sistem

Pașii precedenți au produs o listă de cerințe verificabile, caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare, o descompunere funcțională și o matrice QFD. Ieșirea finală a capitolului este arhitectura de sistem: alocarea funcțiilor către domenii tehnice, reprezentarea interfețelor prin diagramă bloc și construirea matricei de trasabilitate.

2.7.1 Alocarea funcțiilor pe domenii fizice

În acest volum se utilizează o împărțire operațională în cinci domenii: mecanic, acționări pneumatice sau hidraulice, electric și instrumentație, control software și siguranță (Figura 2.13). Împărțirea nu este universală și se adaptează proiectului. Funcțiile multidomeniu, precum controlul forței, se descompun în măsurare, acționare, algoritm și interblocări, apoi se documentează prin cerințe de interfață.

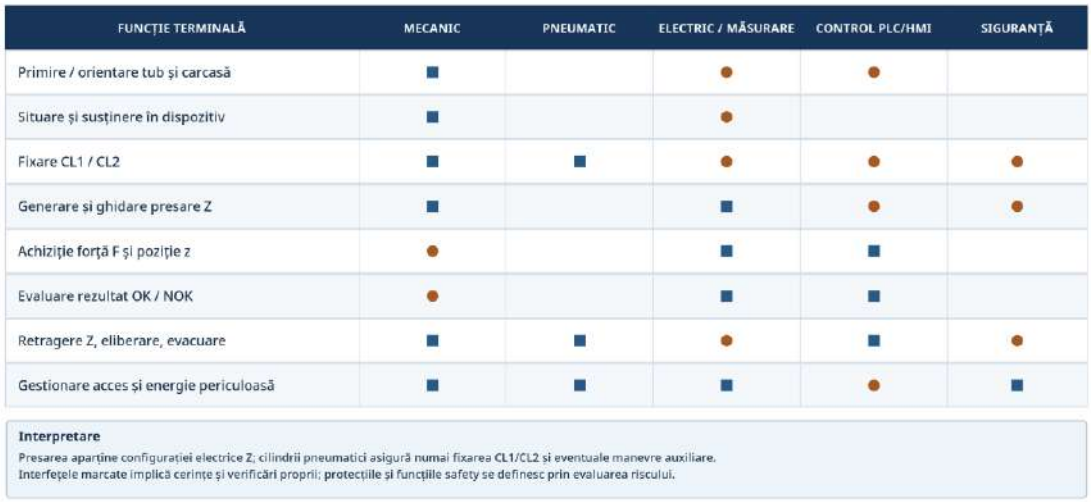


Figura 2.13. Alocarea conceptuală a funcțiilor stației SAP pe domenii tehnice. Marcajele diferențiază contribuția directă de interfețele multidomeniu; presarea se realizează pe axa electrică Z, iar CL1/CL2 asigură fixarea pneumatică.

Tabelul de alocare formală

Tabelul 2.6 alocă fiecare funcție terminală unui domeniu tehnic și îi asociază o soluție preliminară, care urmează să fie confirmată în etapele următoare ale proiectării.

Tabelul 2.6. Alocarea funcțiilor terminale pe domenii tehnice și soluții preliminare. Soluțiile devin obligatorii numai după aprobarea specificației tehnice de realizare.

ID	Funcție terminală	Domeniu primar	Soluție tehnică (rezumat)
FN-01	Alimentare piese în poziție de fixare	Mecanic	Glisieră liniară + opritor reglabil
FN-02	Fixare tub în housing	Pneumatic	2× cilindri ghidați + clemă mobilă
FN-03	Presare verticală 5–8 kN	Acționare electrică Z	Servomotor + mecanism liniar dimensionat pe F–z, cursă și regim RMS (TBD).
FN-04	Control forță în timp real	Electric + control	Traductor de forță selectat pentru 8 kN + suprasarcină; măsurare F–z și control de proces cu rată TBD.
FN-05	Detectare poziție tub fixat	Electric	Senzor inductiv standard cu interfață M12
FN-06	Comandă ciclu (start, oprire, recuperare)	Software	Diagramă GRAFCET în PLC și panou HMI de 7 in
FN-07	Oprire de urgență; reacție și PLr de stabilit prin evaluarea riscului.	Siguranță	Buton de oprire de urgență + arhitectură de siguranță conform PLr
FN-08	Semnalizare stare echipament	Electric	Turn luminos 3 culori + LED-uri HMI

2.7.2 Reprezentarea sistemică prin diagramă bloc

Tabelul de alocare evidențiază responsabilitățile funcționale. Diagrama bloc din Figura 2.14 reprezintă schematic interfețele dintre material, măsurare, acționare, control și siguranță, fără a constitui o schemă de execuție. PLC-ul coordonează procesul, iar HMI-ul asigură interacțiunea cu operatorul. Protocolul dintre PLC, I/O și drive (de exemplu PROFINET, dacă este selectat), precum și o eventuală interfață MES/OPC UA se definesc conform cerințelor proiectului (TBD), nu se presupun implementate în SAP conceptual.

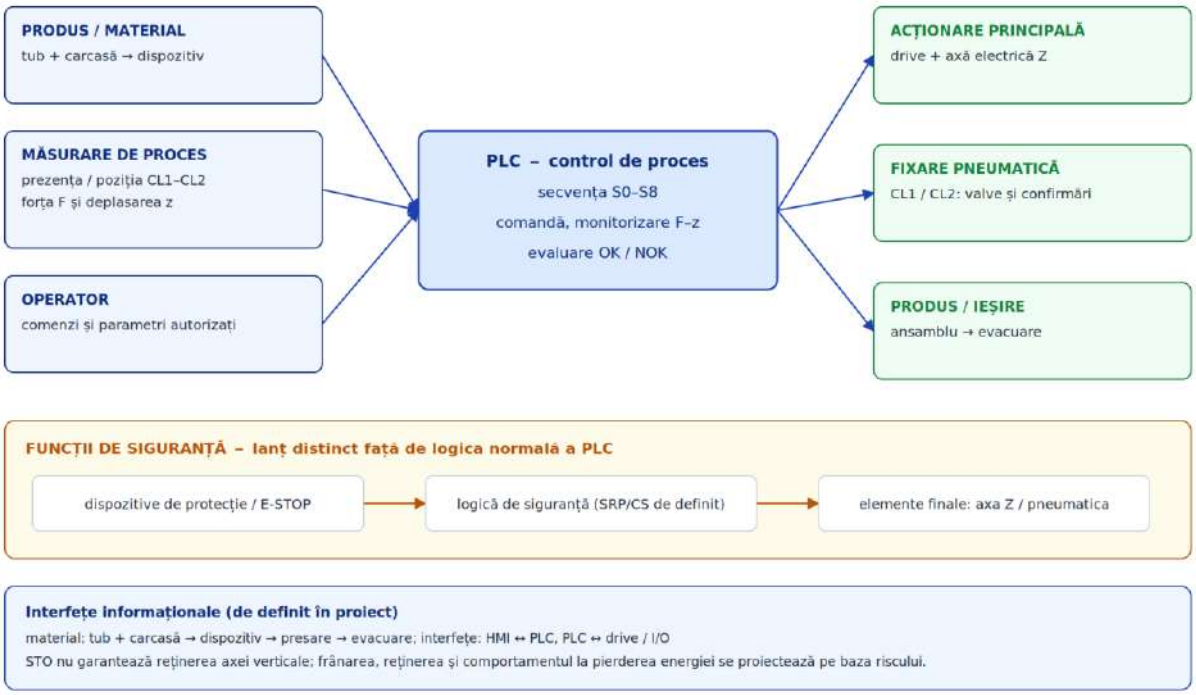


Figura 2.14. Arhitectura funcțională conceptuală a stației SAP: control de proces, acționare electrică Z, fixare pneumatică CL1/CL2 și lanț de siguranță distinct. Interfețele de comunicație și funcțiile de siguranță se definitivează prin proiectare și evaluarea riscului.

2.7.3 Trasabilitatea: lanțul nevoie–dovadă

Trasabilitatea leagă fiecare nevoie de cerința formală, soluția tehnică, componenta realizată și dovada de verificare sau validare. Relațiile de trasabilitate trebuie menținute prin identificatori unici și gestionate pe întregul ciclu de viață al informațiilor de cerințe [21, 25] (Figura 2.15).



Figura 2.15. Lanț de trasabilitate bidirecțională. Trasabilitatea directă urmărește nevoia până la dovadă; trasabilitatea inversă permite evaluarea impactului unei modificări de componentă asupra cerințelor și nevoilor inițiale.

Trasabilitatea este bidirecțională. Direct: pentru fiecare cerință se identifică soluția, componenta și testul. Invers: pentru fiecare componentă se identifică cerințele pe care le susține. Această relație este esențială la înlocuirea unui furnizor, la modificarea proiectului și la investigarea neconformităților [21, 25].

Matricea de trasabilitate

Implementarea practică ia forma unui tabel cu identificatorul cerinței, soluția din specificația tehnică de realizare, componenta, testul, rezultatul și starea aprobării. Tabelul 2.7 prezintă un extras pentru stația SAP.

Tabelul 2.7. Extras din matricea de trasabilitate a stației SAP. Stările sunt: trecut, de verificat la SAT sau în curs.

Cerință	Soluție	Componentă	Test	Status
P-02	Acționare electrică Z cu supraveghere F–z; alternativă ALT–PNEU separată.	Servo + mecanism liniar + traductor forță dimensionate/selectate (TBD).	FAT-04: 5/6/7/8 kN	De demonstrat
P-03	Senzor inductiv pe șasiu	Senzor inductiv M12 std.	FAT-05: 30 cicluri instrument digital	De demonstrat
S-01	Lanț de oprire și interblocare conform PLr	Dispozitive și logică de siguranță validate	FAT-09: calcul + test funcțional	De demonstrat
S-02	Mijloc de protecție de selectat în urma evaluării riscului; comandă bimanuală numai dacă este justificată.	Protecții și funcții de siguranță: tip/configurație TBD; selecție și validare pentru proiectul real.	Evaluare de risc, verificare și validare conform planului de test aprobat.	TBD după risc
I-02	PROFINET IO + OPC UA	Interfață PLC și model informațional	SAT-02: schimb de date cu MES	De verificat la SAT

Instrumente de gestiune

Pentru proiecte mici, un tabel controlat poate fi suficient. Pentru proiecte cu multe cerințe, variante și revizii sunt utile instrumentele de gestionare a ciclului de viață al aplicației și a cerințelor (ALM/RM), integrate cu PLM. Pragul nu este un număr fix de cerințe, ci complexitatea relațiilor, numărul de configurații și cerințele de audit.

> **În practică**
> La încheierea fazei de specificare nu trebuie să rămână cerințe fără răspuns tehnic, soluții fără cerință justificativă sau teste fără criteriu de acceptanță. Orice excepție se înregistrează ca acțiune deschisă, cu responsabil și termen.

Pentru proiectantul mecanic, trasabilitatea devine concretă atunci când o cerință de forță sau rigiditate este legată de calcul, desen, material, componentă și protocol de test (Tabelul 2.8). Corelarea nu este o formalitate: permite reproducerea configurației, evaluarea modificărilor și demonstrarea modului în care cerințele aplicabile au fost satisfăcute.

Tabelul 2.8. Exemplu de trasabilitate mecanică nevoie–cerință–specificație–desen–test pentru stația SAP.

Cerință client	Specificație componentă	Desen / cotă cu toleranță	Protocol FAT mecanic
P-02: forță de presare 5–8 kN; eroare ≤ 2 %	Axă electrică servo + mecanism liniar: forță max. ipotetică 8 kN; cuplu/cursă/RMS și traductor metrologic TBD.	Plan 02-PRS-01: axă servo, ghidaje, traseu de forță și puncte de măsurare; valori finale TBD.	Test la 5/6/7/8 kN cu dinamometru calibrat; minimum 10 cicluri pe nivel; eroare și repetabilitate raportate
R-01: deflexie cadru ≤ 0,05 mm la 8 kN	Cadru S355JR dimensionat prin calcul analitic și/sau element finit; suduri conform specificației de execuție	Plan 02-CAD-01: secțiuni, cordoane, repere și toleranța de planeitate	Măsurare cu comparatoare calibrate, în punctele stabilite, sub sarcină de 8 kN

În practica actuală, sistemele PLM pot menține legăturile dintre cerință, desen, listă de materiale și protocol de test. O modificare aprobată prin cerere de schimbare inginerească (engl.: Engineering Change Request, ECR) trebuie să declanșeze revizia tuturor artefactelor afectate. Capturarea rezultatelor FAT și SAT completează bucla nevoie–dovadă. Capitolul 13 tratează această continuitate informațională sub denumirea de fir digital (engl.: Digital Thread).

2.8 Sinteză și concluzii

Capitolul 2 a parcurs etapele esențiale ale ingineriei cerințelor, de la identificarea părților interesate și formularea enunțurilor verificabile până la arhitectură și trasabilitate. Rezultatul este un set coerent de artefacte care poate alimenta proiectarea de detaliu și poate susține verificarea, validarea și gestionarea modificărilor.

2.8.1 Recapitularea celor șapte concepte-cheie

1. Cerințele sunt fundația tehnică și contractuală. Regula 1–10–100 este o euristică pentru conștientizarea costului descoperirii tardive, nu o lege cu valori universale.
2. Părțile interesate sunt multiple și pot avea nevoi divergente. Interviul, observația directă și analiza normativă oferă dovezi complementare.
3. Taxonomia didactică verifică acoperirea, iar SMART oferă o revizuire rapidă. Acceptarea finală trebuie să includă proprietățile complete din ISO/IEC/IEEE 29148.
4. Perechea caiet de sarcini – specificație tehnică de realizare separă cerințele beneficiarului de soluția furnizorului. VDI 2519 și VDI/VDE 3694 oferă structuri de lucru, fără a înlocui contractul sau legislația.
5. Arborele funcțional descompune, iar arborele funcție–mijloace explorează alternativele. Selecția se justifică prin criterii, calcule și date de catalog.
6. QFD prioritizează relațiile dintre cerințe și caracteristici tehnice și evidențiază conflictele care necesită compromisuri explicite.
7. Trasabilitatea închide lanțul nevoie–dovadă și permite evaluarea impactului modificărilor. Obiectivul este eliminarea cerințelor fără răspuns și a soluțiilor fără justificare.

2.8.2 Întrebări de reflecție

Pentru fixarea cunoștințelor, studentul este invitat să răspundă la următoarele întrebări, cu argumentare, nu doar cu răspunsuri formale. Fiecare răspuns ar trebui să trimită explicit la un concept dezvoltat în capitol și să se sprijine pe un exemplu concret (preferabil din proiectul propriu de an).

Q1 Pentru un echipament cunoscut, identificați o cerință descoperită tardiv. Estimați costul prevenirii și costul corecției pe baza unor ipoteze explicite. Ce tehnică de elicitare ar fi redus riscul?

Q2 Reformulați cerința „echipamentul trebuie să fie ușor de folosit” într-un set de cerințe atomice, măsurabile și verificabile. Indicați părțile interesate și metodele de validare.

Q3 Elaborați un arbore funcțional pe minimum trei niveluri. Pentru fiecare nod terminal, indicați domeniul tehnic, interfețele și testul asociat.

Q4 Construiți o matrice QFD cu patru cerințe și patru caracteristici. Recalculați scorurile și justificați o pereche de caracteristici aflate în conflict.

Q5 O componentă din lista de materiale este scoasă din fabricație. Folosind matricea de trasabilitate, descrieți analiza de impact, documentele care trebuie revizuite și aprobările necesare.

2.9 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 2.1. Reformularea SMART a unei cerințe de disponibilitate și mentenabilitate

Enunț. Beneficiarul stației SAP formulează în discuția inițială: „Stația trebuie să aibă o disponibilitate bună și să fie ușor de întreținut.” Transformați formularea în trei cerințe verificabile, fiecare cu identificator, valoare-țintă, condiții de măsurare și metodă de verificare. Valorile numerice sunt didactice și se negociază cu beneficiarul.

Răspuns. O formulare posibilă este: D-01, disponibilitatea intrinsecă $A_i \geq 98\ \%$, calculată pe o fereastră de 30 de zile de producție după SAT, cu definițiile de oprire din anexa contractuală (se exclud pauzele planificate și lipsa de material); verificare prin date MES. M-01, timpul mediu de restabilire MTTR ≤ 30 min pentru lista de defecte tipice din DFMEA; verificare printr-o demonstrație de mentenabilitate la FAT, cu 10 defecte simulate. M-02, înlocuirea sculei de presare și a dispozitivului de fixare în ≤ 15 min, cu scule standard și fără demontarea apărătorilor ficși; verificare prin cronometrare la FAT. Fiecare cerință este specifică, măsurabilă și are un moment de verificare definit; „bună” și „ușor” au dispărut din specificație.

Problema 2.2. Bugetul de timp de ciclu derivat din cadența contractuală

Enunț. Caietul de sarcini cere 120 de ansambluri pe oră de timp planificat, iar beneficiarul acceptă ca țința să fie atinsă la un OEE planificat de 0,85. Determinați tactul și timpul de ciclu ideal maxim care trebuie înscris în specificația tehnică de realizare.

Răspuns. Tactul este 3600 / 120 = 30 s pe ansamblu. Dacă 120 de ansambluri trebuie obținute la OEE = 0,85, timpul de ciclu ideal nu poate depăși $30 \cdot 0{,}85 = 25{,}5$ s. În specificația tehnică de realizare se înscrie deci $t_{ciclu} \leq 25{,}5$ s în condiții nominale, iar în ciclograma din Capitolul 8 se alocă acest buget fazelor procesului. A înscrie 30 s ar însemna că orice pierdere de disponibilitate, performanță sau calitate face cadența contractuală imposibil de atins.

Problema 2.3. Cerința de exactitate a măsurării forței și raportul de incertitudine la verificare

Enunț. Cerința P-02 din Exemplul rezolvat 2.1 impune o eroare de măsurare a forței de cel mult 2 % din valoarea indicată, în domeniul 5–8 kN. (a) Determinați eroarea admisă la capetele domeniului. (b) Ce incertitudine maximă trebuie să aibă traductorul de referință folosit la FAT, dacă proiectul impune un raport de incertitudine de 4:1?

Răspuns. (a) La 5 kN eroarea admisă este 0,02 · 5000 = 100 N; la 8 kN este 160 N. (b) Cazul cel mai strict este la 5 kN: incertitudinea traductorului de referință trebuie să fie cel mult 100 / 4 = 25 N, adică 0,5 % din valoare. Verificarea se face în cel puțin trei puncte (5; 6,5 și 8 kN), iar certificatul de etalonare al traductorului de referință se atașează protocolului FAT.

Tranziția spre capitolele următoare

Capitolul 2 produce intrările pentru proiectarea de detaliu:

- Caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare: referința tehnică aprobată pentru deciziile ulterioare;
- arborele funcțional și alocarea pe domenii: distribuirea activităților către subsistemele mecanic, electric, de acționare, instrumentație și control;
- diagrama bloc: arhitectura interfețelor și comunicațiilor, detaliată ulterior în scheme și programe;
- cerințele de siguranță: intrare pentru evaluarea riscurilor, determinarea PLr și validarea funcțiilor de siguranță;
- matricea de trasabilitate: bază pentru planurile FAT și SAT și pentru controlul modificărilor.

Capitolul 3 preia cerințele mecanice și le transformă în soluții constructive: structură, ghidaje, dispozitive de fixare, toleranțe și verificări. Cerințele P-02, P-03 și cele de mediu devin date de intrare pentru calculele și desenele de execuție.

PARTEA II

Subsisteme funcționale

3 Subsistemul mecanic
4 Subsistemul electric
5 Subsistemul pneumatic și hidraulic
6 Senzori și instrumentație
7 Subsistemul de control
8 Controlul secvențial
9 Siguranța funcțională
10 Documentația tehnică și marcajul CE



3 Subsistemul mecanic

Structuri portante · ghidaje · mecanisme de transfer și presare

Despre acest capitol

Capitolul anterior a transformat nevoile beneficiarului în cerințe și într-o arhitectură de sistem trasabilă. În acest capitol, acea arhitectură începe să capete formă fizică prin subsistemul mecanic: structuri portante, ghidaje, rulmenți, transmisii, mecanisme de transfer, mecanisme de presare și dispozitive de fixare.

Deciziile mecanice impun constrângeri geometrice, de rigiditate, masă, acces și montaj asupra întregului echipament. Ele nu sunt însă dezvoltate izolat și nici strict înaintea domeniilor electric, pneumatic și de control. În spiritul dezvoltării mecatronice interdisciplinare din VDI/VDE 2206:2021, domeniile evoluează iterativ, iar interfețele dintre ele se verifică pe tot parcursul proiectării.

Capitolul urmărește trecerea de la alegerea tipologiei structurale la dimensionarea ghidajelor și rulmenților, selectarea transmisiilor și a mecanismelor de alimentare/presare, apoi la criteriile transversale de proiectare (precizie, mentenabilitate, ergonomie, toleranțe GPS/GD&T, analiză FEM și oboseală) și se încheie cu aplicația integrată SAP.

Standarde și referințe normative aplicabile

ISO 286-1:2010 și ISO 286-2:2010, sistemul ISO de toleranțe dimensionale și ajustaje [41], [42].
ISO 1101:2017 și ISO 5459:2024, toleranțe geometrice și sisteme de referință (GPS) [38], [43].
ISO 21920-1:2021 și ISO 21920-2:2021, specificarea și măsurarea texturii suprafeței [44], [45].
ISO 14728-1:2017, sarcini dinamice nominale și durabilitatea ghidajelor liniare cu rostogolire [46].
ISO 281:2007, sarcina dinamică și durabilitatea nominală a rulmenților [47].

Figura 3.1 arată locul acestui capitol în modelul V: domeniul mecanic se dezvoltă în fazele de proiectare pe domenii și de proiectare de detaliu, cu verificarea iterativă a interfețelor față de celelalte domenii.

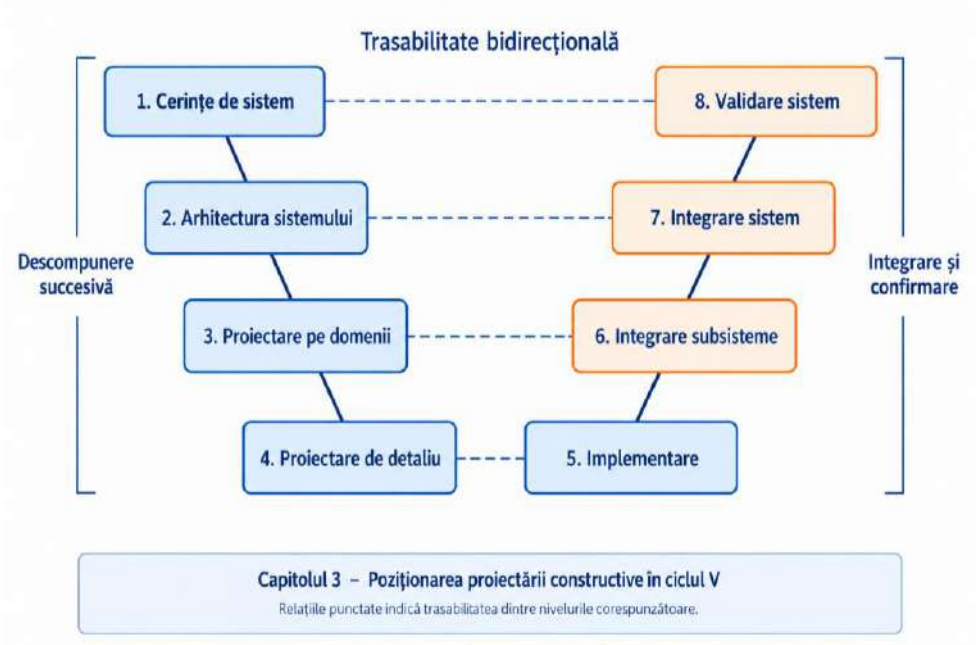


Figura 3.1. Poziționarea Capitolului 3 în modelul V. Domeniul mecanic este dezvoltat în faza de proiectare pe domenii și de proiectare de detaliu, cu verificarea iterativă a interfețelor față de domeniile electric, pneumatic și de control [1].

Harta capitolului

Capitolul este organizat în șase secțiuni didactice succesive, parcurgând ierarhia tipologică a subsistemului mecanic, de la elementul de susținere (cadrul) până la organul activ (mecanismul de presare), și încheindu-se cu aplicarea integrată pe un studiu de caz industrial (Tabelul 3.1).

Tabelul 3.1. Structura Capitolului 3.

§	Tematica	Conținut sintetic
§3.1	Structuri portante	Cadre sudate, profile aluminiu modular, construcții turnate. Roluri, materiale, criterii de selecție.
§3.2	Ghidaje liniare și rotative	Ghidaje liniare și rotative, rulmenți/lagăre, durata nominală L_{10} și transmisii mecanice de bază.
§3.3	Mecanisme de transfer și alimentare	Bowl feeders, conveioare, mese rotative cu paleți, sisteme pick-and-place.
§3.4	Mecanisme de presare și asamblare	Pneumatic, servo-electric, hidraulic și excentric. Selecție preliminară și verificare cantitativă.
§3.5	Criterii transversale de proiectare	Rigiditate, precizie, proiectare pentru mentenabilitate, ergonomie, FEM, GPS/GD&T și oboseală.
§3.6	Aplicație: echipamentul SAP	Analiza forțelor, lista mecanică de materiale (BOM), dimensionarea actuatorului și proiectarea dispozitivului de fixare.

Obiective de învățare

La finalul acestui capitol, studentul trebuie să poată:

- selecta motivat **tipologia structurală** adecvată unui echipament dat (cadru sudat, aluminiu modular, turnat), pe baza unei matrici de criterii;
- dimensiona ghidajele liniare pe baza sarcinii echivalente și a duratei nominale L_{10}, verificând baza capacității dinamice C (50 km sau 100 km) în catalogul seriei selectate și alegând clasa de precizie/precomprimare adecvată aplicației;
- selecta rulmenți și transmisii mecanice (șurub–piuliță cu bile, curea dințată, lanț) pe baza sarcinii, vitezei, rigidității, jocului, duratei nominale și cerințelor de mentenanță;
- compara (pe criteriile de cadență, flexibilitate, cost, spațiu și complexitate) cele patru **soluții de alimentare/transfer** (bowl feeder, conveior, masă rotativă, pick-and-place);
- selecta componente mecanice pe baza standardelor și a documentației tehnice actuale de catalog, justificând alegerea prin parametri verificabili și nu prin reputația unei mărci comerciale;
- evalua compromisul **cost / performanță** al deciziilor mecanice cu trasabilitate în caietul de sarcini.

Cunoștințe prealabile

Capitolul presupune cunoștințe de rezistența materialelor, organe de mașini, toleranțe și ajustaje la nivelul cursurilor de licență, precum și cerințele și descompunerea funcțională a echipamentului din Capitolul 2.

Glosar de termeni și acronime

Acest capitol introduce mai multe simboluri și acronime care vor apărea recurent atât în text, cât și în figuri și exemple rezolvate (Tabelul 3.2).

Tabelul 3.2. Glosar de termeni, simboluri și acronime utilizați în Capitolul 3.

Simbol	Denumire / unitate	Sens în context
L_{10}	durata nominală (km)	durata asociată unei fiabilități de 90 %; pentru ghidaje se calculează cu baza de viață corespunzătoare definiției lui C din catalog
C	capacitate dinamică de bază (N)	parametru de catalog utilizat în calculul duratei; baza poate fi 50 km sau 100 km, în funcție de producător/serie
P	sarcină echivalentă (N)	sarcina dinamică efectivă pe patină, derivată din analiza forțelor
μ	coef. de frecare (-)	coeficient de frecare; valoarea se preia din catalog/încercări pentru perechea tribologică și condițiile reale
k^*	rigiditate specifică ($m^2 \cdot s^{-2}$)	raportul E/ρ, măsură intrinsecă a materialului
f_1	prima frecvență proprie (Hz)	prima frecvență proprie; se compară cu spectrul excitațiilor mecanice relevante, nu doar cu cadența de producție
T-slot	engl.: T-slot, canal în T	interfață de fixare pentru profile extrudate; compatibilitatea accesoriilor se verifică pe seria și geometria canalului

Simbol	Denumire / unitate	Sens în context
BOM	Bill of Materials: listă structurată de materiale/componente pentru configurația controlată; conținutul și nivelul de detaliu depind de procesul organizației.	lista de materiale/componente a ansamblului, cu identificator, cantitate și date de aprovizionare
DfM	engl.: Design for Maintainability	proiectare pentru mentenabilitate; în alte surse DfM poate desemna Design for Manufacturing, de aceea sensul trebuie precizat
MTBF	engl.: Mean Time Between Failures (h)	timpul mediu între defectări pentru elemente reparabile, utilizat ca indicator de fiabilitate
FEM	engl.: Finite Element Method	metoda elementelor finite, analiză numerică structurală, modală, termică sau la oboseală
SAT	engl.: Site Acceptance Test	test de acceptanță la amplasamentul beneficiarului

3.1 Structuri portante

În aceeași organizație industrială pot coexista stații de serie construite pe cadre sudate și standuri de prototip realizate din profile modulare de aluminiu. Diferența nu rezultă din preferința proiectantului, ci din forța de proces, rigiditatea cerută, mediul de lucru, durata de exploatare și necesitatea de reconfigurare. Aceleași familii de actuatoare și senzori pot fi montate pe structuri complet diferite dacă cerințele de sistem o impun.

Răspunsul ține de o decizie arhitecturală de proiectare luată cu mult timp înainte de a se cumpăra primul șurub: **volumul de producție**, **forța de proces** și **orizontul de reconfigurare** al echipamentului. Această secțiune sistematizează cele trei tipologii structurale principale folosite în industria europeană a echipamentelor de fabricație și criteriile pe baza cărora se face alegerea.

3.1.1 Cele patru funcții ale structurii portante

Indiferent de tipologie, orice cadru de echipament îndeplinește simultan patru funcții independente, fiecare cu propriul indicator de performanță:

- Rigiditate statică: limitarea deformației elastice sub sarcina de lucru. Deformația admisibilă se alocă din bugetul de toleranțe al funcției, nu printr-o regulă universală. Pentru exemplul didactic de presare la F = 8 kN se adoptă δ_{adm} = 0,05 mm, astfel încât deformația structurii să consume numai o parte controlată din toleranța totală de poziționare a procesului.
- Rigiditate dinamică: separarea frecvențelor proprii ale structurii de componentele dominante ale excitației. Cadența de 120 piese/oră înseamnă 2 piese/min, adică aproximativ 0,033 Hz, nu 2 Hz. În practică, excitațiile critice provin frecvent din șocuri pneumatice, dezechilibre de motor, vibratoare, treceri peste role sau armonici ale mișcărilor; de aceea verificarea modală se raportează la spectrul real al excitațiilor.
- **Stabilitate termică**: minimizarea sau compensarea dilatărilor în funcționare. Coeficientul de dilatare liniară este ≈ 12 $\mu m \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pentru oțel și ≈ 23 $\mu m \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pentru aluminiu: pe un cadru de 1 m, o variație termică de 10 K produce 0,12 mm la oțel și 0,23 mm la aluminiu.
- **Platforma de montaj**: suprafețele de referință pe care se fixează ghidajele și actuatoarele trebuie să fie plane, paralele și perpendiculare conform toleranțelor cerute. O deviație de 0,1 mm la planeitate se va regăsi în zigzag-ul mișcării ghidajelor, și nu poate fi corectată software.

Cele patru funcții ale structurii portante, care trebuie îndeplinite simultan, sunt reprezentate sintetic în Figura 3.2.



Figura 3.2. Cele patru funcții simultane ale structurii portante. Rigiditatea dinamică se verifică față de excitațiile dominante ale echipamentului, iar rigiditatea specifică E/ρ este doar un indicator de material; geometria secțiunii și îmbinările controlează comportamentul ansamblului.

Exemplul rezolvat 3.1. Verificarea rigidității statice a unui profil de cadru sub sarcina de presare

Se consideră, ca model conservativ de primă verificare, un profil tubular pătrat 80 × 80 × 4 mm din S235JR, cu deschiderea L = 800 mm, simplu rezemat și încărcat în centru cu F = 8 kN. Se verifică limita de deformație δ_{adm} = 0,05 mm.

Date. Pentru un tub pătrat idealizat, cu colțuri drepte și grosime uniformă de 4 mm (latura exterioară 80 mm; latura interioară 72 mm), momentul de inerție axial al secțiunii este:

$$I = \frac{80^4 - 72^4}{12} \approx 1{,}174 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \tag{3.1}$$

Pentru un profil comercial real se folosesc proprietățile secțiunii din catalog, inclusiv efectul razelor de colț. E = 210 GPa = 2,1 × 10^5 N/mm^2.

Calcul. Pentru modelul de grindă simplu rezemată, săgeata maximă la mijlocul deschiderii este:

$$\delta_{\max} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{8\,000 \cdot 800^3}{48 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5 \cdot 1{,}174 \cdot 10^6} \approx 0{,}346 \text{ mm} \tag{3.2}$$

Rezultatul corespunde modelului idealizat; în calcul s-a utilizat valoarea nerotunjită I = 1,173845 × 10^6 mm^4.

Concluzie. 0,346 mm > 0,05 mm ⇒ profilul izolat NU satisface criteriul didactic adoptat în această schemă simplificată. Rezultatul nu demonstrează că întregul cadru este necorespunzător, deoarece continuitatea nodurilor și elementele paralele modifică rigiditatea; el arată însă că secțiunea 80 × 80 × 4 nu poate fi declarată suficientă fără un model structural complet. Soluțiile sunt creșterea momentului de inerție, reducerea deschiderii, introducerea de traverse/rigidizări și validarea prin FEM sau calcul de cadru.

3.1.2 Cadre sudate din oțel structural

Cadrele sudate din profile de oțel structural reprezintă o soluție consacrată pentru structurile portante ale echipamentelor de fabricație. Geometria poate utiliza profile închise, plăci și rigidizări dispuse astfel încât traseul forțelor și rigiditatea ansamblului să satisfacă cerințele proiectului (Figura 3.3). Suprafețele funcționale destinate ghidajelor și meselor pot necesita prelucrare după sudare pentru a compensa deformațiile de fabricație; toleranțele finale se stabilesc din cerința funcțională și din specificațiile componentelor montate.

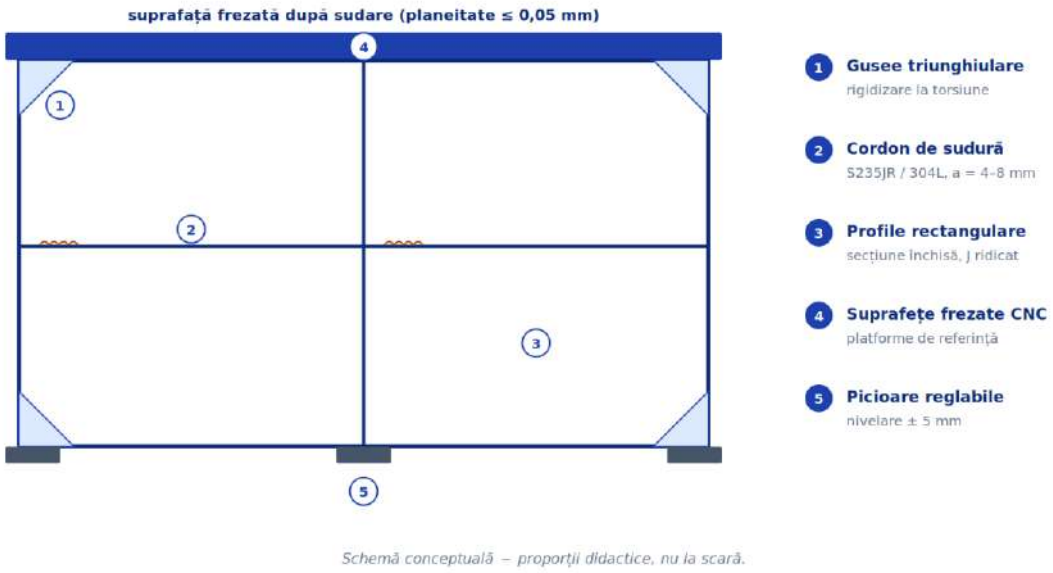


Figura 3.3. Anatomia unui cadru sudat din oțel structural. Sunt evidențiate suprafețele prelucrate după sudare, rigidizările locale și secțiunile închise utilizate pentru controlul rigidității și al geometriei ansamblului.

Materiale uzuale

Tabelul 3.3 compară materialele uzuale pentru cadrele sudate; nivelurile de cost sunt comparative și se confirmă prin ofertă.

Tabelul 3.3. Materiale uzuale pentru cadre sudate. Nivelurile de cost sunt comparative; prețul real depinde de formă, cantitate, certificare, finisaj și momentul achiziției și se validează prin ofertă [34].

Material	Tip	Cost relativ orientativ	Aplicație tipică
S235JR	oțel carbon standard	scăzut	Structuri industriale generale; bun raport rigiditate/cost.
S355JR	oțel structural cu rezistență ridicată	scăzut–mediu	Sarcini sau constrângeri de masă/secțiune mai exigente; selecția se verifică structural.
AISI 304 / 304L	inox austenitic	ridicat	Medii umede, cerințe de igienă sau protecție anticorozivă; finisajul și sudabilitatea se specifică.
AISI 316 / 316L	inox cu Mo	foarte ridicat	Medii cu cloruri sau coroziune severă, când analiza mediului justifică materialul.

Avantaje și limitări

Avantajele cadrului sudat sunt capacitatea de a obține secțiuni portante rigide, integrarea facilă a rigidizărilor și disponibilitatea largă a semifabricatelor. Comportamentul dinamic nu se deduce numai din material: amortizarea și rigiditatea ansamblului depind de geometrie, îmbinări, cordoanele de sudură, masa distribuită și condițiile de rezemare. Pentru sarcini mari, cadrele sudate din oțel sunt frecvent competitive, dar alegerea față de aluminiu modular sau o bază turnată se justifică prin calcul de rigiditate, stabilitate, masă, precizie și cost de ciclu de viață, nu printr-un prag universal de forță.

Limitările țin de masa mai mare față de soluțiile din aliaje ușoare, de flexibilitatea redusă la modificări după sudare și de necesitatea controlului deformațiilor de fabricație. Suprafețele

funcționale pot necesita prelucrare ulterioară. Pentru oțelurile carbon, sistemul de protecție anticorozivă se selectează în funcție de mediul de expunere și de durata de viață proiectată, în acord cu cerințele aplicabile [35], [36].

În practică

Pentru cadrele sudate care susțin ghidaje liniare, prelucrarea suprafețelor de montaj după sudare trebuie prevăzută atunci când bugetul de toleranțe și documentația ghidajului o cer. Adaosul de prelucrare, planeitatea și paralelismul nu au valori universale: se stabilesc din deformațiile estimate ale structurii, procesul de fabricație și cerințele seriei de ghidaj selectate [48], [49].

3.1.3 Profile modulare din aluminiu extrudat

A două tipologie majoră este construcția din profile extrudate de aluminiu cu canale în T. Există ecosisteme industriale mature de profile, conectori, plăci și accesorii modulare, utilizate pe scară largă la standuri, protecții, transportoare și echipamente de asamblare reconfigurabile. Compatibilitatea nu trebuie însă presupusă numai din dimensiunea nominală a canalului: se verifică geometria profilului, seria de conectori, toleranțele și condițiile de montaj definite de producător (Figura 3.4).

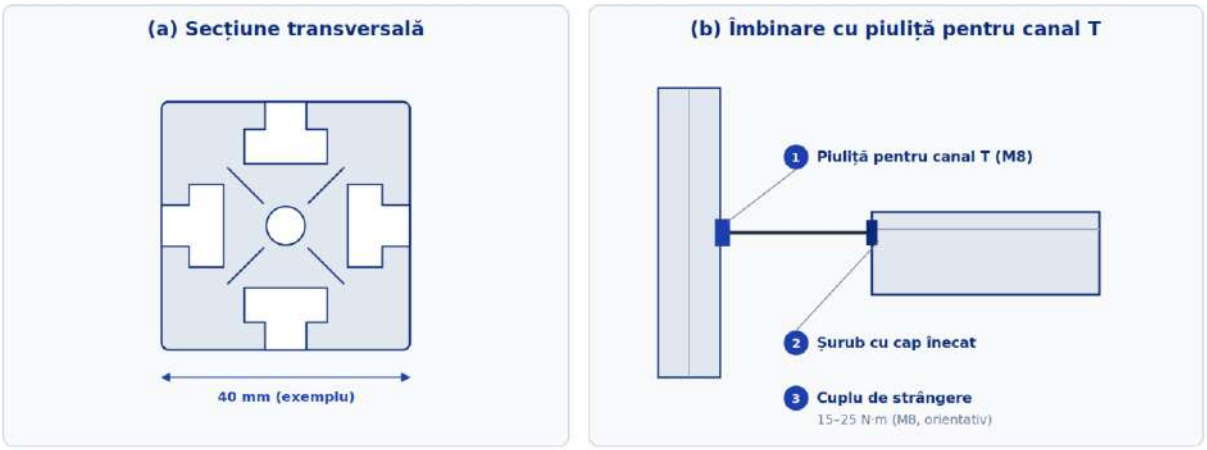


Figura 3.4. Profile extrudate de aluminiu cu canale T: secțiunea transversală tipică (a) și principiul de fixare cu piuliță T (b). Geometria canalului, dimensiunea profilului și compatibilitatea accesoriilor sunt specifice familiei de produs și se verifică în catalogul producătorului.

Principiul constructiv

Profilele extrudate pot avea canale T pe mai multe fețe, permițând conectarea prin piulițe, șuruburi și elemente de legătură dedicate. Cuplurile de strângere și capacitatea îmbinărilor nu se transferă între serii: ele se preiau din documentația producătorului și se verifică pentru combinația concretă profil–conector–șurub și pentru solicitările aplicației.

Spre deosebire de cadrul sudat, geometria este **reconfigurabilă**: un profil greșit poziționat se demontează prin slăbirea câtorva șuruburi și se mută. Aceasta este o calitate esențială a aluminiului modular pentru prototipuri, echipamente de laborator, gard perimetral la celule robotizate și echipamente de asamblare cu reconfigurare frecventă.

Limitări de rigiditate

Pentru aceeași rigiditate la încovoiere, un profil de aluminiu trebuie să aibă o secțiune *mai mare* decât echivalentul de oțel, consecință directă a faptului că modulul de elasticitate al aluminiului ($E_{Al} \approx 70$ GPa) este aproximativ o treime din cel al oțelului ($E_{oțel} \approx 210$ GPa). Acest dezavantaj este parțial compensat de faptul că secțiunile profilelor extrudate sunt deja optimizate prin nervurile diagonale interne (vizibile în figura 3.4a), care ridică momentul de inerție *I* aproape până la nivelul unei țevi pătrate de oțel cu același gabarit exterior.

În practică, comparația dintre un cadru din aluminiu modular și unul din oțel trebuie făcută prin rigiditatea globală E·I, rigiditatea nodurilor și masa ansamblului, nu numai prin dimensiunea exterioară a profilului. Un profil de aluminiu poate compensa parțial modulul de elasticitate mai redus printr-un moment de inerție mai mare și prin geometrie nervurată, dar îmbinările demontabile rămân adesea elementul limitativ.

În practică

Îmbinările demontabile ale profilelor modulare trebuie verificate la solicitările ciclice și la vibrațiile aplicației. Se utilizează conectorii, elementele de asigurare și cuplurile de strângere indicate de producător; intervalele de reinspecție se stabilesc din criticitate și din planul de mentenanță, nu printr-un termen universal.

3.1.4 Construcții turnate sau frezate dintr-o piesă

A treia tipologie folosește baze turnate, structuri din fontă, aluminiu turnat sau compozite minerale, precum și piese masive frezate. Aceste soluții sunt justificate atunci când rigiditatea, amortizarea, stabilitatea termică și precizia suprafețelor de referință au prioritate față de masă, timp de fabricație și reconfigurabilitate. Sunt tipice pentru mașini-unelte, metrologie și echipamente de precizie.

Avantajele potențiale sunt rigiditatea ridicată, amortizarea structurală și stabilitatea geometrică după prelucrare. Valorile efective depind însă de material, geometrie, tratament termic, proces de turnare și modul de rezemare; nu există un factor universal de tip „5–10 ori mai rigid” aplicabil tuturor comparațiilor. Dezavantajele rămân costul, masa, timpul de execuție și flexibilitatea redusă la modificări.

În practică

Bazele turnate, mineral-cast sau frezate dintr-o piesă se justifică atunci când cerințele de rigiditate, amortizare, stabilitate geometrică și precizie nu pot fi satisfăcute economic printr-un cadru sudat sau modular. Nu există un prag universal de precizie sau de volum; alegerea se susține prin bugetul de toleranțe, analiza dinamică, costul total și posibilitatea de modificare pe durata de viață.

3.1.5 Criterii de selecție: o matrice multicriterială

Cele trei tipologii prezentate au domenii de aplicabilitate distincte, dar se suprapun parțial: o multitudine de echipamente pot fi realizate, principial, în oricare dintre cele trei. Decizia de proiectare nu este, prin urmare, una „categorică”, ci **multicriterială**: se evaluează simultan rigiditatea, greutatea, precizia, flexibilitatea, costul, timpul de execuție și amortizarea pe o scară comparabilă, apoi se alege tipologia cu profilul cel mai potrivit aplicației (Figura 3.5).

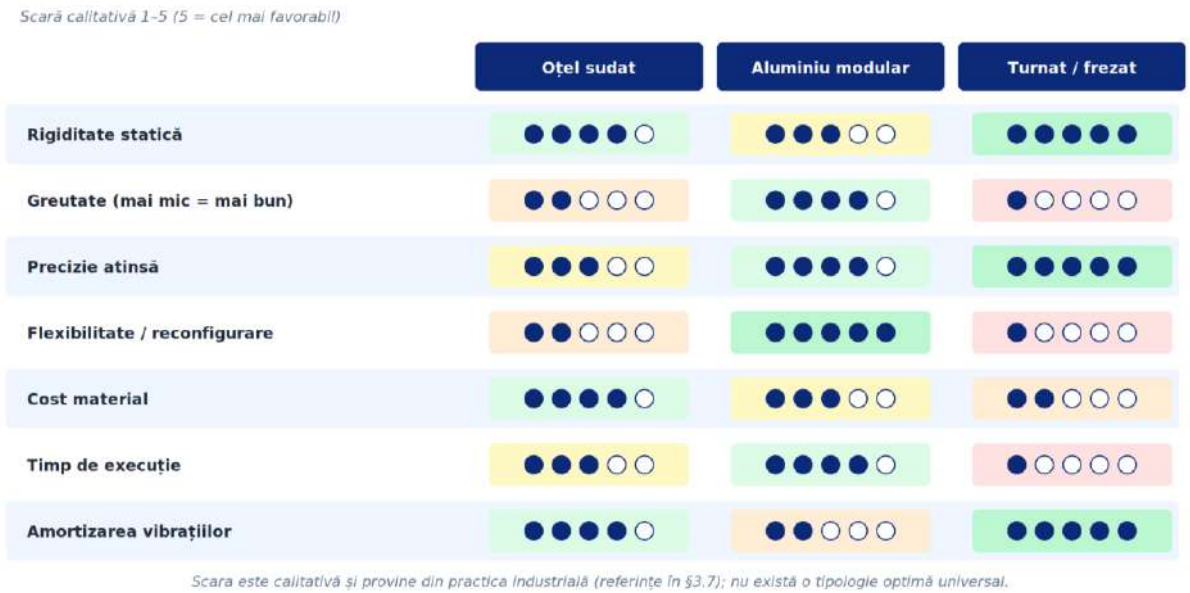


Figura 3.5. Comparație multicriterială pe șapte axe între cele trei tipologii structurale. Fiecare tipologie are profilul ei caracteristic: oțelul sudat este echilibrat, aluminiul modular câștigă la flexibilitate și greutate, iar turnatul domină la rigiditate și precizie cu costul flexibilității.

Criterii de decizie operaționale

În practica industrială, decizia se ia parcurgând următoarele criterii, în ordinea descrescătoare a importanței:

1. Forța și traseul de reacțiune. Forța de proces este un criteriu major, dar pragurile nu sunt universale. Se verifică traseul de închidere a forțelor, rigiditatea globală, stabilitatea îmbinărilor și deformația admisibilă; aluminiul modular poate fi adecvat unor sarcini mari dacă geometria și îmbinările sunt dimensionate, iar un cadru sudat poate fi insuficient dacă traseul forțelor este nefavorabil.
2. Cerința de precizie sub sarcină. Tipologia se alege după bugetul de erori: deformarea structurii, toleranțele suprafețelor, jocurile îmbinărilor și variațiile termice. Pragurile de 0,05 mm sau 0,5 mm sunt orientative și trebuie raportate la dimensiunea și funcția echipamentului.
3. Volumul și maturitatea proiectului. Prototipurile și echipamentele cu modificări frecvențe favorizează soluțiile modulare; seriile stabilizate pot justifica structuri sudate sau turnate. Decizia economică se bazează pe costul total al proiectării, fabricației, modificărilor și reutilizării, nu pe un prag fix de bucăți/an.
4. **Necesitatea de reconfigurare în timp.** Produs care se schimbă lunar/anual → aluminiu modular. Produs fix pe 5–10 ani → sudat sau turnat.
5. Mediul de lucru. Materialul și protecția suprafeței se selectează după coroziune, igienă, agenți de curățare, temperatură și contaminare. Inoxul poate fi necesar în anumite aplicații, dar alegerea AISI 304/316 nu este automată și trebuie corelată cu mediul și cerințele de conformitate.

În practică

Argumentați în raportul tehnic (Livrabilul L5 al cursului) tipologia structurală aleasă pentru proiectul propriu, pe baza acestor cinci criterii. Un argument bine construit conține întotdeauna numere concrete: forța maximă (kN), precizia cerută (mm), volumul de producție (buc./an) și orizontul de utilizare (ani). Răspunsul „am ales aluminiu pentru că este modern” nu este o decizie tehnică, ci o preferință personală, și va fi punctat ca atare.

3.2 Ghidaje liniare și rotative

Într-o linie multistație, precizia de oprire și stabilitatea geometrică nu sunt determinate numai de servomotor sau de algoritmul de control. Ghidajele, rulmenții, suprafețele de montaj și rigiditatea mecanică formează lanțul fizic care transformă comanda în poziție repetabilă. De aceea dimensionarea se face din sarcini, momente, viteză, durată de viață, precizie de montaj și condiții de lubrifiere.

3.2.1 Ghidaje liniare cu bile recirculante

Ghidajele profilate cu elemente de rostogolire recirculante sunt una dintre soluțiile dominante pentru mișcări liniare de precizie în automatizare și mașini. Ansamblul este format din șină și patină, cu circuite interne de bile sau role care recirculă și preiau sarcini în mai multe direcții. Performanța depinde de geometria contactului, precomprimare, montaj, lubrifiere și rigiditatea suportului [46].

Figura 3.6 prezintă anatomia unui ghidaj liniar cu bile recirculante, în care elementele de rostogolire circulă în bucle închise între zona încărcată și canalele de recirculare.

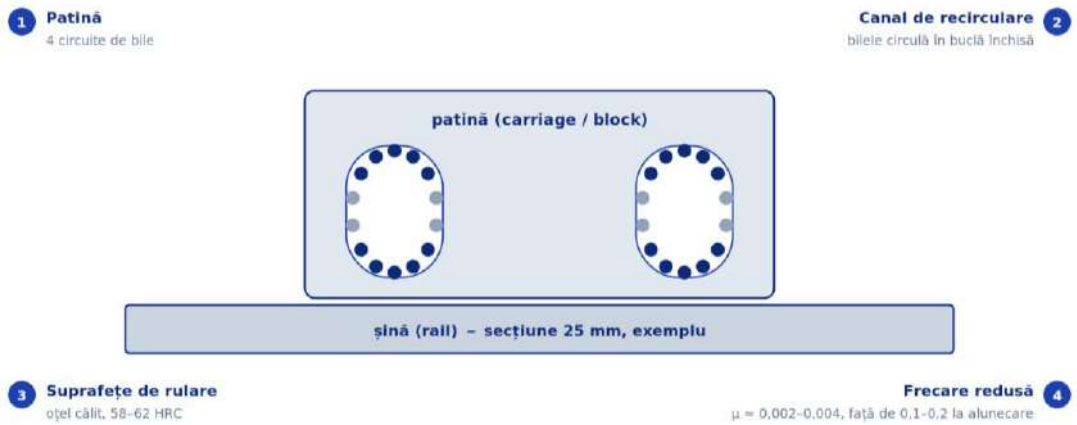


Figura 3.6. Ghidaj liniar cu bile recirculante: anatomie. Elementele de rostogolire circulă în bucle închise între zona încărcată și canalele de recirculare. Materialul, tratamentul termic și duritatea căilor de rulare sunt specifice seriei și se verifică în documentația producătorului [48], [49].

Față de ghidajele cu alunecare, ghidajele cu elemente de rostogolire au frecare redusă și permit precomprimare controlată. Valorile efective ale frecării, jocului și duratei depind de serie, lubrifiere, etanșare, sarcină și precizia montajului; prin urmare, cifrele de catalog trebuie utilizate în locul unor valori universale.

- forțele de acționare pot fi semnificativ mai mici decât la ghidajele cu alunecare, dar dimensionarea actuatorului trebuie să includă accelerația, rezistențele de etanșare, precomprimarea și sarcinile externe;
- durata nominală poate fi foarte mare dacă sarcina echivalentă, lubrifierea, contaminarea și montajul sunt controlate;
- jocul și rigiditatea se mențin în limitele proiectate numai dacă precomprimarea și condițiile de montaj sunt respectate pe întreaga durată de exploatare.

Producători de referință

Exemple de furnizori utilizați frecvent în aplicații industriale sunt THK, Bosch Rexroth, Schaeffler și HIWIN. Pentru proiectare nu se selectează „marca”, ci seria și dimensiunea care satisfac capacitatea

statică/dinamică, momentele admisibile, precizia, precomprimarea, etanșarea și condițiile de lubrifiere documentate în catalog.

3.2.2 Dimensionare: durata nominală L_{10}

Dimensionarea unui ghidaj liniar pornește de la ISO 14728-1:2017 și de la definițiile catalogului producătorului. Pentru ghidajele cu bile, durata nominală L_{10} este proporțională cu $(C/P)^3$. Este esențială însă baza folosită pentru capacitatea dinamică C: unele serii o definesc pentru o durată de referință de 50 km, altele pentru 100 km. Formula numerică trebuie scrisă în aceeași bază în care este declarat C [46]–[49].

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot 50\ \text{km} \quad (\text{C definit la baza de } 50\ \text{km}) \tag{3.3}$$

Exponentul 3 este specific contactelor cu bile; pentru ghidajele cu role, exponentul utilizat de catalog poate fi diferit. Sensibilitatea la sarcină rămâne majoră: o creștere a sarcinii echivalente reduce puternic durata nominală, iar momentele și distribuția neuniformă între patine trebuie incluse în calcul (Figura 3.7).

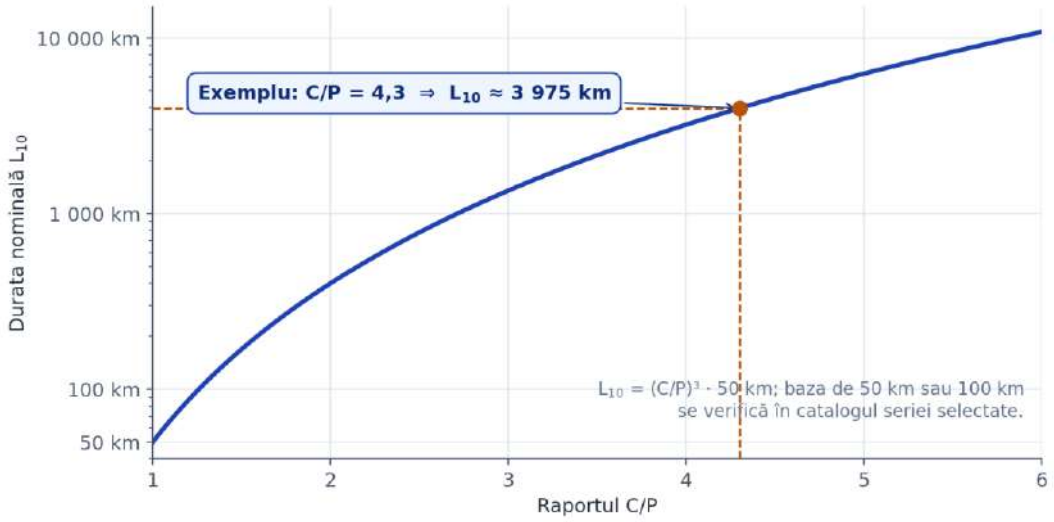


Figura 3.7. Relația dintre raportul C/P și durata nominală L_{10} pentru exemplul unei serii cu capacitatea dinamică C definită la baza de 50 km. Durata în ani se obține numai după calculul cursei cumulate reale; baza de 50 km/100 km se verifică în catalog.

Algoritm de dimensionare în patru pași

Dimensionarea unui ghidaj liniar urmează patru pași succesivi:

1. **Pasul 1. Analiza sarcinilor.** Construirea diagramei corpului liber pentru patină: forțe verticale (greutatea sarcinii + reacțiunile la procesul de lucru), forțe laterale, momente. Pe ansamblul „două șine + patru patine” se distribuie sarcina conform geometriei (cea mai încărcată patină determină dimensionarea).
2. **Pasul 2. Selectarea preliminară a seriei și dimensiunii**. Se alege o familie de ghidaje care admite sarcina, momentele și viteza cerute. Dimensiunea nominală nu se selectează printr-o regulă generică, ci din capacitățile și limitele seriei concrete [48], [49].
3. **Pasul 3. Verificarea durabilității**. Se calculează L_{10} în baza corectă și se compară cu cursa cumulată cerută:

$$L_{\text{cerut}} = \frac{2 \cdot s \cdot N_c \cdot 60 \cdot h_z \cdot z_{an} \cdot a}{1\,000} \quad [\text{km}] \tag{3.4}$$

unde s este cursa [m], N_c, numărul de cicluri pe minut, h_z, orele de funcționare pe zi, z_{an}, zilele lucrătoare pe an, iar a, durata cerută [ani]. Durata țintă trebuie derivată din profilul real de exploatare, nu dintr-un prag generic în kilometri.

4. **Pasul 4. Selectarea clasei de precizie și a precomprimării.** Detaliată în secțiunea următoare.

Exemplul rezolvat 3.2. Dimensionarea duratei nominale a unui ghidaj liniar

O stație manipulează un cărucior pe o cursă de 800 mm, cu 4 cicluri/min, 16 h/zi și 250 zile/an. Sarcina dinamică echivalentă pe patina cea mai solicitată este P = 1 800 N. Se cere $L_{10} \geq 5\,000$ km și se utilizează, în acest exemplu, o familie de ghidaje în care C este definit la baza de 50 km.

Pasul 1. Cursă cumulată anuală. Un ciclu complet înseamnă 1,6 m. Cursa cumulată anuală este:

$$L_{\text{an}} = 4 \cdot 60 \cdot 16 \cdot 250 \cdot 1{,}6\ \text{m} \approx 1\,536\ \text{km/an} \tag{3.5}$$

5 000 km corespund la aproximativ 3,3 ani, nu la 8 ani.

Pasul 2. Raport necesar.

$$\left(\frac{C}{P}\right)^3 = \frac{5\,000}{50} = 100 \Rightarrow \frac{C}{P} = 4{,}64 \Rightarrow C_{\min} \approx 8{,}36\ \text{kN} \tag{3.6}$$

Pasul 3. Selecție. Se alege din catalog o patină/șină pentru care C ≥ 8,36 kN și se verifică separat capacitatea statică, momentele, precomprimarea, precizia și montajul. De exemplu, pentru o variantă de catalog cu C ≈ 14 kN, rezultă:

$$L_{10} \approx \left(\frac{14\,000}{1\,800}\right)^3 \cdot 50 \approx 23\,500\ \text{km} \tag{3.7}$$

Valoarea corespunde la aproximativ 15 ani la profilul de exploatare calculat.

Concluzie. Dimensionarea corectă transformă cerința de durată în C_{min} și apoi verifică toate constrângerile de catalog; alegerea unei mărci sau a unei lățimi de șină fără acest calcul nu este suficientă.

3.2.3 Clase de precizie și precomprimare

Două caracteristici complementare ale ghidajului trebuie alese după dimensionarea capacității: **clasa de precizie** (care fixează toleranțele dimensionale și paralelismul șinei) și **nivelul de precomprimare** (care fixează jocul rezidual între bile și pistele de rulare).

Clase de precizie standardizate

Nomenclaturile claselor de precizie sunt similare ca logică, dar nu sunt universal identice între producători. Tabelul 3.4 trebuie citit ca exemplu didactic; toleranțele exacte și metoda de montaj se verifică în catalogul seriei selectate.

Tabelul 3.4. Exemplu conceptual de niveluri de precizie pentru ghidaje profilate. Denumirile claselor și toleranțele sunt specifice producătorului și seriei; valorile se verifică în catalog [48], [49].

Clasa	Toleranță poziție	Paralelism șină	Domeniu de aplicabilitate tipic
N: Normal	nivel de bază; valori specifice seriei	cerințe de montaj/paralelism din catalog	Manipulare și transfer când ghidajul nu este factorul limitativ.
H: High	toleranțe mai stricte decât nivelul normal	cerințe de montaj mai stricte	Asamblare și poziționare cu cerințe intermediare de precizie.
P: Precision	nivel de precizie; denumirea diferă între producători	montaj și referințe controlate conform catalogului	Aplicații în care bugetul de erori justifică o clasă superioară.

Clasa	Toleranță poziție	Paralelism șină	Domeniu de aplicabilitate tipic
SP: Super Precision	nivel superior, dacă seria îl oferă	cerințe stricte de montaj și suport	Metrologie sau axe de precizie; selecția se validează prin bugetul de toleranțe.

Niveluri de precomprimare

Precomprimarea (engl.: preload) este o încărcare internă controlată între elementele de rostogolire și căile de rulare. Ea reduce jocul și crește rigiditatea, dar mărește forțele interne și poate reduce durata nominală; valorile procentuale și codurile de precomprimare sunt specifice seriei (Tabelul 3.5).

Tabelul 3.5. Exemplu conceptual de niveluri de precomprimare. Denumirile, codurile și valorile sunt specifice producătorului/seriei; selecția se face din cerința de rigiditate, frecare, durată și precizie [48], [49].

Nivel	Caracteristică	Aplicație recomandată
fără precomprimare / joc controlat	joc și frecare conform seriei	Transport sau mișcări la care jocul admis este compatibil cu cerința funcțională.
precomprimare ușoară	joc redus și creștere moderată a rigidității	Aplicații generale de poziționare, dacă efectul asupra frecării și duratei este acceptabil.
precomprimare medie	rigiditate mai mare, cu forțe interne mai mari	Aplicații cu cerințe crescute de rigiditate; se verifică sarcina echivalentă și durata.
precomprimare ridicată	rigiditate ridicată, cu penalizare de frecare/durată	Aplicații speciale de precizie; disponibilitatea și limitele sunt specifice seriei.

În practică

Clasa de precizie și precomprimarea nu se aleg printr-o combinație universală de litere, deoarece nomenclatura diferă între producători și serii. Se pornește de la cerința de precizie/repetabilitate și de la rigiditatea necesară, apoi se verifică în catalog toleranțele de montaj, jocul sau preîncărcarea, frecarea și efectul asupra duratei nominale. O clasă superioară se justifică numai dacă bugetul de toleranțe o cere.

3.2.4 Ghidaje rotative și unități de indexare

Multe procese de asamblare folosesc o structură discretă rotativă: piesa parcurge succesiv mai multe stații dispuse pe o masă de indexare (Figura 3.8). Alegerea soluției depinde de precizia de oprire, momentul admisibil, masa indexată, profilul cinematic, timpul de indexare și rigiditatea în faza de lucru.

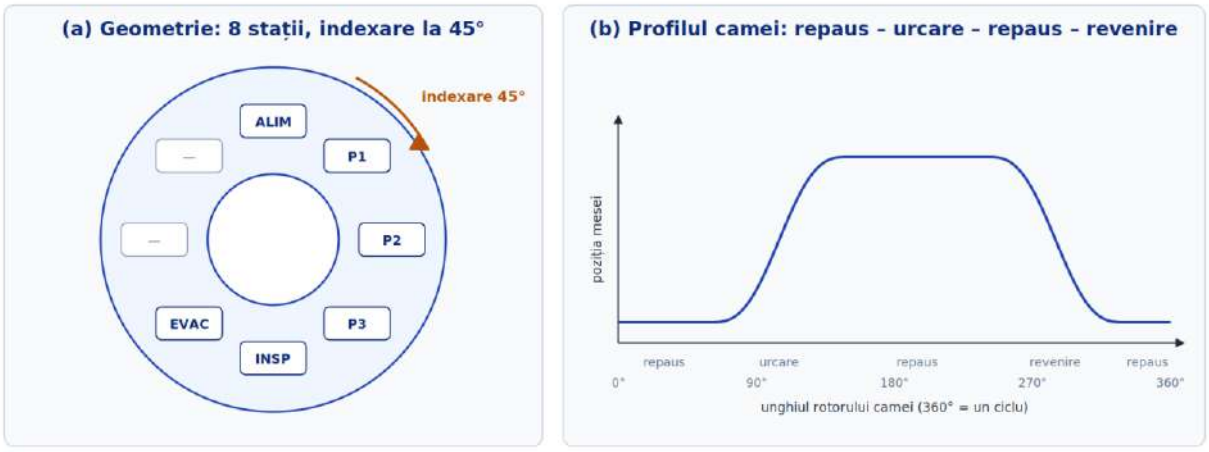


Figura 3.8. Masa rotativă indexată cu came. (a) Geometrie cu 8 stații și unghi de indexare 45°. (b) Profilul cam: poziționare succesiunii dwell (oprire), rise (mișcare către poziția următoare), dwell, return. Toate stațiile lucrează simultan în fereastra de oprire.

Patru tipologii principale

Mese rotative cu came (engl.: cam indexers). Un mecanism cu camă transformă rotația de intrare într-o mișcare indexată cu faze de deplasare și staționare. Precizia, cadența și momentul admisibil se preiau din catalog; exemple de furnizori sunt WEISS, CDS Cam Driven Systems și Autorotor.

Mese cu cuplaj Hirth. Indexarea este urmată de cuplarea unor coroane frontale dințate, obținându-se o blocare mecanică rigidă și repetabilă. Precizia, momentul admisibil și secvența de deblocare/indexare se verifică în documentația unității selectate; soluția este utilizată inclusiv la axe indexabile ale mașinilor-unelte.

Mese cu motor de cuplu, acționare directă (engl.: direct drive). Eliminarea reductorului permite programarea liberă a unghiului și vitezei și reduce jocul mecanic; selecția se face după cuplu continuu/maxim, inerție, encoder, rigiditatea lagărelor și precizia termică.

Unități de indexare pneumatice. Sunt adecvate rotațiilor simple și pozițiilor discrete, dar precizia și rigiditatea sunt determinate de mecanismul de blocare și de opritoarele mecanice, nu de compresibilitatea aerului. Se utilizează când cerințele de flexibilitate și trasabilitate sunt reduse.

În practică

Pentru un echipament cu cadență sub 6 cicluri/min și fără cerință de precizie sub-arcsecundă, masa rotativă cu came (mese rotative indexate seria TC) este alegerea aproape automată. Pentru cadențe peste 30 cicluri/min sau cerințe de unghi variabil, motorul torque devine indispensabil, dar costul crește cu un ordin de mărime. Indexarea pneumatică este utilă pentru rotații simple de tip „flip-flop” (90° sau 180°), dar nu o folosiți niciodată pentru opriri în poziții multiple cu repetabilitate critică.

3.2.5 Rulmenți și lagăre: selecție și durată nominală

Rulmenții susțin arborii și elementele rotative și trebuie selectați simultan din sarcină, turație, rigiditate, precizia de montaj, lubrifiere și durată. Conform ISO 281:2007, durata nominală de bază L_{10} este asociată unei fiabilități de 90 %. Relația de bază este:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{\mathrm{p}} \cdot 10^6 \text{ rotații} \tag{3.8}$$

unde p = 3 pentru rulmenții cu bile și p = 10/3 pentru rulmenții cu role. În aplicațiile reale se verifică suplimentar sarcina statică C_0, viteza limită, condiția de ungere, contaminarea și jocul/preîncărcarea [47].

Pentru un lagăr de precizie, montajul este la fel de important ca rulmentul: ajustajele arbore–inel și carcasă–inel se aleg în funcție de care inel este solicitat cu sarcină rotativă, iar coaxialitatea și rigiditatea carcasei trebuie controlate prin GPS/GD&T. Un rulment cu capacitate mare montat într-o carcasă deformabilă poate avea o durată reală mult sub durata calculată.

3.2.6 Transmisii mecanice: șurub cu bile, curea dințată și lanț

Transmisia transformă cuplul motor în forță, viteză și poziție. Pentru un șurub cu bile, legătura idealizată dintre forța axială F, pasul p, randamentul η și cuplul T este:

$$T = \frac{F \cdot p}{2\pi \cdot \eta} \tag{3.9}$$

Soluția oferă rigiditate și precizie ridicate, dar necesită verificarea vitezei critice, flambajului șurubului, duratei piuliței și preîncărcării. Curelele dințate sunt avantajoase la curse lungi și viteze mari, cu masă redusă, însă rigiditatea axială și tensiunea inițială influențează precizia. Lanțurile sunt robuste și toleranțe la mediu, dar introduc joc, zgomot și întreținere prin ungere/tensionare.

Regula de selecție este funcțională: șurub cu bile pentru forță și poziționare precisă pe curse moderate; curea dințată pentru viteză și curse lungi cu sarcini moderate; lanț pentru transport robust și sincronizare unde jocul micrometric nu este critic. Raportul de transmitere, inerția reflectată la motor și rigiditatea totală trebuie verificate împreună cu actuatorul.

3.3 Mecanisme de transfer și alimentare

În multe echipamente de asamblare, alimentarea și transferul pot limita cadența chiar dacă operația tehnologică este rapidă. Proiectantul trebuie să asigure simultan debitul de piese, orientarea, bufferizarea, precizia de predare, recuperarea după blocaj și posibilitatea de schimbare a produsului. Secțiunea compară patru familii de soluții fără a presupune că una este universal superioară.

3.3.1 Alimentatoare vibratoare cu bol (bowl feeders)

O soluție consacrată pentru alimentarea automată din vrac a pieselor cu geometrie stabilă este alimentatorul vibrator cu bol (engl. bowl feeder sau vibratory feeder). Traseul spiralat și elementele de selecție sunt configurate pentru orientarea piesei, iar fezabilitatea depinde de geometrie, masă, material, sensibilitatea suprafeței și cadența cerută (Figura 3.9). Domeniul dimensional și de masă se stabilește pentru piesa și furnizorul concret.

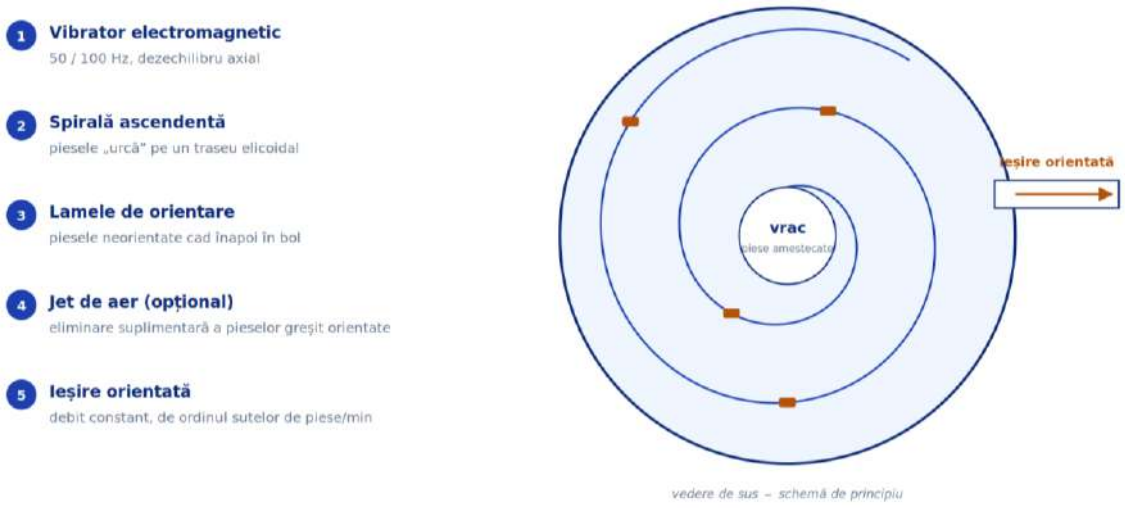


Figura 3.9. Alimentator vibrator cu bol: secțiune principială. Piesele aruncate în vrac în centrul bolului urcă pe spirala interioară datorită vibrațiilor axiale ale bazei electromagnetice. Lamele de selecție și jeturi de aer dispuse pe traseu elimină piesele incorect orientate; doar piesele corect orientate ajung în șina de alimentare către stația de lucru.

Cadența unui alimentator vibrator cu bol poate varia de la zeci la sute de piese/min, în funcție de dimensiunea, geometria, masa și orientarea piesei. Valoarea de proiect se obține prin testarea piesei reale și prin datele furnizorului. Exemple de furnizori de sisteme de alimentare sunt RNA, Afag și Asyril; soluțiile flexibile cu suprafață vibratoare și viziune reduc dependența de un bol dedicat, dar cresc costul și complexitatea de integrare.

În practică

Limitarea fundamentală a alimentatorului vibrator cu bol este flexibilitatea redusă la schimbarea geometriei piesei: traseul de orientare este dedicât și poate necesita reproiectare sau înlocuire. Pentru familii de produse variabile se compară economic alimentatorul dedicat cu soluțiile flexibile cu suprafață vibrantă și viziune artificială. Costul și termenul se validează prin ofertă și test de fezabilitate cu piesele reale.

3.3.2 Conveioare cu bandă, lanț și paleți

Conveiorul este coloana vertebrală a oricărei linii multistație. Trei tipologii constructive acoperă spectrul aplicațiilor:

- Conveioare cu bandă (engl.: belt conveyors). Bandă continuă din material ales pentru frecare, curățare și mediu. Sunt adecvate pieselor ușoare și transferului simplu, iar precizia la stație se obține de regulă prin opritor/poziționator separat, nu prin bandă.
- Conveioare cu lanț sau plăci (engl.: chain/slat conveyors). Oferă capacitate de încărcare și robustețe ridicate, fiind utilizate la piese grele și medii solicitante. Jocul lanțului și uzura trebuie considerate când poziționarea este critică.
- Conveioare cu paleți (engl.: pallet conveyors). Fiecare palet poartă un dispozitiv de fixare și poate fi oprit/poziționat local la fiecare stație. Sunt potrivite liniilor multistație în care trasabilitatea și separarea fluxului dintre stații sunt importante.

Exemple de platforme industriale pentru transportoare modulare și cu paleți sunt Bosch Rexroth TS, FlexLink și item. Selecția se face după masa paletului/piesei, acumulare, precizia de indexare locală, lungimea traseului, mediu și conceptul de mentenanță; prețul pe metru nu este un criteriu suficient deoarece poziționatoarele, lifturile, curbele și controlul pot domina costul sistemului.

3.3.3 Mese rotative indexate cu paleți

Acolo unde arhitectura liniară devine nefavorabilă ca spațiu sau flux, masa rotativă indexată (engl. rotary indexing table) poate concentra mai multe stații pe același disc. În fereastra de staționare, operațiile pot fi executate în paralel, iar timpul de ciclu al ansamblului este determinat de operația critică, de timpul de indexare și de timpii auxiliari. Numărul de stații, cadența și gabaritul se stabilesc din proces, inerție, acces, siguranță și datele unității de indexare selectate.

Mecanic, mesele rotative se grupează după principiul de acționare și blocare: came, motor de cuplu/acționare directă, servo cu reductor sau indexare pneumatică. Pentru proiectare se compară inerția sarcinii, timpul de indexare, momentul de lucru în staționare, precizia, rigiditatea și profilul de mișcare; cotele de piață sau o marcă „dominantă” nu reprezintă un criteriu tehnic.

În practică

Masa rotativă indexată se justifică prin analiza timpului de ciclu, numărului de stații, spațiului disponibil, inerției, preciziei și costului total al arhitecturii. Nu există un prag universal de rentabilitate exprimat doar în piese/oră sau secunde/ciclu. Pentru comparație se evaluează aceeași cerință prin cel puțin două arhitecturi, de exemplu masă rotativă și transfer liniar, folosind costuri de ofertă, disponibilitate și flexibilitate la schimbarea produsului.

3.3.4 Sisteme pick-and-place și roboți industriali

La capătul cu flexibilitate cinematică ridicată se află sistemele pick-and-place (engl.: pick-and-place systems). Costul și performanța variază puternic în funcție de cinematică, sarcină, precizie, viziune și siguranță. Patru topologii sunt frecvent utilizate în automatizarea industrială:

1. Axe liniare carteziene (XY, XYZ): soluție deterministă și ușor scalabilă, adecvată mișcărilor rectangulare și sarcinilor bine definite. Precizia și viteza depind de tipul de ghidaj și transmisie; exemple de furnizori includ Festo, IAI și Yamaha.
2. Roboți SCARA (4 axe): foarte eficienți pentru preluare și poziționare în plan, inserții și asamblări rapide. Repetabilitatea și timpul de ciclu se preiau pentru modelul concret și sarcina/utilajul de la flanșă; Yamaha, Epson, Mitsubishi Electric și ABB sunt exemple de furnizori.
3. Roboți delta paraleli (3–4 axe): utilizați pentru mișcări foarte rapide cu sarcini reduse, în special la sortare și ambalare. Performanța depinde de masa utilă, raza de lucru și traiectorie; exemple de furnizori includ ABB, FANUC și Omron.
4. Roboți colaborativi: roboți proiectați cu funcții care pot susține aplicații colaborative. Utilizarea fără garduri nu este o proprietate automată a robotului: aplicația completă trebuie evaluată și integrată conform ISO 10218-2:2025, inclusiv unealta, piesa, vitezele, spațiile și riscurile de contact. Flexibilitatea este avantajul principal; cadența trebuie verificată pe ciclul real [12].

În alegerea dintre axe carteziene și roboți se compară spațiul de lucru, gradele de libertate, masa utilă, repetabilitatea, timpul de ciclu, siguranța, schimbarea de produs și costul de integrare. Exemplele comerciale sunt utile pentru documentare de catalog, dar performanța se validează pe traiectoria și sarcina aplicației reale.

3.3.5 Selecția comparativă: criterii și compromisuri

Cele patru familii de soluții (bowl feedere, conveioare, mese rotative, pick-and-place) nu sunt alternative interschimbabile, ci **opțiuni complementare** care răspund unor cerințe diferite. Figura 3.10 sintetizează comparația pe cinci criterii de proiectare: cadență, flexibilitate, cost, spațiu necesar, simplitate operațională.

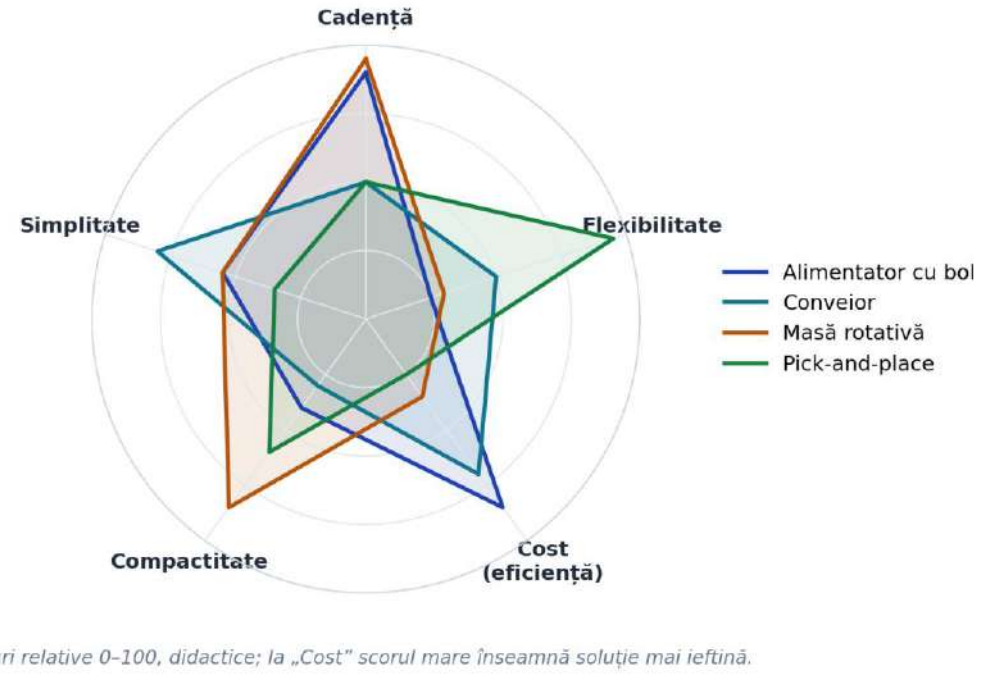


Figura 3.10. Comparație relativă a celor patru familii de soluții de alimentare/transfer pe criterii de proiectare. Scorurile sunt didactice și servesc la structurarea discuției; selecția finală se bazează pe cerințele și datele de catalog ale aplicației.

Citirea diagramei oferă patru concluzii utile pentru proiectant:

- pentru produse stabile geometric și volume mari, combinația dintre alimentare dedicată și indexare poate oferi cadențe ridicate, dar valoarea realizabilă se verifică pe piesa și procesul concret;
- flexibilitatea ridicată vine cu sistemele programabile de preluare și poziționare, dar schimbarea piesei poate necesita totuși dispozitive, prindere, viziune și recalificarea procesului;
- pentru loturi mici, soluțiile simple de transport și alimentare manuală pot avea investiție inițială redusă, dar costul total trebuie evaluat împreună cu necesarul de personal, ergonomia și calitatea;
- mesele rotative pot concentra mai multe operații într-un gabarit redus; avantajul de spațiu se verifică însă împreună cu accesul, mentenanța, protecțiile și diametrul necesar al mesei.

În practică

Decizia de proiectare trebuie să pornească de la cerințele clientului (cadență, varietate, spațiu, siguranță și cost pe ciclul de viață) nu de la atractivitatea unei tehnologii. Un robot colaborativ se justifică numai dacă flexibilitatea și modul de interacțiune cerut aduc avantaje față de o soluție mai simplă; aplicația completă se evaluează conform ISO 10218-2:2025 [12].

3.4 Mecanisme de presare și asamblare

Operațiile de presare din industria de asamblare acoperă forțe, curse și cerințe de trasabilitate foarte diferite. O inserție ușoară, o montare cu interferență și o operație de deformare plastică nu trebuie tratate cu aceeași tehnologie. Secțiunea compară patru familii (pneumatică, servo-electrică, hidraulică și mecanică cu excentric) prin forță/cursă, profil de mișcare, energie, control, trasabilitate, cadență și costul ciclului de viață.

3.4.1 Cilindri pneumatici

Cilindrul pneumatic este o soluție simplă pentru generarea unei mișcări liniare atunci când forța, cursa, viteza și controlul pot fi satisfăcute cu infrastructura de aer comprimat disponibilă. Presiunea efectivă de calcul se stabilește din rețeaua reală, pierderile de presiune, regulator și limitele componentelor. Forța teoretică se estimează prin relația fundamentală

$$F = p \cdot A = p \cdot \frac{\pi D^2}{4} \tag{3.10}$$

în care p este presiunea diferențială efectivă pe piston și A este aria activă. Forța utilă este mai mică decât p·A din cauza frecărilor, contrapresiunii și condițiilor dinamice. Amplificarea locală a presiunii se utilizează numai în limita presiunilor admisibile pentru cilindru, armături, furtunuri și elementele de siguranță; presiunea de proiect trebuie verificată în fișele tehnice. Pentru cilindrii din seria ISO 15552, standardul definește dimensiunile de bază și o presiune maximă nominală de 1 000 kPa (10 bar), fără a substitui verificarea produsului concret (Figura 3.11) [50].

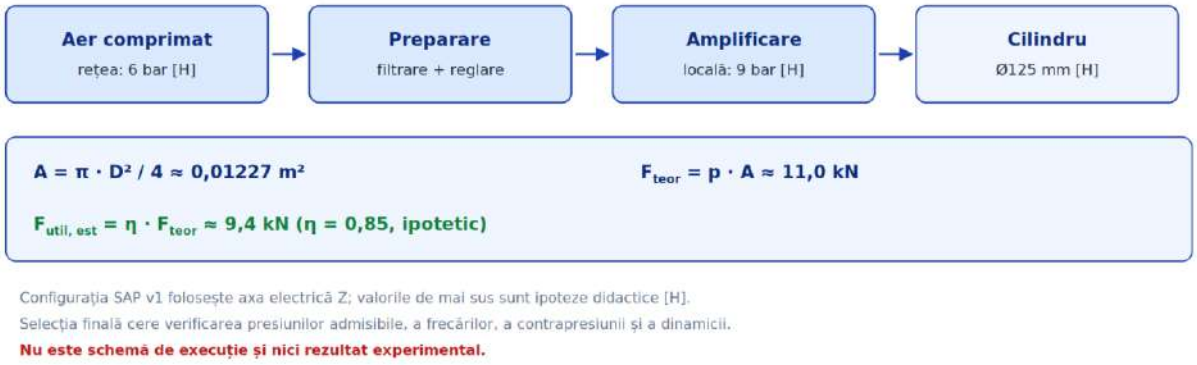


Figura 3.11. ALT–PNEU: exemplu de dimensionare preliminară (Ø125 mm, 9 bar, forță estimată 9,4 kN). Nu reprezintă presarea electrică SAP v1.

Avantajele pneumatice sunt simplitatea, viteza, disponibilitatea componentelor și mentenanța relativ redusă. Limitările sunt compresibilitatea aerului și dependența forței de presiune. Un cilindru pneumatic simplu nu oferă în mod inerent trasabilitate forță–deplasare, dar aceasta poate fi adăugată cu traductor de forță, măsurarea poziției, reglare proporțională și achiziție de date; prin urmare, afirmația „pneumatica nu poate fi trasabilă” ar fi prea categorică.

Exemplul rezolvat 3.3. Verificarea forței unui cilindru pneumatic și a limitei de presiune

Pentru D = 63 mm și p = 6 bar, forța teoretică este:

$$F_{\text{teor}} = p \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 6 \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}063^2}{4} \approx 1{,}87\ \text{kN} \tag{3.11}$$

Chiar la p = 9 bar, $F_{teor} \approx 2{,}81$ kN; cilindrul Ø63 nu atinge ținta didactică de 8 kN în ipotezele acestui exemplu ALT–PNEU.

Pentru D = 125 mm și p = 9 bar, A ≈ 0,01227 m² și $F_{teor} \approx 11{,}0$ kN. Cu un coeficient global de utilizare ipotetic η = 0,85, forța utilă estimată este:

$$F_{\text{util}} = \eta \cdot F_{\text{teor}} = 0{,}85 \cdot 11{,}0 \approx 9{,}4\ \text{kN} \tag{3.12}$$

Rezultatul depășește numeric ținta didactică de 8 kN; forța realizabilă și rezerva efectivă se verifică numai după selecția componentelor, verificarea presiunii admisibile și încercări.

Concluzie. Diametrul pistonului, presiunea, frecările, contrapresiunea și presiunea maximă admisibilă trebuie verificate împreună; multiplicarea presiunii nu poate substitui verificarea catalogului.

În practică

Cilindrul pneumatic este o soluție robustă atunci când cerințele de forță, cursă, dinamică și control pot fi satisfăcute în limitele presiunii admise de componente. Dacă este necesară trasabilitatea forță–deplasare, aceasta poate fi adăugată prin senzori și achiziție de date, dar complexitatea crește. Selecția finală se face prin calcul și documentația producătorului; costul se validează prin ofertă.

3.4.2 Prese servo-electrice

Presa servo-electrică (engl.: servo press) transformă rotația controlată a unui servomotor în mișcare liniară prin șurub cu bile, șurub cu role sau alte mecanisme electromecanice. Avantajele sunt programarea profilului de mișcare și integrarea facilă a măsurării forță–deplasare; domeniul de forță, cursa, precizia și viteza depind de model și nu trebuie generalizate printr-un singur interval universal.

Un avantaj important este posibilitatea trasabilității ciclului: forța și deplasarea pot fi înregistrate și comparate cu ferestre de proces sau criterii statistice. Frecvența de eșantionare, rezoluția senzorilor și metoda de validare se aleg în funcție de dinamica operației; o valoare de „1 ms” nu este o cerință universală.

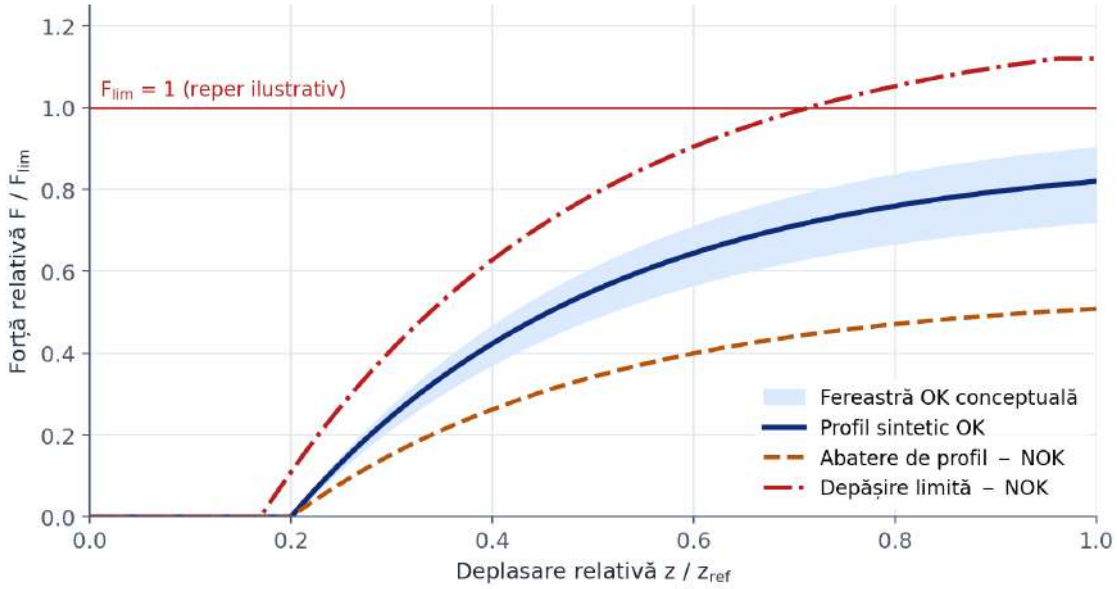


Figura 3.12. Semnături F–z sintetice și fereastră de acceptare conceptuală; exemple NOK ilustrative, fără măsurări sau praguri validate pentru SAP.

Exemple de sisteme servo-electrice pentru asamblare sunt oferite de Promess, Kistler, Schmidt Technology și alți furnizori specializați (Figura 3.12). Diferența de cost față de pneumatică trebuie justificată prin cerințe de control, trasabilitate, eficiență energetică, schimbare de produs și costul calității, nu printr-un multiplicator de preț presupus.

3.4.3 Prese hidraulice

Presele hidraulice sunt avantajoase când sunt necesare forțe și energii mari, menținerea forței pe durată lungă sau o densitate mare de putere. Nu există un prag universal de 50 kN: comparația cu servo-electric și mecanic depinde de cursă, viteză, energie/ciclu, precizie, regim de lucru și costul utilităților.

Dezavantajele includ grupul hidraulic, controlul contaminării, gestionarea temperaturii, zgomotul și riscul de scurgeri. Compatibilitatea cu aplicații alimentare/farmaceutice se decide prin arhitectura și fluidul/izolarea sistemului; nu este corect să fie declarată universal incompatibilă.

3.4.4 Prese cu excentric (mecanic)

Figura 3.13 prezintă schema cinematică a mecanismului cu excentric și profilul forței disponibile pe parcursul ciclului.

Soluția cu mecanism manivelă-bielă-piston (engl. eccentric press sau crank press) convertește rotația motorului și energia volantului în mișcarea alternativă a culisorului. Cinematica este descrisă de poziția unghiulară a manivelei, iar capacitatea de presare disponibilă variază cu poziția culisorului. Domeniul util de forță în vecinătatea punctului mort inferior se preia din diagrama de capacitate a presei concrete; nu se presupune un interval unghiular universal.

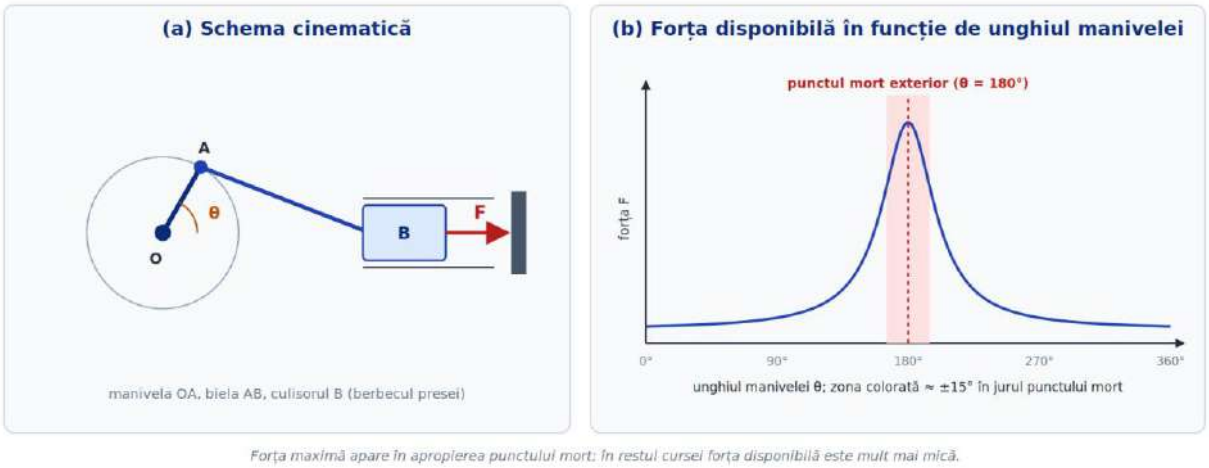


Figura 3.13. Mecanism cu excentric (manivelă-bielă-piston): (a) schema cinematică, cu poziția unghiulară θ a manivelei OA, biela AB și culisorul B care apasă piesa; (b) profilul forței F(θ) pe ciclu, cu maximul concentrat în vecinătatea BDC (θ = 180°). În afara zonei utile, presa nu poate genera forțe substanțiale.

Presele mecanice cu excentric pot atinge cadențe foarte mari la curse scurte și procese repetitive. Limita de forță disponibilă variază puternic cu poziția unghiulară, iar energia volantului, rigiditatea cadrului, frânarea/ambreiajul și siguranța sunt criterii esențiale. Valorile de curse/min se preiau din datele modelului și ale sculei, nu se generalizează la întreaga categorie.

3.4.5 Comparație sintetică și arbore de decizie

Cele patru tehnologii nu sunt substituibile: fiecare optimizează un colț diferit al spațiului *forță* × *control* × *cost* × *cadență*. Figura 3.14 sintetizează comparația pe cinci criterii.

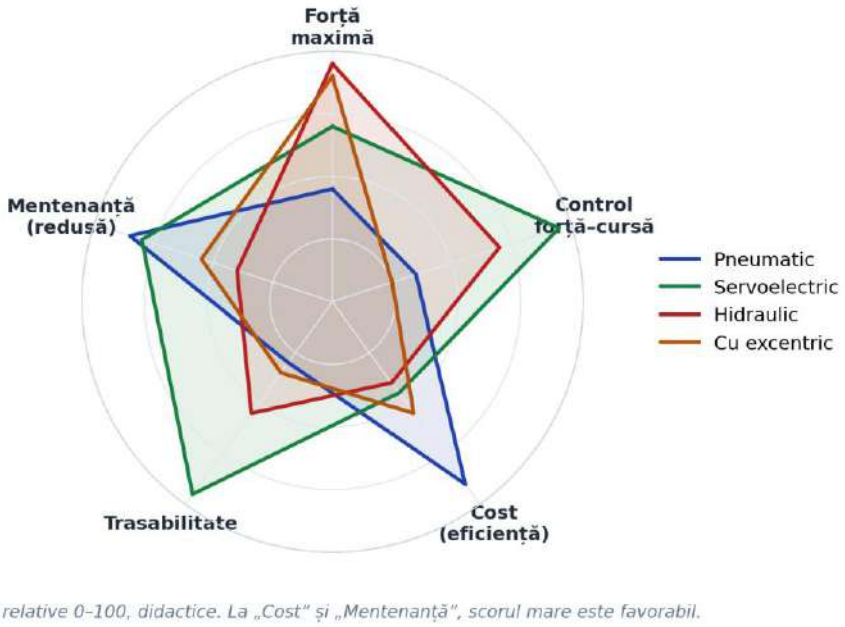


Figura 3.14. Comparație radar didactică a celor patru tehnologii de presare pe cinci criterii. Pozițiile relative ilustrează tendințe tipice privind costul, controlul, trasabilitatea, forța și cadența; ele nu reprezintă un clasament universal și trebuie recalibrate pentru aplicația concretă.

Pentru a transforma comparația într-un instrument de proiectare, figura 3.15 oferă un arbore preliminar. El nu produce automat soluția finală, ci elimină opțiuni evident nepotrivite; după preselectare se verifică numeric forța/energia, cursa, profilul de mișcare, repetabilitatea, trasabilitatea, utilitățile, siguranța și costul ciclului de viață.

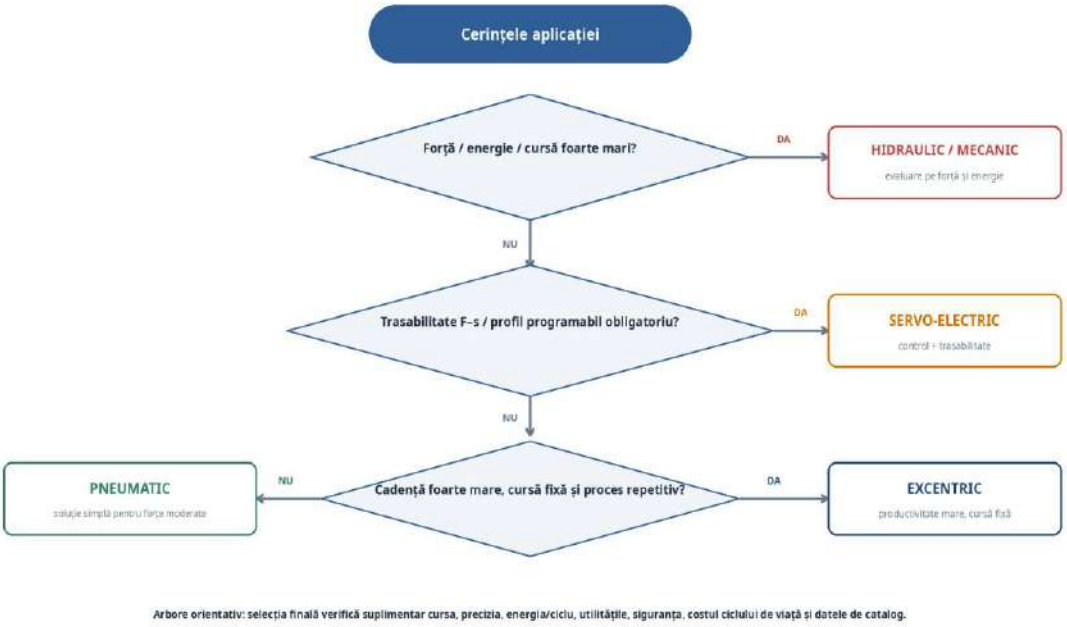


Figura 3.15. Arbore orientativ pentru preselectarea tehnologiei de presare. Pragurile rigide au fost înlocuite cu întrebări funcționale; selecția finală necesită calcule și date de catalog pentru aplicația concretă.

Arborele poate conduce la o presare pneumatică în varianta didactică ALT–PNEU, atunci când cerința de profil F–z nu justifică o axă servo. Pentru această variantă, §3.6.2 și Exemplul 3.4 verifică cilindrul Ø125 mm la o presiune locală ipotetică de 9 bar, numai dacă toate componentele permit acest regim. SAP de referință rămâne însă cu o singură axă principală electrică, a cărei dimensionare rezultă din profilul de proces.

În practică

Arborele de decizie din figura 3.15 este un instrument de preselectare, nu o regulă economică universală. O servopresă, o soluție pneumatică, hidraulică sau mecanică se justifică prin forță/energie, cursă, profil de mișcare, trasabilitate, siguranță, utilități și cost pe ciclul de viață. Diferențele de investiție se validează prin ofertă pentru configurația concretă.

3.5 Criterii transversale de proiectare

Selecția componentelor (structuri, ghidaje, mecanisme de alimentare, mecanisme de presare) răspunde unei părți dintre cerințele proiectului. Restul este acoperit de **criterii transversale** care se aplică indiferent de tipologia aleasă: rigiditate, precizie, mentenabilitate, ergonomie și verificare prin simulare. Această secțiune prezintă cele cinci criterii esențiale și arată cum se traduc ele în decizii cantitative pe care un proiectant trebuie să le ia în primele etape ale dezvoltării.

3.5.1 Rigiditate statică și dinamică

Rigiditatea statică a unui sistem mecanic este definită ca raportul dintre forța aplicată și deformația rezultată

$$k = \frac{F}{\delta} \quad [\mathrm{N/\mu m}] \tag{3.13}$$

iar pentru un echipament de fabricație ea influențează direct precizia sub sarcină. Un cadru de presare cu k = 100 N/µm se deformează 80 µm sub o sarcină de 8 kN, o magnitudine semnificativă în comparație cu o toleranță de poziționare de ±0,1 mm. Creșterea rigidității se obține prin optimizarea traseului forțelor, mărirea momentelor de inerție, utilizarea secțiunilor închise, reducerea deschiderilor și rigidizarea îmbinărilor; efectul fiecărei măsuri se cuantifică pentru geometria concretă.

Rigiditatea dinamică determină frecvențele proprii și sensibilitatea la excitații. Pentru SAP, 120 cicluri/oră înseamnă aproximativ 0,033 Hz ca frecvență fundamentală a ciclului, dar aceasta nu este singura excitație relevantă. Șocurile pneumatice, motoarele, angrenajele și vibratoarele pot introduce componente de ordinul zecilor sau sutelor de hertzi. Regula de separare „$f_1 \geq 3\times f_{exc}$” este o euristică de screening; analiza modală și, la nevoie, răspunsul armonic/transitoriu se raportează la spectrul real.

3.5.2 Precizie și repetabilitate

Două concepte adesea confundate, dar distincte tehnic, sunt **precizia** (engl. *accuracy*) și **repetabilitatea** (engl. *repeatability*). Precizia măsoară abaterea sistematică între poziția comandată și poziția atinsă; repetabilitatea măsoară dispersia pozițiilor atinse între cicluri succesive cu aceeași comandă. Figura 3.16 ilustrează cele patru combinații prin analogia țintei.

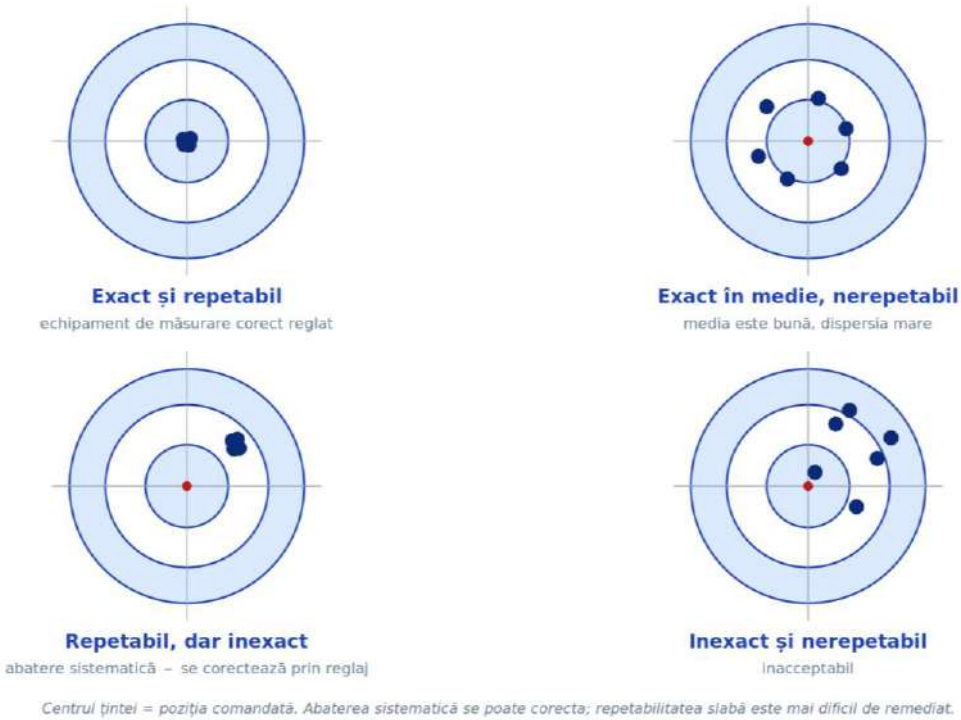


Figura 3.16. Cele patru combinații precizie/repetabilitate, ilustrate prin ținta de tir. Centrul țintei reprezintă poziția comandată, iar punctele reprezintă măsurări succesive. O repetabilitate ridicată asociată unei precizii scăzute indică o abatere sistematică ce poate fi corectată prin calibrare; o repetabilitate scăzută indică dispersie și este, în general, mai dificil de remediat.

Precizia și repetabilitatea trebuie specificate și măsurate separat. Nu există un raport universal de tip „repetabilitatea este de 3–10 ori mai bună”. O eroare sistematică poate fi compensată prin calibrare numai dacă este stabilă și observabilă; dispersia aleatoare, histerezisul, jocul și deriva termică nu se corectează printr-un simplu offset.

3.5.3 Proiectare pentru mentenabilitate (DfM)

Proiectarea pentru mentenabilitate (în acest volum: DfM, engl.: Design for Maintainability) urmărește reducerea timpului și riscului intervențiilor pe întregul ciclu de viață. Impactul economic trebuie estimat din datele organizației (timp de oprire, frecvența intervențiilor, costul pieselor și accesul) nu din procente sau perioade universale de amortizare.

1. **Accesibilitate. Componentele care necesită inspecție, reglaj sau înlocuire periodică trebuie poziționate astfel încât intervenția să poată fi realizată în siguranță, cu demontări minime și cu timpi de service compatibili cu cerințele de mentenanță ale proiectului. Țintele de timp se definesc contractual sau din datele organizației, nu printr-un prag universal.**
2. Modularitate. Subansamblurile se proiectează ca module identificabile și, unde este justificat, înlocuibile rapid: dispozitivul de fixare, insula de valve, modulul de I/O, senzorii și elementele de acționare. Interfețele mecanice, electrice și pneumatice trebuie documentate pentru a evita înlocuiri ambigue.
3. Standardizare. Reducerea controlată a varietății de componente simplifică stocul de piese, documentația și instruirea personalului, dar standardizarea nu trebuie să forțeze folosirea aceleiași componente în regimuri de sarcină incompatibile.
4. Marcare și etichetare. Identificatorii obiectelor trebuie să fie consecvenți între componenta fizică, scheme, lista de materiale și software. IEC 81346-1:2022 oferă principiile actuale pentru structurare și desemnări de referință [51].
5. **Puncte de diagnosticare.** Manometre pe fiecare ramură pneumatică, LED-uri de stare pe fiecare senzor, coduri de eroare clare pe HMI. Diagnoza nu trebuie să necesite multimetru pentru defecte uzuale.

În practică

Proiectarea pentru mentenabilitate trebuie justificată prin acces, timp de restaurare, siguranța intervenției, disponibilitatea pieselor și consistența documentației. Țintele de MTTR, timpii de acces și criteriile de acceptanță se stabilesc din cerințele contractuale și din datele organizației; nu se presupun procente universale de cost suplimentar sau perioade standard de amortizare.

3.5.4 Ergonomia punctului de lucru

ISO 14738:2002, confirmat ca ediție curentă, stabilește principiile antropometrice pentru proiectarea posturilor de lucru la mașini. El nu furnizează o singură „înălțime corectă” universală; dimensiunile se aleg din populația-țintă, postura de lucru, vizibilitate, frecvența accesului, forțe și posibilitatea de reglare [52].

- Înălțimea și zona de lucru: se dimensionează antropometric pentru postura și populația-țintă; intervalele orientative pot fi utile în concept, dar acceptarea se face prin analiza activității și, unde este necesar, prin reglabilitate.

- Zona de acces: componentele frecvent manipulate trebuie amplasate în zona de atingere confortabilă, iar masele/forțele care depășesc capacitatea ergonomică a operatorului se asistă mecanic. Pragurile se stabilesc prin evaluarea sarcinii reale, nu printr-o singură distanță sau masă universală.
- Comenzi manuale: geometria, poziția și efortul de acționare se aleg ergonomic și în acord cu funcția de control. IEC 60204-1 reglementează echipamentul electric al mașinii și cerințe pentru dispozitive de comandă, dar nu justifică în acest context un prag ergonomic universal de 5 N.
- **Vizibilitate:** operatorul trebuie să vadă simultan zona de lucru și HMI-ul. Amplasarea HMI-ului în spatele echipamentului este o eroare ergonomică tipică.
- Zgomot: Directiva 2003/10/CE stabilește pentru expunerea zilnică LEX,8h o valoare inferioară de acțiune de 80 dB(A), o valoare superioară de acțiune de 85 dB(A) și o valoare-limită de 87 dB(A), aceasta din urmă luând în calcul protecția auditivă. Proiectarea trebuie să reducă zgomotul la sursă; evacuările pneumatice se dimensionează și se atenuează în funcție de măsurători [53].

Cerințele ergonomice și de acceptanță ale beneficiarului se includ în caietul de sarcini și se verifică la FAT/SAT. Pentru proiectele PeF, argumentația trebuie să indice sursa cerinței (standard, cerință internă sau evaluare antropometrică) și metoda de verificare.

3.5.5 Verificarea prin metoda elementelor finite (FEM)

Analiza prin metoda elementelor finite (FEM) este un instrument de verificare, nu o dovadă automată de conformitate [54]. Ea este necesară atunci când geometria, contactele, solicitările sau criteriile de acceptare nu pot fi evaluate suficient prin calcule analitice simplificate. Modelul trebuie documentat prin ipoteze, materiale, condiții de frontieră, contacte, calitatea plasei și verificări de convergență.

- Analiza statică liniară: verifică deformațiile, tensiunile și reacțiunile pentru ipoteze elastice. Factorul de siguranță nu are o valoare universală; se stabilește din consecința cedării, incertitudinea sarcinilor, material, proces de fabricație, standarde aplicabile și modul de cedare.
- Analiza modală: calculează frecvențele proprii și formele modale. Rezultatele se compară cu spectrul excitațiilor reale; simpla verificare față de cadența de producție poate rata excitații de motor, impact sau vibrație.
- **Analiza la oboseală:** pentru componentele supuse la cicluri repetate. Un cilindru de presare la 120 cicluri/oră × 8 ore × 250 zile × 10 ani acumulează 2,4 × 10^6 cicluri, domeniu în care fenomenele de oboseală devin determinante.

Fluxul de analiză FEM aplicat la verificarea proiectului mecanic este prezentat în Figura 3.17; rezultatele sunt valide numai dacă ipotezele, condițiile de frontieră, discretizarea și criteriile de acceptare sunt documentate.

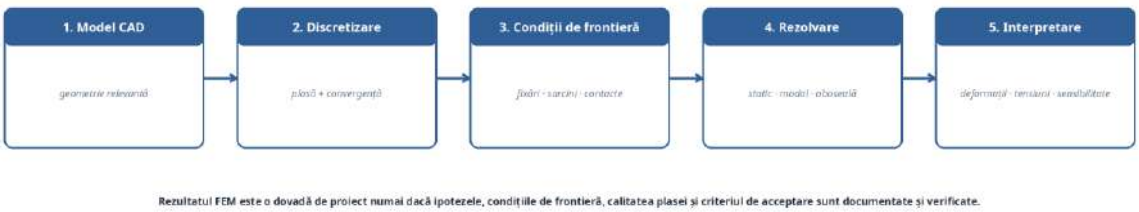


Figura 3.17. Flux de analiză FEM pentru verificarea proiectului mecanic. Interpretarea rezultatelor este validă numai dacă ipotezele, condițiile de frontieră, plasa și criteriile de acceptare sunt documentate și verificate.

Exemple de instrumente FEM sunt SOLIDWORKS Simulation, Ansys Mechanical, Simcenter/NX Nastran și COMSOL Multiphysics. Alegerea programului este secundară față de calitatea modelului: aceeași

geometrie poate produce rezultate eronate în orice solutor dacă fixările, contactele, sarcinile sau plasa nu reprezintă sistemul fizic.

3.5.6 Toleranțe geometrice și dimensionale (GD&T)

Până acum, capitolul a tratat rigiditatea, precizia, mentenabilitatea, ergonomia și verificarea numerică. Pentru ca proiectul să devină executabil și verificabil, aceste cerințe trebuie traduse în toleranțe dimensionale și geometrice, baze de referință și specificații de textură a suprafeței. În acest scop se utilizează sistemul ISO GPS: ISO 286 pentru toleranțe pe dimensiuni liniare, ISO 1101 pentru toleranțe geometrice, ISO 5459:2024 pentru baze și sisteme de baze, respectiv seria ISO 21920:2021 pentru textura suprafeței prin metoda profilului [38], [41]–[45].

Toleranțe dimensionale ISO 286: sistemul IT și ajustajele standardizate

ISO 286-1:2010 definește sistemul de coduri pentru toleranțe pe dimensiuni liniare și noțiunile de ajustaj. ISO 286-2:2010 furnizează abaterile-limită pentru clase uzuale de alezaje și arbori. Combinații precum H7/h6, H7/k6 sau H7/p6 pot fi utilizate ca puncte de pornire, dar alegerea trebuie făcută după funcția asamblării, mărimea nominală, temperatură, montaj și încărcare. Clasele de precizie ale ghidajelor liniare nu sunt echivalente direct cu gradele IT din ISO 286 [41], [42].

Toleranțe geometrice ISO 1101 și sistemul de simboluri

ISO 1101:2017 definește limbajul de simboluri și regulile pentru toleranțe de formă, orientare, poziție și bătaie. Pe desen, cadrul de toleranță geometrică trebuie să indice caracteristica, valoarea toleranței și, când este necesar, bazele de referință și modificatorii. Pentru proiectarea echipamentelor sunt frecvent critice planeitatea suprafețelor de montaj, paralelismul ghidajelor, perpendicularitatea axelor și poziția elementelor de localizare [38].

Sistemul de referințe (datum frame) ISO 5459

ISO 5459:2024 este ediția curentă pentru baze și sisteme de baze (engl.: datums and datum systems). Baza A, B, C nu reprezintă doar „trei suprafețe ortogonale”, ci un sistem de referință construit după reguli GPS. Legătura cu principiul cinematic 3-2-1 este utilă didactic, dar nu trebuie confundată cu definiția completă a operatorului de specificație din ISO 5459 [43].

Rugozitatea suprafețelor conform ISO 21920

Seria ISO 21920:2021 a înlocuit în această zonă vechile referințe ISO 1302:2002 și ISO 4287:1997. ISO 21920-1:2021 definește indicarea texturii pe documentația tehnică, iar ISO 21920-2:2021 definește termeni și parametri. Parametri precum Ra și Rz rămân utilizați, dar valoarea, filtrarea și condițiile de evaluare trebuie specificate în acord cu seria actuală; o conversie fixă Rz = 4–6·Ra nu trebuie folosită ca regulă metrologică universală [44], [45].

Acumularea toleranțelor (tolerance stack-up)

Când mai multe piese se asamblează într-un lanț funcțional, toleranțele se acumulează. Pentru toleranțe simetrice $\pm t_i$, cazul cel mai defavorabil se estimează prin:

$$T_{\mathrm{WC}} = \sum_i t_i \tag{3.14}$$

O combinație statistică de tip RSS, definită prin

$$T_{\mathrm{RSS}} = \sqrt{\sum_i t_i^2} \tag{3.15}$$

Aceasta poate fi utilizată numai când ipotezele statistice sunt justificate. Pentru funcțiile sensibile la acumularea abaterilor, lanțul de toleranțe se modelează explicit, iar distribuțiile de fabricație pot fi evaluate prin simulare Monte Carlo sau analiză de capabilitate.

Tabelul 3.6 oferă exemple de specificații dimensionale, geometrice și de textură pentru zonele critice ale unui echipament, ca puncte de pornire care se validează prin calcul și prin capabilitatea procesului.

Tabelul 3.6. Exemple de specificații dimensionale, geometrice și de textură pentru zone critice ale unui echipament. Valorile sunt puncte de pornire didactice și trebuie validate prin calcul, procesul de fabricație și capabilitatea metrologică.

Zonă / componentă	Toleranță dimensională	Toleranță geometrică	Textură / Ra
Suprafață frezată sub ghidaj liniar	±0,05 mm pe cotă	Planeitate 0,02 mm / 300 mm; paralelism 0,02 mm	Ra ≤ 1,6 µm
Suprafață dispozitiv de fixare (baza A)	±0,02 mm pe cotă	Planeitate 0,02 mm pe suprafața funcțională	Ra ≤ 0,8 µm
Pini de localizare	Ajustaj stabilit conform ISO 286	Poziție 0,03 mm față de sistemul de baze A|B|C	Ra ≤ 0,8 µm
Locaș de rulment / arbore	Ajustaj selectat după sarcina pe inel	Cilindricitate și bătaie stabilite din precizia ansamblului	Ra tipic ≤ 0,4–0,8 µm
Suprafață funcțională cilindru / etanșare	Conform producătorului / desenului de execuție	Cilindricitate după funcția de etanșare	Conform specificației etanșării
Cadru sudat post-frezare	±0,1 mm pe cote majore, dacă bugetul permite	Planeitate de ordinul 0,05 mm/m pe suprafețe de referință	Ra stabilit după funcția suprafeței
Suprafețe nefuncționale	Toleranțe generale de fabricație	Fără toleranță geometrică dedicată dacă nu este funcțională	Conform procesului de fabricație

3.5.7 Verificarea la oboseală pentru piese ciclice

Verificarea statică nu este suficientă pentru componentele solicitate ciclic. La 120 cicluri/oră, 8 ore/zi, 250 zile/an și 10 ani, o componentă acumulează aproximativ $2{,}4 \times 10^6$ cicluri. Verificarea la oboseală trebuie să distingă componentele prelucrate din material de bază de îmbinările sudate, deoarece mecanismele și curbele de proiectare sunt diferite.

Curba Wöhler și limita de oboseală

Curba Wöhler (S–N) exprimă relația dintre amplitudinea sau intervalul de tensiune și numărul de cicluri până la cedare. Pentru unele oțeluri poate apărea un palier de rezistență la un număr mare de cicluri, dar regula empirică $\sigma_e \approx 0{,}5 \cdot R_m$ este doar o estimare pentru epruvete și nu trebuie transferată direct la piese reale fără factori pentru suprafață, dimensiune, mediu, tensiune medie și concentratori.

Criteriile Goodman, Soderberg și Gerber pentru solicitări medii nenule

Pentru componente netede sau prelucrate, efectul tensiunii medii poate fi evaluat prin relații Goodman, Soderberg sau Gerber, cu un factor de siguranță justificat. Pentru îmbinări sudate, practica modernă utilizează curbe S–N pe categorii de detaliu și intervalul de tensiune, deoarece cordonul,

geometria și tensiunile reziduale domină rezistența la oboseală. Recomandările IIW actuale (Hobbacher și Baumgartner, 2024) sunt o referință adecvată pentru această diferențiere [55].

Factori de concentrare a tensiunilor (Kt) și efectul geometriei

Concentratorii geometrici (filete, găuri, schimbări de secțiune, canale, raze mici) amplifică tensiunile locale. Factorul teoretic Kt poate fi estimat din relații consacrate sau din FEM cu discretizare verificată. Pentru piese ciclice se preferă racordări generoase, tranziții netede și evitarea concentratorilor în zonele cu tensiuni nominale mari. La detaliile sudate, forma cordonului și tipul îmbinării se tratează prin categoria de detaliu, nu prin simpla aplicare a limitei de oboseală a oțelului de bază (Tabelul 3.7).

Tabelul 3.7. Strategie de verificare la oboseală pentru componentele critice ale SAP. Metoda se alege după tipul componentei și detaliul constructiv; valorile finale necesită rezultate de calcul/FEM și date de material/proces.

Componentă	Material / detaliu	Metodă de verificare	Concluzie / acțiune
Cadru sudat în zona de reacțiune	S235/S355, detaliu sudat	Curbe S–N pe categorie de detaliu / interval de tensiune; recomandări IIW	Nu se validează cu Goodman pe materialul de bază; se verifică detaliul sudat și numărul de cicluri.
Dispozitiv de fixare din aluminiu	Aliaj de aluminiu prelucrat	Curba S–N a aliajului + efectul tensiunii medii și concentratori	Se verifică pentru N = $2{,}4\times10^{6}$ și starea reală de suprafață.
Pini și șuruburi de localizare	Oțel tratat / șuruburi prestrânse	Tensiune alternantă în secțiunea critică; efectul prestrângerii și al filetului	Se evită variația mare a forței în șurub și se verifică pierderea prestrângerii.
Tijă / element de acționare cilindru Ø125	Conform fișei producătorului	Verificare la compresiune, flambaj și regim ciclic conform datelor actuatorului	Capacitatea actuatorului se verifică prin catalog și condițiile de montaj.
Racordare / locaș solicitat	Detaliu prelucrat cu rază	Kt sau FEM local + criteriu de oboseală pentru materialul de bază	Raza se dimensionează din tensiunea locală, nu printr-un prag universal.
Șuruburi de ancorare cadru	Șuruburi prestrânse	Verificare statică + variația forței și alunecarea îmbinării	Cuplul/prestrângerea se definesc prin proiectul îmbinării și se verifică la montaj.

3.6 Aplicație integrată: subsistemul mecanic al echipamentului SAP

Această secțiune aplică sistematic concluziile capitolului pe stația-pilot SAP introdusă în Capitolul 2. Obiectivul este să demonstreze trasabilitatea dintre cerințe, calcule, selecția componentelor și dovezile de verificare, fără a transforma un exemplu didactic într-o recomandare universală de produs.

3.6.1 Lista mecanică de materiale (BOM)

Tabelul 3.8 sintetizează componentele mecanice principale ale SAP și secțiunea în care este justificată alegerea. Specificațiile de produs se definitivează numai după verificarea calculelor și a fișelor tehnice actuale.

Tabelul 3.8. Lista mecanică de materiale (BOM) pentru SAP. Tipologiile sunt definite tehnic; furnizorul/modelul se selectează ulterior din componente care satisfac cerințele și interfețele.

Componentă	Tipologie / specificație	Funcție	Sec. ref.
Cadru principal	Cadru sudat din S235/S355 cu protecție de suprafață sau, dacă mediul o cere, variantă inox	Structură portantă; închide traseul forței de presare și asigură suprafețele de montaj.	§3.1.2
Dispozitiv de fixare	Dispozitiv de fixare din aluminiu frezat, cu inserții/pini de uzură din oțel călit	Asigură situarea univocă a piesei conform principiului 3-2-1 și preia reacțiunile locale.	§3.6.3
Ghidaje liniare	Ghidaje profilate cu bile, clasă de precizie și precomprimare stabilite din catalog	Ghidează ansamblul mobil; durata și rigiditatea se verifică conform §3.2.	§3.2.1–3
Cilindri fixare 2C1, 2C2	Cilindri pneumatici compacți dimensionați din echilibrul forțelor și geometria clemei	Aplică forța de fixare fără a supra-constrânge sau deforma piesa.	§3.4.1
Axă electrică Z de presare	Servo + mecanism liniar dimensionate pe F–z; forță maximă ipotetică 8 kN; cursă/raport/RMS TBD.	Execută presarea axială cu măsurarea forței și deplasării, conform ferestrei de proces de definit.	§3.4.1, §3.6.2
Senzori poziție	Senzori magnetici/proximitate compatibili cu actuatorul și PLC	Confirmă stările mecanismului și intră în logica de control.	§3.4.1
Circuit pneumatic auxiliar CL1/CL2	Distribuție și reglare aer pentru două funcții de fixare; presiune, debit și componente TBD.	Asigură fixarea fără deformarea produsului, cu confirmări și controlul energiei stocate.	§3.5.3

3.6.2 Analiza forțelor: axa electrică de referință și varianta pneumatică ALT–PNEU

Pentru SAP de referință, cerința P-02 introduce ipoteza $F_{max,design}$ = 8 kN, iar axa electrică se dimensionează din învelișul forță–deplasare, cursă, viteză, cuplu, randament, regim termic și rigiditate; valorile finale sunt TBD. Exemplul rezolvat 3.4 rămâne util ca verificare comparativă ALT–PNEU a unei prese pneumatice distincte, fără transferarea cilindrului Ø125 mm în BOM-ul de bază.

Exemplul rezolvat 3.4. Dimensionarea cilindrului de presare SAP pentru 8 kN

Date: forță maximă cerută F_{cer} = 8 kN; rețea 6 bar; se admite amplificare/reglare locală până la 9 bar, numai pentru componente nominalizate pentru acest regim. Pentru o estimare conservativă se utilizează η = 0,85 pentru frecări, contrapresiune și efecte dinamice.

Încercare Ø100 mm la 9 bar: $A = 7{,}85\times10^{-3}$ m^2; $F_{teor} \approx 7{,}07$ kN; $F_{util} \approx 6{,}0$ kN ⇒ insuficient pentru 8 kN.

Încercare Ø125 mm la 9 bar: $A = 12{,}27\times10^{-3}$ m^2; $F_{teor} \approx 11{,}04$ kN; $F_{util} \approx 9{,}39$ kN ⇒ satisface cerința cu o rezervă de aproximativ 17 % față de 8 kN.

Verificări obligatorii înaintea selecției finale: presiunea maximă de lucru a cilindrului și armăturilor, forța pe cursa de retur, debitul și timpul de umplere, amortizarea la capăt de cursă, flambajul tijei, reacțiunile în cadru, senzorii și siguranța la pierderea presiunii.

Concluzie de predimensionare: varianta Ø125 mm la 9 bar este numeric compatibilă cu ipoteza de 8 kN, dar selecția finală necesită un cilindru și toate componentele circuitului nominalizate pentru regimul respectiv. ISO 15552:2018 definește seria dimensională și interschimbabilitatea pentru cilindri cu presiune maximă nominală de 1 000 kPa (10 bar) [50]; performanța concretă se verifică în catalog și prin încercări.

Forțele de fixare ale cilindrilor 2C1 și 2C2 se determină din echilibrul piesei și al dispozitivului de fixare. Nu există o regulă universală „30 % din forța de presare”. Dacă reacția de 8 kN este preluată axial

de reazemele dispozitivului, clemele pot avea rol predominant de menținere și anti-ridicare; dacă există o componentă laterală Ft, condiția de nealunecare poate fi scrisă, într-un model simplificat, $\mu \cdot \Sigma N \geq SF \cdot Ft$. Geometria clemei, coeficientul de frecare și factorul de siguranță se documentează explicit.

3.6.3 Proiectarea dispozitivului de fixare

Dispozitivul de fixare (engl.: fixture) determină situarea univocă a piesei, repetabilitatea, accesul la operație și schimbarea de produs (Figura 3.18). Principiul 3-2-1 este un model cinematic de bază pentru eliminarea celor șase grade de libertate, iar implementarea fizică trebuie să evite constrângeri redundante sau să le facă reglabile/compliabile.

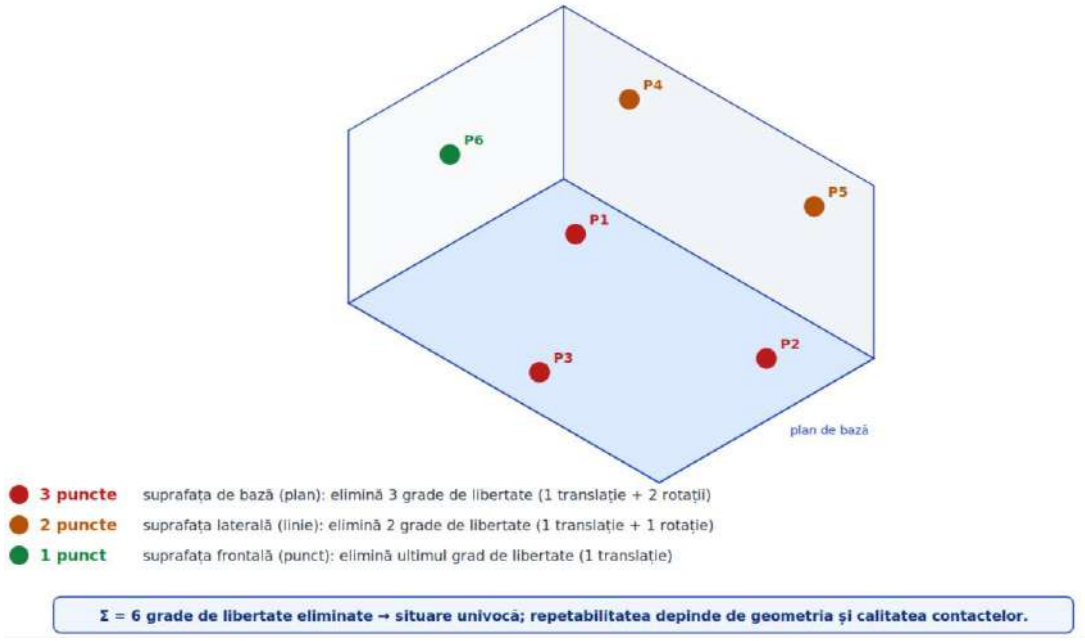


Figura 3.18. Principiul 3-2-1 pentru situarea univocă a piesei: trei contacte definesc planul primar, două contacte definesc orientarea secundară, iar un contact definește orientarea terțiară. Fixarea aplică forțe pentru menținerea contactelor și nu trebuie confundată cu situarea.

Principiile de bază ale proiectării dispozitivului de fixare se pot rezuma astfel:

1. **Situarea**: principiul 3-2-1 oferă șase constrângeri cinematice independente într-o configurație ideală. Contactele pot fi realizate prin suprafețe, pini și opritoare; supra-constrângerea este acceptabilă numai dacă toleranțele, reglajele sau elementele elastice o gestionează controlat.
2. **Fixarea**: forțele clemelor trebuie să mențină piesa pe elementele de situare în prezența reacțiunilor de proces, fără deformarea piesei. Direcția forței de fixare se orientează, pe cât posibil, către elementele de situare și reazem, nu împotriva lor.
3. **Repetabilitatea**: suprafețele și elementele de contact se dimensionează după uzură, presiune de contact și contaminare. Pentru un dispozitiv din aluminiu, punctele supuse uzurii nu se „călesc la 58–62 HRC”; se folosesc pini, bucșe sau inserții din oțel tratat, înlocuibile, montate în corpul din aluminiu.
4. **Evacuarea piesei:** după asamblarea prin presare, ansamblul se eliberează și se evacuează fără deteriorare. Dacă tubul și carcasa formează un ajustaj cu strângere, geometria dispozitivului și mișcarea de extragere se verifică pentru a nu încărca necontrolat îmbinarea; mecanismul de evacuare poate fi manual sau pneumatic, după arhitectura aleasă.

5. **Schimbarea rapidă**: dispozitivul poate fi proiectat pentru schimbare rapidă prin prinderi cu referință repetabilă, inclusiv sisteme zero-point. Timpul de schimbare și repetabilitatea trebuie verificate pe soluția concretă; valorile de ordinul secundelor sau minutelor nu sunt universale.

În practică

Pentru SAP, dispozitivul de fixare rămâne o soluție conceptuală care trebuie dimensionată și validată. Punctele naturale de dezvoltare sunt distribuția forțelor de fixare, inserțiile de uzură, accesul și, dacă cerința de schimbare de produs o justifică, o interfață de schimbare rapidă sau zero-point. Timpul de schimbare și repetabilitatea se validează pe soluția concretă.

3.6.4 Concepte cheie: sinteză a Capitolului 3

Opt concepte trebuie reținute la finalul acestui capitol:

1. **Trei tipologii structurale:** oțel sudat (robust, ieftin), aluminiu modular (flexibil, ușor), turnat/frezat (precis, rigid). Selecția este multicriterială, nu absolută.
2. **Ghidaje liniare cu elemente de rostogolire**: durata nominală L_{10} se calculează din C/P în baza corectă a catalogului; clasa de precizie și precomprimarea sunt specifice producătorului/seriei.
3. **Rulmenți și transmisii**: rulmenții se verifică prin sarcină, turație, montaj, lubrifiere și L_{10}; șurubul cu bile, cureaua dințată și lanțul se selectează după forță, viteză, cursă, rigiditate și mentenanță.
4. **Alimentarea. Patru soluții canonice:** bowl feeder, conveior, masă rotativă, pick-and-place. Cea mai potrivită nu este cea mai sofisticată.
5. **Patru familii de presare**: pneumatică, servo-electrică, hidraulică și mecanică. Arborele din figura 3.15 este un instrument de preselectare; decizia finală se validează prin calcule, siguranță și date de catalog.
6. **Configurația SAP de referință**: cadru și ghidaje dimensionate pentru sarcina maximă ipotetică de 8 kN, axă electrică Z pentru presare și CL1/CL2 pneumatice pentru fixare. Cilindrul pneumatic Ø125 mm la 9 bar din Exemplul 3.4 aparține exclusiv variantei ALT–PNEU, supusă verificării limitelor din catalog.
7. **DfM. Proiectați pentru cine va REPARA:** accesibilitate, modularitate, standardizare, marcare, puncte de diagnosticare. Costul total de proprietate este dominat de mentenanță.
8. **FEM. Instrument de verificare**: valoarea rezultatului depinde de ipoteze, condiții de frontieră, contacte, plasă și criteriul de acceptare; pentru suduri și piese ciclice se aplică o metodă de oboseală adecvată detaliului.

3.6.5 Întrebări de reflecție

Următoarele cinci întrebări sunt destinate autoevaluării sau discuției în echipă; răspunsurile sintetice apar în nota de subsol pentru fiecare item.

1. Ce tipologie structurală ați alege pentru un echipament reconfigurat lunar? o soluție modulară poate fi favorabilă datorită demontabilității; alegerea se justifică prin rigiditate, interfețe și timpul de reconfigurare cerut.
2. De ce nu putem afirma din start că SAP „trebuie” să folosească inox sau aluminiu modular? tipologia și materialul se aleg din traseul forțelor, rigiditate, mediu, protecție anticorozivă, cost și reconfigurabilitate; materialul se justifică prin cerințe, nu prin preferință.

3. Calculați forța teoretică a unui cilindru Ø125 mm la 9 bar și estimați forța utilă pentru η = 0,85. F_{teor} ≈ 11,0 kN; F_{util} ≈ 9,4 kN, deci există rezervă față de cerința de 8 kN, cu condiția verificării presiunii admisibile în catalog.
4. Ce clasă de precizie de ghidaj ați selecta pentru o stație de plasare componente SMT? clasa se stabilește din bugetul de erori al axei și din toleranțele catalogului seriei selectate; denumirile P/SP nu sunt transferabile universal între producători.
5. Enumerați trei măsuri de proiectare pentru mentenabilitate aplicabile SAP. exemple: standardizarea familiilor de actuatoare unde sarcinile permit, identificatori consecvenți conform IEC 81346-1:2022 și puncte de măsurare/diagnostic accesibile.

3.7 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 3.1. Rigiditatea minimă a cadrului de presare

Enunț. Pentru stația SAP, bugetul de toleranțe alocă deformației cadrului cel mult 0,05 mm sub forța maximă de 8 kN. (a) Determinați rigiditatea statică minimă a cadrului pe direcția de presare. (b) Un cadru existent are k = 100 N/µm. Este acceptabil?

Răspuns. (a) $k_{min} = F / \delta_{adm}$ = 8000 N / 0,05 mm = 160 000 N/mm = 160 N/µm. (b) Cadrul cu 100 N/µm se deformează 8000 / 100 = 80 µm > 50 µm, deci nu satisface cerința. Rigiditatea trebuie crescută cu cel puțin 60 %: secțiuni închise mai mari, reducerea deschiderii, închiderea traseului forțelor (cadru tip C rigidizat sau cadru tip O) și rigidizarea îmbinărilor. Efectul fiecărei măsuri se verifică prin calcul FEM al ansamblului, nu numai al profilului izolat.

Problema 3.2. Durata nominală a unui ghidaj liniar

Enunț. O axă de transfer are cursa de 300 mm, 6 cicluri/min, funcționare 16 h/zi și 250 zile/an. Sarcina dinamică echivalentă pe patina cea mai solicitată este P = 2 500 N, iar seria aleasă are C = 20 kN, definit la baza de 50 km. Determinați durata nominală L_{10} în kilometri și în ani.

Răspuns. $L_{10} = (C/P)^3 \cdot 50$ km = $(20\,000 / 2\,500)^3 \cdot 50 = 512 \cdot 50 = 25\,600$ km. Un ciclu înseamnă 2 · 0,3 = 0,6 m, deci cursa anuală este 6 · 60 · 16 · 250 · 0,6 m = 864 km/an. Rezultă aproximativ 25 600 / 864 ≈ 29,6 ani. Durata nominală nu este limitativă; selecția se verifică în continuare prin sarcina statică, momentele admisibile, precomprimare, precizie și condițiile de lubrifiere și etanșare. Dacă C ar fi fost definit la baza de 100 km, formula s-ar fi scris cu 100 km, nu cu 50 km.

Problema 3.3. Lanț de toleranțe: worst-case și RSS

Enunț. Poziția finală a tubului în carcasă depinde de patru cote cu toleranțe simetrice: ±0,02 mm, ±0,03 mm, ±0,01 mm și ±0,04 mm. Funcția admite o abatere totală de ±0,08 mm. Evaluați lanțul prin metoda worst-case și prin metoda RSS și interpretați rezultatul.

Răspuns. Worst-case: T_{WC} = 0,02 + 0,03 + 0,01 + 0,04 = ±0,10 mm > ±0,08 mm, deci cerința nu este garantată pentru orice combinație. RSS: $T_{RSS} = \sqrt{(0{,}02^2 + 0{,}03^2 + 0{,}01^2 + 0{,}04^2)} = \sqrt{0{,}0030} \approx \pm 0{,}055$ mm <

±0,08 mm. Metoda RSS poate fi acceptată numai dacă abaterile sunt independente, centrate și cu distribuții aproximativ normale, confirmate prin capabilitatea proceselor de fabricație. Altfel se strâng toleranțele cu contribuția cea mai mare (±0,04 mm) sau se introduce un element de reglaj.

4 Subsistemul electric

Alimentare · acționări · protecții · integrare în echipament

Despre acest capitol

Capitolul anterior a definit subsistemul mecanic al echipamentului. În acest capitol, proiectantul mecanic urmărește ce consecințe electrice au deciziile sale: masa și inerția axelor determină cuplul și puterea motorului; viteza și accelerația determină cuplul de vârf și convertorul; mediul și dispunerea fizică determină IP-ul, răcirea, traseele de cablu și poziția tabloului.

Obiectivul nu este formarea unui proiectant electrician, ci dobândirea competenței de a defini corect interfețele mecanic–electric, de a face predimensionări, de a selecta tipul de acționare și de a verifica critic soluția furnizată de specialistul electric. Protecțiile și documentația sunt tratate la nivelul necesar pentru integrarea și acceptanța unui echipament industrial.

Fluxul didactic al capitolului este: cerință mecanică → acționare → drive → bilanț electric → protecție → cablare și tablou → documentație și verificare.

Standarde și referințe normative aplicabile

IEC 60204-1:2016+A1:2021, echipamentul electric al mașinilor: alimentare, separare, protecții, comandă și documentație [29].

Seria IEC 60364: instalațiile electrice de joasă tensiune și sistemele de legare la pământ [56].

Seria IEC 61439: ansamblurile de aparataj de joasă tensiune (tablouri electrice) [57].

IEC 60947-2:2024, întrerupătoarele automate de putere [58].

IEC 60529:1989+A1:1999, gradele de protecție asigurate prin carcase (cod IP) [30].

Regulamentul (UE) 2019/1781: cerințele de proiectare ecologică pentru motoare electrice și convertoare de frecvență [59].

Figura 4.1 situează capitolul în modelul V: domeniul electric contribuie în fazele de proiectare pe domenii și de proiectare de detaliu, iar interfețele cu mecanica și controlul se verifică iterativ.

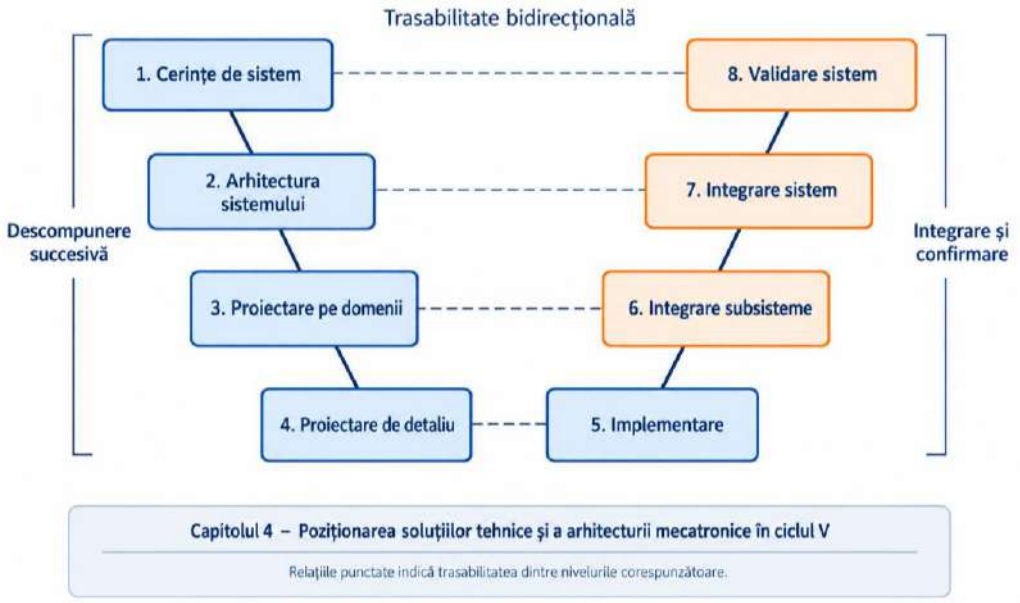


Figura 4.1. Modelul V utilizat ca reper în carte. Capitolul 4 dezvoltă contribuția domeniului electric în proiectarea pe domenii și în proiectarea de detaliu; interfețele cu mecanica și controlul se verifică iterativ pe parcursul dezvoltării.

Harta capitolului

Capitolul este organizat după fluxul de decizie al proiectantului de echipament: de la cerințele mecanice și bilanțul de energie la alegerea acționării, verificarea interfeței motor–sarcină, rolul convertorului, protecții, integrarea fizică și documentația interdisciplinară. §4.9 aplică fluxul de decizie pe stația SAP, §4.10 reunește problemele aplicative, iar §4.11 încheie capitolul cu recapitularea conceptelor-cheie și întrebări de reflecție.

Tabelul 4.1 prezintă structura capitolului pe secțiuni, cu tematica și conținutul sintetic al fiecăreia.

Tabelul 4.1. Structura Capitolului 4.

§	Tematica	Conținut sintetic
§4.1	Rolul subsistemului electric	Interfețe mecanic–electric, Model V, cadru normativ.
§4.2	Bilanțul electric	Rețea, deconectare, distribuție, 24 V DC.
§4.3	Alegerea acționării	Asincron + VFD, servo, actuator liniar, pas cu pas; dimensionare.
§4.4	Interfața motor–sarcină	Flanșe, cuplaje, aliniere, inerție, rigiditate.
§4.5	Convertor și control	Rampe, frânare, V/f, FOC, DTC, integrare PLC.
§4.6	Protecții și siguranță	Supracurent, RCD, SPD, selectivitate, LOTO.
§4.7	Integrarea fizică	Tablou, cabluri, IP, răcire, lanțuri portcablu, EMC.

§	Tematica	Conținut sintetic
§4.8	Documentație	Scheme, borne, cabluri, I/O, BOM și trasabilitate.
§4.9	Aplicație SAP	Consumatori, axa Z, protecții, integrare și documentație.
§4.10	Aplicații	Probleme de dimensionare și integrare.

Obiective de învățare

La finalul acestui capitol, studentul trebuie să poată:

- transforma cerințe mecanice (masă, inerție, viteză, accelerație, forță, cuplu și ciclu de lucru) în cerințe pentru motor, convertor de acționare și alimentare;
- selecta familia de acționare adecvată (motor asincron + VFD, servomotor, actuator liniar electric sau motor pas cu pas) și realiza o predimensionare pe baza cuplului de vârf, cuplului RMS, turației și inerțiilor reflectate;
- verifica interfața mecanică motor–sarcină: flanșă, arbore, cuplaj, reductor, aliniere, joc, rigiditate torsională și condiții de rezonanță;
- estima bilanțul de putere al echipamentului și dimensiona preliminar sursa de 24 V DC, rezerva de putere și principalele ramuri de consum;
- înțelege rolul dispozitivelor principale de protecție și al deconectării pentru mentenanță, fără a substitui verificarea de specialitate a proiectantului electric;
- integra fizic tabloul, cablurile, lanțurile portcablu, ecranările și conexiunile în dispunerea mecanică a mașinii, ținând seama de acces, IP, disipare termică și compatibilitate electromagnetică;
- citi critic setul minim de documentație electrică: schemă unifilară, scheme de forță și comandă, plan de borne, listă de cabluri, listă I/O și BOM.

Cunoștințe prealabile

Pentru parcurgerea capitolului se presupun cunoscute noțiunile de mecanică tehnică și proiectare mecanică utilizate în Capitolele 1–3: forță, cuplu, putere, viteză, accelerație, masă, moment de inerție, transmisii și toleranțe. Din electrotehnică sunt necesare numai noțiunile de bază privind tensiunea, curentul, puterea activă și funcționarea elementară a unui motor electric. Relațiile electrice mai specializate sunt introduse local, atunci când devin necesare proiectării echipamentului.

Glosar de termeni și acronime

În acest capitol se utilizează consecvent următoarele notații (variabilele apar în text în litere italice):

Tabelul 4.2. Notații utilizate în Capitolul 4.

Simbol	Semnificație și unitate
U	tensiune electrică (V); indicii LL = fază-fază, LN = fază-neutru, DC = continuă
I	curent electric (A); indicii n = nominal, k = scurtcircuit, d = diferențial
P	putere activă (W, kW); pentru rețele trifazate se subînțelege puterea totală pe trei faze

Simbol	Semnificație și unitate
S	putere aparentă (VA, kVA)
cos ϕ	factor de putere / cos ϕ; se utilizează valoarea declarată pentru regimul și sarcina analizate
η	randament (-); se utilizează valoarea declarată pentru motor, convertor de acționare sau transmisie la punctul de funcționare analizat
f	frecvență (Hz); 50 Hz pentru rețeaua europeană; frecvența de ieșire a convertorului se stabilește din domeniul motorului și al aplicației
I_{cu}	capacitatea ultimă de rupere la scurtcircuit a unui întreruptor (kA), conform standardului aplicabil și datelor producătorului
I_n	curentul nominal al unei componente sau circuit (A)
T_a	temperatura aerului ambiant (°C); valoarea de proiect se stabilește din mediul mașinii și limitele componentelor/ansamblului

Acronimele sunt definite la prima utilizare în forma agreată pentru carte, de exemplu: VFD (engl.: Variable Frequency Drive), variator de frecvență. Denumirea în limba originală este păstrată numai atunci când acronimul este consacrat internațional.

4.1 Rolul subsistemului electric în proiectarea echipamentului

4.1.1 De la cerința mecanică la soluția electrică

Într-un echipament de fabricație, proiectantul mecanic stabilește o parte importantă din cerințele electrice înainte ca schema electrică să existe. Masa și momentul de inerție al unui ax determină cuplul de accelerare; forța și viteza unui actuator determină puterea; ciclul de lucru determină încălzirea; poziția motorului și traseul mișcării determină cablurile, conectorii și lanțul portcablu; mediul de lucru determină gradul de protecție și soluția de răcire. Din acest motiv, subsistemul electric trebuie privit ca o consecință integrată a arhitecturii mașinii, nu ca un tablou proiectat separat la final.

Subsistemul electric asigură alimentarea, conversia și distribuția energiei către acționări și consumatori, protecția persoanelor și a echipamentului și suportul energetic pentru comandă, senzori și comunicații. Pentru proiectantul mecanic, obiectivul principal este definirea corectă a interfețelor: ce putere și ce regim dinamic solicită mecanismul, ce spațiu și ce condiții de mediu există, ce funcții trebuie menținute la oprire și ce verificări sunt necesare la punerea în funcțiune.

În proiectarea reală, domeniile mecanic, electric și de control evoluează iterativ. Alegerea unui reductor modifică inerția reflectată și poate permite un motor mai mic; alegerea unui servomotor poate impune o altă flanșă și un alt cuplaj; amplasarea tabloului modifică lungimile cablurilor și condițiile EMC; necesitatea unei opriri controlate poate introduce frână mecanică, rezistor de frânare sau unitate regenerativă. Capitolul urmărește tocmai aceste legături de proiectare.

În practică

În revizia interdisciplinară a unei mașini, proiectantul mecanic trebuie să poată răspunde la patru întrebări: ce sarcină mecanică vede fiecare motor, unde sunt montate motorul și convertorul, cum se deplasează cablurile și ce energie trebuie disipată la oprire. Dimensionarea finală a protecțiilor și conformitatea instalației rămân responsabilitatea specialistului electric, dar datele de intrare provin în mare parte din proiectarea mecanică.

4.1.2 Plasarea în Modelul V și interfețele dintre domenii

Modelul V introdus în Capitolul 1 plasează proiectarea mecanică și electrică în aceeași zonă de dezvoltare pe domenii și de proiectare de detaliu. Capitolul 4 nu reprezintă o etapă care începe „după mecanic”, ci o aprofundare a domeniului electric pornind de la interfețele deja stabilite: sarcini, mișcări, spațiu, mediu, acces și cerințe de siguranță. Figura 4.1 este aceeași reprezentare de referință folosită în capitolele precedente, pentru a păstra unitatea metodologică a cărții.

Consecința practică este că proiectantul mecanic și proiectantul electric trebuie să schimbe date pe tot parcursul dezvoltării. Mecanicul furnizează profilurile de mișcare, inerțiile, cuplurile, forțele, regimul de lucru, pozițiile de montaj și condițiile de mediu; specialistul electric întoarce puteri instalate, curenți, dimensiuni ale motorului și convertorului de acționare, cerințe de răcire, cablare, protecții și restricții EMC. Orice modificare relevantă într-un domeniu trebuie reevaluată la interfață.

4.1.3 Cadrul normativ: standardele pe care proiectantul trebuie să le cunoască

Standardul central pentru echipamentul electric al mașinilor este IEC 60204-1:2016+AMD1:2021, ediția consolidată curentă la data redactării. El trebuie utilizat împreună cu standardele de produs și de instalație aplicabile: IEC 60364 pentru instalația de joasă tensiune din amonte, IEC 61439 pentru ansambluri de aparataj, IEC 60947 pentru aparataj industrial, IEC 61800 pentru sisteme de acționare cu viteză variabilă și IEC 60529 pentru gradele de protecție ale carcaselor. Respectarea unui standard armonizat poate conferi prezumție de conformitate pentru cerințele pe care le acoperă, în condițiile legislației aplicabile; marcajul CE rezultă din evaluarea conformității ansamblului de obligații aplicabile, nu din simpla citare a unui singur standard [29], [56]–[60], [30].

Familia IEC pentru echipamente electrice industriale

IEC 60204-1:2016+A1:2021, echipamentul electric al mașinilor.
IEC 60364 (multipart): instalații electrice de joasă tensiune și interfața instalației din amonte.
IEC 61439 (multipart): ansambluri de aparataj de joasă tensiune.
IEC 60947 (multipart): aparataj de comutație și comandă de joasă tensiune.
IEC 60898-1:2015+A1:2019, întreruptoare pentru protecție la supracurent în domeniul său de aplicare; include caracteristicile B/C/D.
IEC 60529:1989+A1:1999+A2:2013, grade de protecție asigurate de carcase (cod IP).

IEC 60204-1 organizează cerințele pe secțiuni numerotate (§4–§19) care acoperă, în ordine: cerințele generale și mediul de funcționare; alimentarea electrică; conductoarele de protecție; comanda și protecția împotriva electrocutării; comutarea principală și de izolare; protecția împotriva supracurenților; comanda; interfețele om-mașină; cablarea internă; circuitele auxiliare; motoarele și acționările; etichetarea, marcajul și documentația. În acest capitol, fiecare secțiune face referință la articolul IEC 60204-1 corespunzător, cu indicarea numărului de paragraf: convenția §5.3 indică, de exemplu, paragraful 5.3 al standardului (Supply disconnecting (isolating) device), care reglementează întreruptorul principal.

La nivel european, proiectarea trebuie corelată cu legislația aplicabilă produsului și mașinii. Directiva 2006/42/CE rămâne cadrul principal pentru mașinile introduse pe piață până la 19 ianuarie 2027; Regulamentul (UE) 2023/1230 se aplică, în general, de la 20 ianuarie 2027. Pentru motoare și variatoare sunt relevante și cerințele de proiectare ecologică din Regulamentul (UE) 2019/1781, în forma sa consolidată și cu amendamentele aplicabile. Conformitatea nu rezultă din simpla citare a unui standard: standardele oferă soluții tehnice pentru cerințe acoperite, iar evaluarea conformității privește ansamblul și legislația aplicabilă [31], [28], [59].

4.1.4 Fluxul de proiectare pentru inginerul mecanic

Capitolul este organizat după deciziile pe care trebuie să le ia proiectantul de echipament. Mai întâi se construiește bilanțul electric din cerințele mecanice și din datele rețelei (§4.2). Apoi se selectează și se dimensionează acționarea pornind de la mecanism (§4.3), se verifică interfața mecanică motor–sarcină (§4.4) și se stabilește rolul convertorului în comportamentul mecanismului (§4.5). Protecțiile și siguranța electrică sunt tratate la nivel de integrare și verificare (§4.6), urmate de integrarea fizică a tabloului și a cablurilor în mașină (§4.7) și de documentația pe care un inginer mecanic trebuie să o poată citi și furniza colegilor electricieni (§4.8).

Exemplele rezolvate sunt păstrate acolo unde transformă o cerință de sistem într-o decizie verificabilă. Accentul cade pe lanțul cauzal mecanic → electric și pe verificarea critică a rezultatelor, nu pe memorarea unor valori comerciale sau a unor parametri specifici unei singure platforme.

4.2 De la cerința mecanică la bilanțul electric al echipamentului

4.2.1 Datele de intrare: rețeaua fabricii și consumatorii echipamentului

Datele de alimentare trebuie stabilite împreună cu beneficiarul înainte de înghețarea arhitecturii electrice: tensiunea nominală și frecvența, sistemul de legare la pământ, curentul prospectiv de scurtcircuit la punctul de racord și condițiile de alimentare relevante. În multe instalații de joasă tensiune din Europa se întâlnește alimentarea trifazată 400/230 V, 50 Hz, dar aceasta nu trebuie presupusă fără confirmarea instalației concrete. Pentru echipamente destinate exportului, valorile și configurația rețelei se tratează explicit ca cerințe de interfață [56].

Diferența dintre sistemele de alimentare influențează tensiunile nominale ale motoarelor și convertoarelor de acționare, aparatajul de protecție și documentația de export. Turația sincronă a unui motor asincron depinde de frecvență și de numărul de poli, dar într-o aplicație cu VFD turația de lucru este stabilită de convertorul de acționare în limitele motorului și ale mecanismului. Pentru proiectantul mecanic, concluzia utilă este simplă: tensiunea, frecvența, sistemul de legare la pământ și curentul de

scurtcircuit disponibil la punctul de racord sunt date de intrare obligatorii înainte de înghețarea arhitecturii.

Relația matematică fundamentală între tensiunea fază-fază și tensiunea fază-neutru, pentru un sistem trifazat simetric, este:

$$U_{\mathrm{LL}} = \sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{LN}} \tag{4.1}$$

unde U_{LL} este tensiunea efectivă (RMS) între două faze și U_{LN} este tensiunea efectivă între o fază și neutru. Pentru rețeaua europeană, U_{LN} = 230 V conduce la $U_{LL} = 230 \cdot \sqrt{3} \approx 398$ V, valoare rotunjită convențional la 400 V. Puterea activă consumată de un echipament trifazat echilibrat se calculează cu relația:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{LL}} \cdot I \cdot \cos\varphi \tag{4.2}$$

unde I este curentul RMS de linie, iar factorul de putere trebuie interpretat corect pentru sarcini nesinusoidale. La un motor conectat direct, relația cu cos ϕ este adecvată în regim sinusoidal. La intrarea unui VFD cu redresor cu diode și condensator pe magistrala DC, curentul poate fi puternic nesinusoidal; factorul de deplasare poate fi apropiat de unitate, dar factorul de putere total este influențat de armonici. Pentru bilanț și dimensionare se folosesc curentul nominal de intrare, factorul de putere și distorsiunea armonică declarate de producătorul convertorului, nu o valoare universală de 0,95–0,99.

Configurațiile de împământare TN-S, TN-C-S, TT

Configurația de legare la pământ a rețelei influențează metoda de protecție la defect și trebuie cunoscută înainte de proiectarea echipamentului (Figura 4.2). Figura de mai jos compară trei configurații uzuale întâlnite în instalații de joasă tensiune; aplicabilitatea exactă și condițiile de deconectare se verifică în proiectul instalației beneficiarului și în IEC 60364 [56].

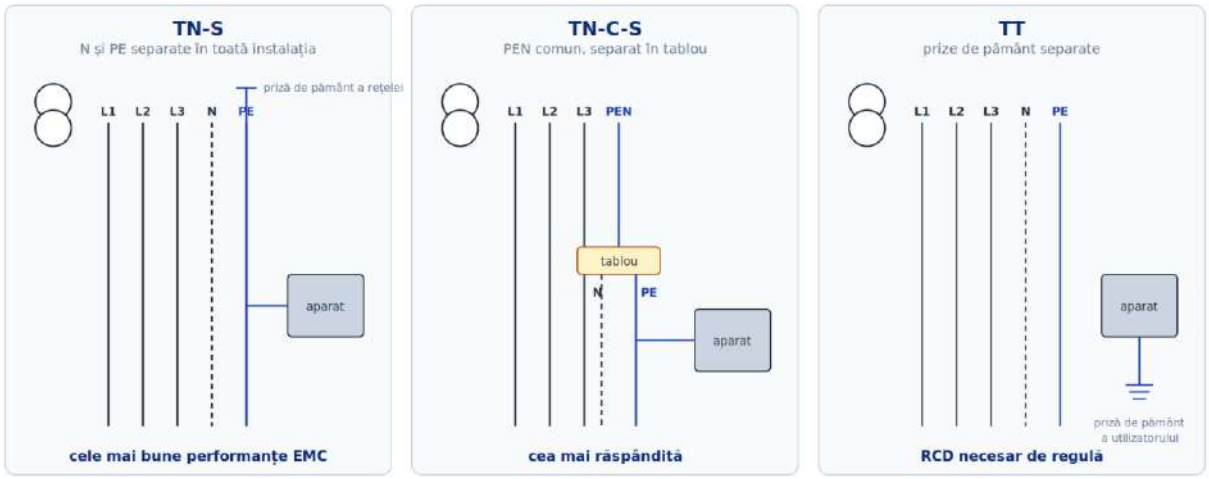


Figura 4.2. Configurațiile de împământare TN-S, TN-C-S și TT, conform IEC 60364. Conductorul PE este desenat cu albastru. Diferența esențială este modul în care se închide bucla curentului de defect spre pământ.

Tabelul 4.3 rezumă sistemele de distribuție de joasă tensiune definite de IEC 60364 și aplicabilitatea lor în mediul industrial.

Tabelul 4.3. Sisteme de distribuție de joasă tensiune conform IEC 60364, cu aplicabilitate în mediul industrial.

Sistem	Definiție	Aplicație tipică în industrie
TN-S	Neutru la pământ; conductoarele N și PE separate pe toată instalația	Utilizat în numeroase instalații industriale; separarea N/PE facilitează gestionarea curenților de protecție și a compatibilității EMC.
TN-C-S	PEN comun până la tablou, separat în N și PE după	Întâlnit în instalații în care conductorul PEN este separat ulterior în N și PE; condițiile de separare se verifică în proiectul instalației.
TT	Neutru la pământ; masele legate la o priză de pământ separată a utilizatorului	Masele instalației utilizatorului sunt legate la o priză de pământ proprie; protecția la defect se proiectează conform IEC 60364, frecvent cu RCD.

În contextul echipamentelor de fabricație, clasificarea sistemului de legare la pământ are o consecință practică directă: metoda de protecție la defect și condițiile de deconectare depind de configurația rețelei și de impedanța buclei de defect. În sisteme TN, protecția la supracurent poate asigura deconectarea dacă sunt îndeplinite condițiile impuse de instalație; în sisteme TT, protecția prin RCD este utilizată în mod obișnuit deoarece curentul de defect este limitat de prizele de pământ. Schema echipamentului trebuie coordonată cu instalația beneficiarului, nu proiectată pe baza unei configurații presupuse [56].

> **În practică**
> La revizia unei scheme electrice trebuie confirmate explicit sistemul de legare la pământ și condițiile de deconectare ale instalației beneficiarului. O schemă proiectată pentru o configurație și conectată ulterior la alta fără reevaluarea protecției poate conduce la neîndeplinirea condițiilor de deconectare automată și la riscuri de electrocutare sau incendiu. Modificarea se tratează prin analiză și verificare, nu ca adaptare informală în teren.

4.2.2 Deconectarea principală și LOTO

Conform IEC 60204-1 §5.3, pentru alimentarea echipamentului electric al mașinii trebuie prevăzut un dispozitiv de deconectare a alimentării, cu excepțiile și condițiile definite de standard pentru configurația concretă. Rolul său este izolarea alimentării pentru intervenții și permiterea unei stări controlate de deconectare; atunci când procedura de mentenanță o cere, dispozitivul trebuie să poată fi securizat împotriva reînchiderii neintenționate [29].

Cerințele pentru dispozitivul de deconectare se verifică direct în IEC 60204-1 și în proiectul instalației [29]. Se urmăresc, între altele, capacitatea de a întrerupe conductoarele active cerute de configurație, accesibilitatea pentru operare, indicarea clară a poziției și posibilitatea de securizare în poziția deconectat atunci când aceasta este necesară. Conductorul de protecție PE nu se utilizează ca pol de întrerupere al dispozitivului principal; continuitatea circuitului de protecție se păstrează conform cerințelor standardului.

În practica industrială, funcția de deconectare poate fi realizată prin separatoare, întreruptoare-separatoare, întreruptoare automate adecvate izolării sau soluții cu siguranțe, în funcție de curent,

capacitatea de rupere, coordonarea protecțiilor, procedura de mentenanță și arhitectura tabloului. Nu se adoptă praguri universale de curent pentru alegerea tipului; selecția se face din datele instalației și din caracteristicile aparatului concret.

> **În practică**
>
> LOTO este o procedură organizațională de control al energiilor periculoase utilizată la mentenanță. Cerințele legale și procedurile interne diferă în funcție de jurisdicție și de beneficiar; proiectantul trebuie să asigure mijloace tehnice adecvate de izolare și securizare împotriva reenergizării neintenționate. Numărul și tipul punctelor de blocare se stabilesc din procedura de mentenanță și evaluarea riscului, nu dintr-o regulă universală privind numărul de lacăte.

4.2.3 Distribuția energiei în interiorul echipamentului

În aval de întreruptorul principal, energia electrică este distribuită în interiorul tabloului spre subansamblele funcționale ale echipamentului. Fluxul descendent al energiei urmează tipic schema din Figura 4.3: rețea fabrică → întreruptor principal → bară de distribuție de distribuție → ramuri funcționale (acționări de forță, transformator pentru circuite auxiliare, surse DC pentru comandă). Acest flux nu este o convenție grafică, ci reflectă o realitate fizică: fiecare componentă în aval primește energia procesată de componentele din amonte.

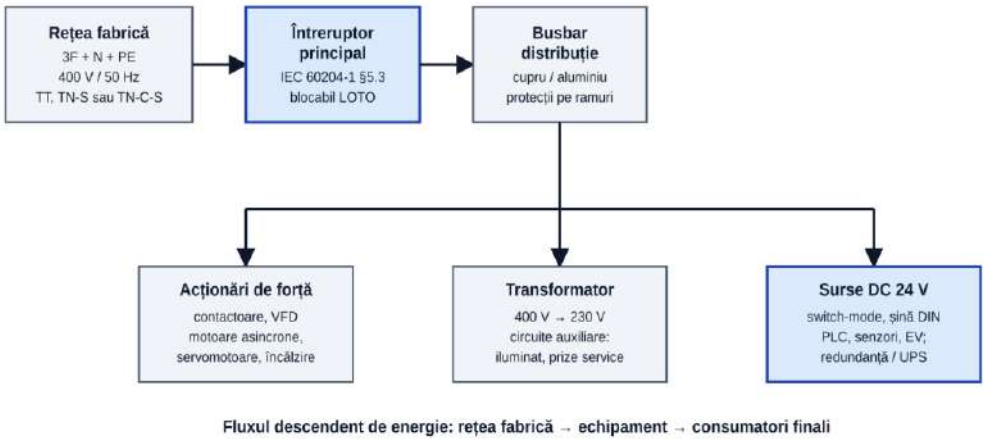


Figura 4.3. Fluxul descendent de energie în arhitectura electrică tipică a unui echipament de fabricație. Săgețile indică sensul transferului de energie, nu al circulației curentului electric. Distribuția se face printr-un bară de distribuție central spre trei ramuri funcționale: forță (motoare, încălzire), auxiliar (iluminat, prize service) și comandă (PLC, senzori).

Bara de distribuție (busbar) este un conductor rigid, uzual din cupru sau aluminiu, utilizat pentru repartizarea energiei spre ramurile funcționale ale tabloului. Avantajele și limitele față de cablarea radială depind de arhitectura ansamblului. Alegerea secțiunii, a distanțelor de izolație, a suporturilor și a capacității la scurtcircuit se face în cadrul sistemului de ansamblu verificat conform IEC 61439 și pe baza datelor producătorului [57]. Pentru proiectantul mecanic sunt importante gabaritul, masa, zona de acces și disiparea termică asociată tabloului.

Distribuția este organizată în general pe ramuri funcționale, nu geografice, adică fiecare ramură deservește un tip de sarcină (toate motoarele de forță, toate sursele de comandă, toate circuitele de iluminat), nu o zonă fizică din echipament. Această organizare are două avantaje critice: permite oprirea

selectivă a unei categorii de sarcini (de exemplu, oprirea motoarelor pentru intervenția pe partea mecanică, păstrând alimentarea PLC-ului și a HMI-ului pentru diagnostic) și simplifică verificarea selectivității protecțiilor (Secțiunea 4.6.6).

4.2.4 Alimentarea circuitelor de comandă: 24 V DC

În echipamentele de fabricație, 24 V DC este o tensiune foarte răspândită pentru PLC, module I/O, senzori, numeroase electrovalve și elemente de semnalizare (Tabelul 4.4). Ea poate fi utilizată în circuite PELV atunci când sunt îndeplinite condițiile de separare și protecție prevăzute de standardele aplicabile. Valoarea de 24 V DC trebuie tratată ca o convenție industrială larg utilizată, nu ca o tensiune impusă universal de IEC 60204-1 [29], [56].

Conversia de la tensiunea AC a rețelei la tensiunea DC de comandă este realizată frecvent prin surse în comutație montate pe șină DIN. Pentru proiectare sunt relevante randamentul, curentul nominal, comportamentul la suprasarcină, temperatura, reducerea admisibilă a sarcinii, imunizarea la perturbații și posibilitățile de redundanță sau back-up; toate aceste valori se verifică în fișa tehnică a sursei selectate.

Tabelul 4.4. Tipuri de surse de alimentare DC 24 V utilizate în echipamentele de fabricație industrială.

Tip sursă	Caracteristici principale	Aplicație tipică
Sursă în comutație pe șină DIN	Format compact; randament și comportament la suprasarcină dependente de model; tensiune de ieșire reglabilă în limitele fișei tehnice.	Alimentarea standard a circuitelor de comandă pentru orice echipament. Producători de referință: Siemens SITOP, Phoenix Contact QUINT, Puls DIMENSION, TDK-Lambda DRB, Mean Well HDR.
Configurație redundantă (1+1)	Două surse identice + modul de decuplare cu diode; dacă o sursă cedează, cealaltă preia automat sarcina, fără întrerupere a tensiunii.	Procese pentru care cerința de disponibilitate justifică eliminarea unui punct unic de defect; analiza se bazează pe criticitate și consecința opririi.
UPS industrial 24 V DC	Sursă/convertor + modul de stocare a energiei și circuit de management; autonomia se dimensionează din sarcina reală și timpul necesar funcției de back-up.	Echipamente care trebuie să păstreze alimentarea suficient timp pentru oprire controlată, salvare de date sau continuarea temporară a unor funcții critice.

Dimensionarea preliminară a sursei de 24 V DC poate fi făcută de proiectantul de sistem în patru pași: inventarierea consumatorilor, identificarea regimurilor simultane, verificarea vârfurilor de curent și adăugarea unei rezerve explicite pentru extensii. Factorii de simultaneitate nu se presupun generic; se justifică din secvența de funcționare sau, dacă aceasta nu este încă stabilă, se dimensionează conservativ și se verifică ulterior pe ciclul real.

Exemplul rezolvat 4.1. Dimensionarea sursei DC pentru o stație de asamblare

Enunț. Se proiectează o stație de asamblare automată având următorii consumatori alimentați la 24 V DC: un PLC Siemens S7-1500 CPU 1515-2 PN (consum 800 mA); patru module DI/DO de 16 canale (200 mA fiecare); o interfață HMI 7” (450 mA); douăsprezece electrovalve pneumatice 5/2 (curent nominal 80 mA fiecare, curent de pornire tranzitoriu 250 mA); douăzeci de senzori inductivi M12 (15 mA fiecare); patru relee auxiliare de siguranță (50 mA fiecare). Factorul de simultaneitate pentru electrovalve este de 0,5 (cel mult 6 din 12 sunt active simultan). Să se dimensioneze sursa de alimentare 24 V cu marjă de 25 % pentru extensii viitoare.

Soluție. Se calculează curentul nominal pe categorii de consumatori și se aplică factorul de simultaneitate acolo unde este cazul.

Curent constant de regim, fără electrovalve:

$$I_{\text{static}} = 0{,}800 + 4 \cdot 0{,}200 + 0{,}450 + 20 \cdot 0{,}015 + 4 \cdot 0{,}050 = 2{,}55\ \text{A} \tag{4.3}$$

Curentul mediu absorbit de electrovalve, cu factor de simultaneitate 0,5:

$$I_{\text{EV}} = 12 \cdot 0{,}080 \cdot 0{,}5 = 0{,}48\ \text{A} \tag{4.4}$$

Curentul nominal total în regim staționar:

$$I_{\text{regim}} = 2{,}55 + 0{,}48 = 3{,}03\ \text{A} \tag{4.5}$$

Curentul de vârf simultan, considerând activarea simultană a 6 electrovalve la pornire:

$$I_{\text{vârf}} = 2{,}55 + 6 \cdot 0{,}250 = 4{,}05\ \text{A} \quad (\text{durată scurtă}, \approx 50\ \text{ms}) \tag{4.6}$$

Curentul de dimensionare cu marjă 25 %:

$$I_{\text{sursă}} = 1{,}25 \cdot 3{,}03 \approx 3{,}79\ \text{A} \tag{4.7}$$

Selectare. Se alege o sursă industrială de 24 V / 5 A a cărei fișă tehnică demonstrează curentul continuu necesar și capabilitatea de a susține vârful tranzitoriu calculat. Codul de produs se stabilește numai după verificarea temperaturii, deratingului, protecțiilor și cerințelor de disponibilitate.

Verificare critică. Dacă cerința de disponibilitate nu permite ca sursa să constituie un punct unic de defect, se analizează o arhitectură redundantă sau o alimentare neîntreruptibilă. Autonomia și nivelul de redundanță se dimensionează din funcțiile care trebuie menținute și din timpul de oprire controlată necesar.

Exemplul de mai sus arată că o sursă de 24 V DC nu se selectează numai după curentul nominal de regim. Se verifică separat curentul staționar, vârfurile tranzitorii, secvența reală de simultaneitate și rezerva pentru extindere. Redundanța sau alimentarea neîntreruptibilă se justifică prin cerința de disponibilitate a echipamentului și prin consecința economică a unei opriri, nu printr-un prag generic de cost.

4.3 Alegerea și dimensionarea acționării electrice

4.3.1 Familia de acționare se alege pornind de la mecanism

Două mecanisme pot necesita aceeași putere mecanică nominală și totuși acționări radical diferite. Un conveior cere în principal reglaj robust de viteză; o axă de poziționare cere cuplu de vârf, semnal de reacție, control al poziției și rigiditate dinamică. De aceea familia de acționare se alege din cerințele mecanismului (profil de mișcare, precizie, inerție, regim termic și posibilitatea recuperării sau disipării energiei) nu doar din puterea înscrisă pe plăcuță.

Pentru proiectarea echipamentelor este utilă împărțirea în patru familii: motor asincron comandat prin VFD, servomotor PMSM, actuator liniar electric și motor pas cu pas (Tabelul 4.5). Figura următoare este o hartă de orientare, nu o limită de catalog: domeniile se suprapun, iar selecția finală se face prin calculul cuplului, vitezei, ciclului, inerției și al preciziei cerute.

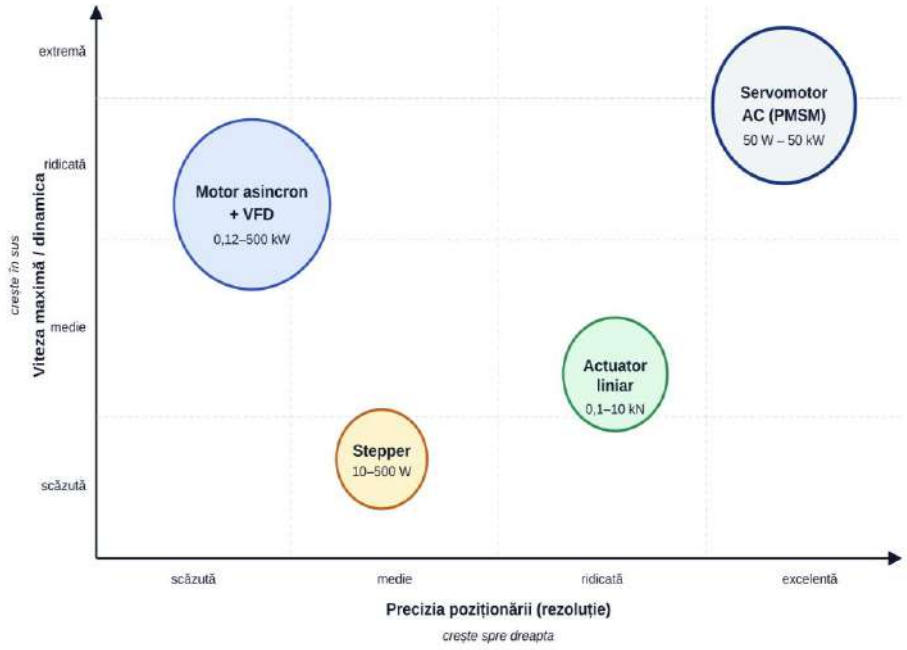


Figura 4.4. Cele patru familii principale de acționări electrice industriale, plasate pe matricea viteză × precizie a poziționării. Selecția corectă pentru o aplicație dată depinde de poziționarea cerințelor în acest spațiu.

Plasarea familiilor pe matrice are rol orientativ. Motorul asincron trifazat cu VFD este o soluție robustă pentru mișcări la viteză controlată fără cerințe stricte de poziționare; servomotorul PMSM este preferat când sunt necesare poziționare, sincronizare și dinamică ridicată; actuatorul liniar electric integrează motorul cu transmisia mecanică și este adecvat mișcărilor liniare programabile; motorul pas cu pas rămâne potrivit pentru axe cu puteri și viteze moderate, atunci când riscul pierderii pașilor este controlat (Figura 4.4). Selecția finală rezultă din profilul de mișcare, cuplul/forța, inerția, precizia, ciclul de lucru și condițiile de integrare [61], [62].

Tabelul 4.5. Cele patru familii principale de acționări electrice utilizate în echipamentele de fabricație industrială.

Familie	Game tipice	Caracteristici principale	Aplicații industriale tipice
Motor asincron + VFD	de la puteri mici la sute de kW, în funcție de serie	Soluție robustă pentru reglaj de viteză; performanța de cuplu depinde de motor, VFD și strategia de control; datele se verifică în curbele producătorului.	Conveioare, pompe, ventilatoare, mixere, mori, malaxoare, extrudere: orice sarcină pe direcție unică, fără cerințe de poziționare.
Servomotor AC (PMSM)	game de la zeci de wați la zeci de kW, în funcție de platformă	Cuplu continuu și de vârf definite prin curbele motor–drive; poziționare în buclă închisă; funcționare multi-cadran posibilă în funcție de sistem.	Roboți industriali, axe de mașini-unelte CNC, prese servo, mașini de imprimat, pick-and-place, mașini de bobinat.
Actuator liniar electric	forță, cursă și viteză dependente de tehnologia transmisiei și serie	Mișcare liniară programabilă; precizia și rigiditatea depind de transmisie, ghidare, feedback și montaj; comparația cu pneumatica se face pe ciclu de viață.	Sisteme de poziționare pentru asamblare, prese de testare, axe de manipulare, dispozitive de strângere automate.

Familie	Game tipice	Caracteristici principale	Aplicații industriale tipice
Motor pas cu pas	puterea și viteza depind de mărime, tensiune și driver	Poate funcționa în buclă deschisă sau închisă; unghiul de pas și microstepping-ul depind de motor și driver; trebuie verificată rezerva de cuplu pe curba viteză–cuplu.	Imprimante 3D industriale, axe Z auxiliare, sisteme de dozare cu seringă, dispozitive de etichetare, mecanisme de indexare lentă.

> **În practică**
>
> Selecția începe de la mecanism: dacă se cere doar reglaj de viteză, motorul asincron cu VFD este de regulă prima variantă analizată. Dacă se cere poziționare, se compară servoacționarea, actuatorul liniar electric și motorul pas cu pas. Decizia se fundamentează pe profilul de mișcare, cuplul/forța, inerția, precizia, ciclul de lucru și condițiile de integrare, nu pe o preferință de tehnologie.

4.3.2 Motorul asincron + VFD: pentru mișcare și reglaj de viteză

Motorul asincron trifazat cu rotor în colivie este o soluție foarte robustă pentru acționări cu viteză reglată, conveioare, pompe, ventilatoare și mecanisme în care poziționarea precisă nu este funcția principală (Figura 4.5). Pentru proiectantul mecanic sunt decisive forma caracteristicii cuplu–turație, cuplul de pornire, regimul termic, montajul, inerția rotorului și compatibilitatea cu VFD-ul ales; costurile și randamentul se verifică în catalogul generației concrete.

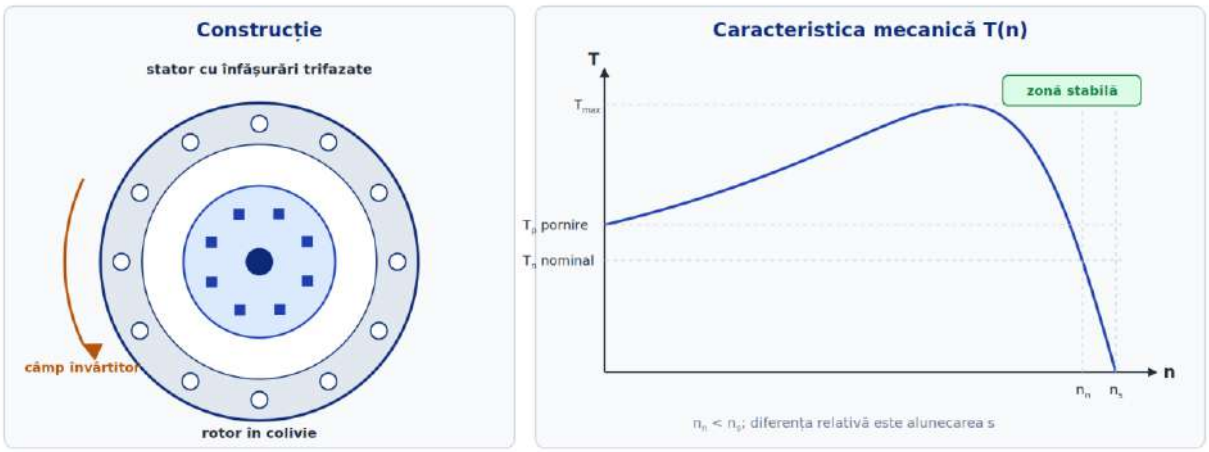


Figura 4.5. Motorul asincron trifazat: structura constructivă (stator cu înfășurări, rotor în colivie) și caracteristica mecanică T(n). Câmpul magnetic rotativ generat de stator induce curenți în barele rotorului; interacțiunea acestor curenți cu câmpul produce cuplul motor.

Caracteristica mecanică T(n) descrie cuplul disponibil la arbore în funcție de turația de funcționare. Pentru proiectare se urmăresc cuplul de pornire, cuplul maxim și cuplul nominal, dar rapoartele dintre acestea depind de construcția și seria motorului și se preiau din datele producătorului. Diferența relativă dintre turația sincronă n_s și turația reală n se numește alunecare [61], [62]:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{4.8}$$

La motorul asincron, turația rotorului diferă de turația sincronă atunci când motorul dezvoltă cuplu; alunecarea nominală depinde de proiectarea motorului, putere și punctul de funcționare și se verifică în datele nominale ale mașinii. Exemplul clasic al unui motor cu 4 poli la 50 Hz pornește de la turația sincronă:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.500 \text{ rpm} \tag{4.9}$$

unde f este frecvența rețelei, iar p numărul de perechi de poli; turația nominală efectivă nu trebuie însă dedusă dintr-un interval generic [61], [62].

Clase de eficiență: Regulamentul UE 2019/1781

Regulamentul (UE) 2019/1781 stabilește cerințe minime de eficiență pentru anumite categorii de motoare și variatoare introduse pe piața europeană, cu domeniu de aplicare și excepții definite explicit. Clasele IE pentru motoarele incluse în domeniul standardului sunt definite prin IEC 60034-30-1:2025. Pentru proiectare se verifică simultan regulamentul consolidat, domeniul standardului și documentația produsului; nu se utilizează un singur prag procentual de randament pentru toate motoarele dintr-o clasă [59], [63].

> **În practică**
>
> Clasa de eficiență a motorului se selectează conform cerințelor de ecodesign aplicabile și profilului real de funcționare. Beneficiul economic al unei clase superioare depinde de putere, sarcină, orele anuale, randamentul în punctele de lucru și costul energiei; perioada de recuperare se calculează pentru aplicația concretă.

4.3.3 Servomotorul PMSM: pentru poziționare și dinamică ridicată

Servomotorul sincron cu magneți permanenți, PMSM (engl.: Permanent Magnet Synchronous Motor), este utilizat frecvent pentru axe care cer poziționare, sincronizare sau variații rapide de cuplu. Rotorul urmărește câmpul sincron în regim stabil, iar convertorul reglează curenții statorici pe baza semnalului de reacție de poziție. Pentru proiectantul mecanic contează în primul rând cuplul continuu, cuplul de vârf admis, viteza maximă, inerția rotorului, tipul și rezoluția feedbackului, frâna de menținere și geometria flanșei (Figura 4.6) [62].

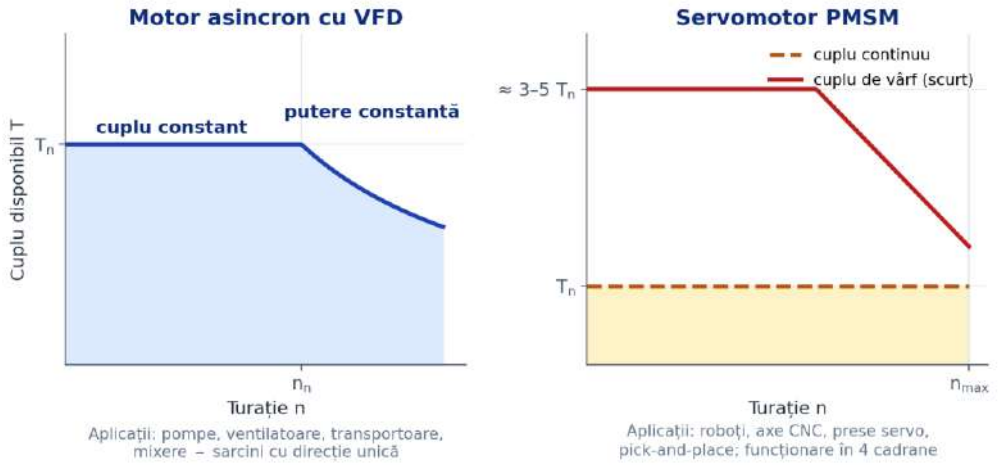


Figura 4.6. Comparație conceptuală între motorul asincron cu VFD și servomotorul PMSM, pe planul cuplu disponibil–turație. Servoacționările pot furniza un cuplu de vârf superior cuplului continuu pentru intervale limitate; raportul și durata admisă se verifică în curba cuplu–viteză și în datele termice ale sistemului selectat.

Într-o servoaxă industrială, motorul este alimentat de un servoamplificator care închide buclele de curent, viteză și, de regulă, poziție. Frecvențele de eșantionare și rezoluțiile encoderelor diferă între platforme; proiectantul nu trebuie să le transforme în criterii universale, ci să verifice dacă banda de control și semnalul de reacție susțin profilul de mișcare și repetabilitatea cerute de mecanism.

> **În practică**
>
> Servoacționarea trebuie tratată ca un sistem motor–servoamplificator–encoder–cabluri–control. Familii industriale mature există la Siemens, Bosch Rexroth, Beckhoff, B&R, Rockwell Automation, Yaskawa și alți furnizori. Pentru proiectantul mecanic sunt decisive curbele cuplu–viteză, inerția rotorului, frâna, geometria flanșei, feedback-ul și compatibilitatea cu controlerul de mișcare; marca se selectează în contextul ecosistemului beneficiarului.

4.3.4 Actuatorul liniar electric: când mecanismul cere poziții intermediare

În alegerea unui actuator liniar, proiectantul compară cerințele de forță, cursă, profil de mișcare, control, rigiditate, mediu și cost pe ciclul de viață. Un cilindru pneumatic poate fi adecvat mișcărilor discrete și rapide; un actuator electric permite configurarea unui profil de deplasare și integrarea unei măsurări forță–poziție, cu condiția ca motorul, transmisia și traductoarele să fie dimensionate și validate. În SAP de referință (PEF–SAP–BASE–001), axa de presare Z este electrică, iar fixarea CL1/CL2 este pneumatică. Figura 4.7 reprezintă principiul unui actuator cu șurub cu bile; tipul constructiv, avansul, forța și cursa SAP rămân parametri de dimensionat, nu caracteristici deja demonstrate.

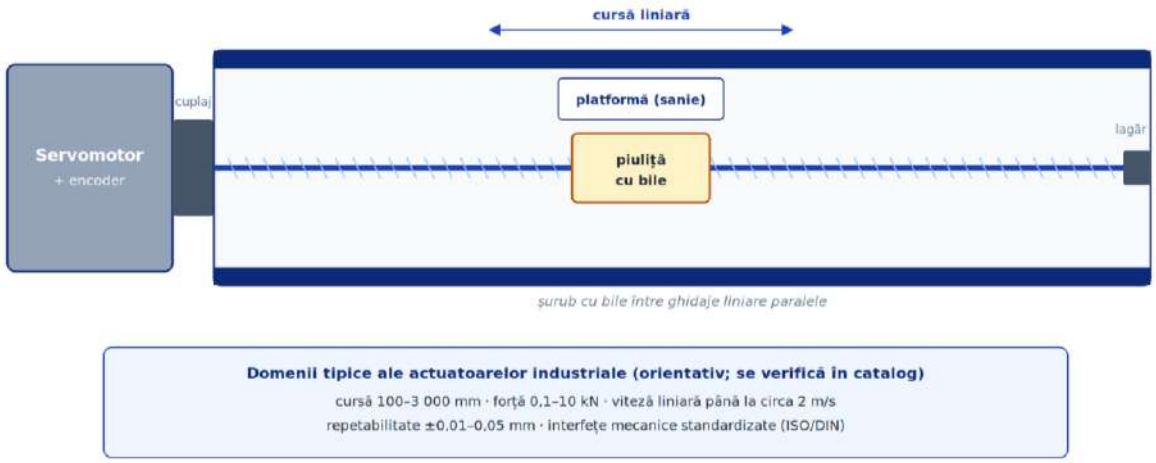


Figura 4.7. Construcția unui actuator liniar electric cu șurub cu bile (Ball Screw Actuator). Mișcarea de rotație a servomotorului este transformată în mișcare liniară a piuliței prin angrenare cu bile pe șurubul filetat. Ghidajele liniare paralele preiau forțele radiale.

Trei arhitecturi sunt frecvente: șurub cu bile, curea sincronă și motor liniar [64]. Șurubul cu bile favorizează forța și rigiditatea axială; cureaua favorizează cursele lungi și viteza; motorul liniar elimină transmisia mecanică și poate oferi dinamică și precizie foarte ridicate, cu cerințe mai mari de semnal de reacție, răcire și cost. Valorile de forță, cursă, viteză și repetabilitate se iau din catalogul seriei selectate, deoarece intervalele se suprapun semnificativ între tehnologii.

> **În practică**
>
> La actuatoarele liniare se compară tehnologia de transmisie (șurub cu bile, curea sincronă sau motor liniar) înaintea mărcii comerciale. Se verifică forța continuă și de vârf, viteza, cursa, rigiditatea, jocul, durata de viață, lubrifierea, condițiile de montaj și interfața cu ghidajele. În proiectele de conversie pneumatic–electric trebuie verificată explicit compatibilitatea mecanică; similaritatea de gabarit nu garantează interschimbabilitatea.

4.3.5 Motorul pas cu pas: poziționare simplă și limitările buclei deschise

Motorul pas cu pas este o soluție simplă pentru axe de putere redusă și profiluri de mișcare moderate. Comanda poate fi realizată în buclă deschisă numai dacă există suficientă rezervă de cuplu pe întreaga diagramă viteză–cuplu; numărul de pași comandați nu garantează singur poziția reală dacă motorul pierde sincronismul. Pentru aplicații critice se utilizează semnal de reacție sau se trece la o servoaxă.

Limitarea fundamentală a stepper-ului este pierderea pașilor: dacă sarcina depășește momentan cuplul motor (cauza tipică: cuplu rezistent variabil sau accelerare bruscă), rotorul se oprește în timp ce convertorul de comandă continuă să comande pași, iar poziția reală diferă de cea presupusă. Întrucât nu există semnal de reacție, eroarea se acumulează silențios până la o procedură de re-referențiere (homing). Pentru aplicații în care această problemă este inacceptabilă, există stepper-e hibride cu encoder integrat, denumite uneori „closed-loop stepper”, care combină economia stepper-ului cu siguranța semnalul de reacțieui unui servomotor; producători de referință: Leadshine ES-D series, OMC StepperOnline CL series, JMC iHSV. Pentru un proiectant care evaluează stepper vs. servomotor, regula practică este: pentru cicluri scurte și sarcini mici constante, stepper este suficient; pentru cicluri lungi sau sarcini variabile, servomotorul este alegerea sigură.

4.3.6 Metodologia de dimensionare în șase pași

Dimensionarea unei acționări se face în șase pași, dintre care primii patru pornesc direct din modelul mecanic. Metodologia este comună motoarelor asincrone, servoaxelor și actuatoarelor electrice, cu adaptări la transmisie și la modul de control. Rezultatul nu este doar o putere de motor, ci o combinație motor–convertor de acționare–transmisie care satisface simultan cerințele cinematice, dinamice și termice.

Pasul 1. Profilul de mișcare

Profilul de mișcare descrie variația în timp a poziției, vitezei și accelerației pe parcursul unui ciclu de funcționare. În industria mașinilor de fabricație, două forme standard se utilizează (Figura 4.8): profilul trapezoidal, cu accelerație constantă pe segmentele de start și stop, separate de un segment de viteză constantă, și profilul S-curve (curbă în S), care înlocuiește colțurile abrupte ale profilului trapezoidal cu rampe netezi de accelerație. Profilul S-curve elimină șocurile mecanice prezente în profilul trapezoidal și este obligatoriu pentru aplicațiile cu sarcini fragile, axe cu inerție mare sau roboți cu mai multe articulații care interacționează între ele.

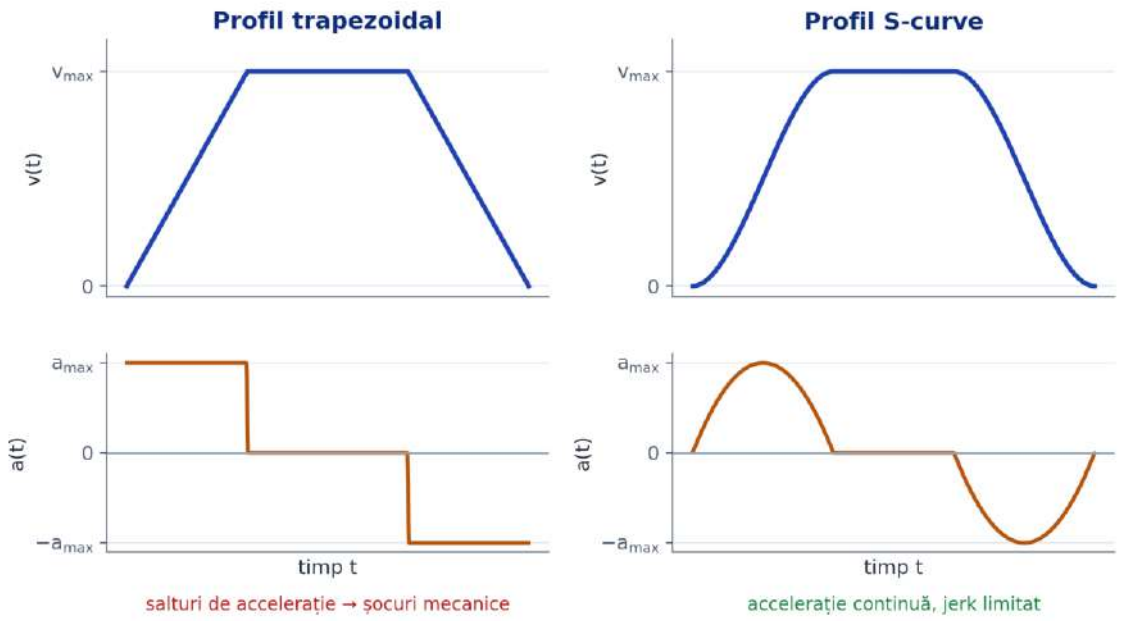


Figura 4.8. Profilurile de mișcare standard utilizate în acționările industriale: trapezoidal (stânga) și S-curve (dreapta). Profilul S-curve elimină discontinuitățile (șocurile) accelerației prezente la trecerea între segmentele profilului trapezoidal.

În practică sunt utilizate profiluri trapezoidale, S-curve și alte profile cu limitarea accelerației sau a jerk-ului. Profilul S-curve reduce discontinuitățile de accelerație și poate limita excitația mecanică a sistemului; alegerea sa este o decizie de proiectare dependentă de sarcină, rigiditate, timp de ciclu și capabilitățile controlerului, nu o obligație universală.

Pașii 2–5. Calcul și verificare

Pasul 2. Calculul cuplului sau forței necesare. Pentru o acționare rotativă, cuplul total necesar este suma dintre cuplul de inerție ($T_i = J \cdot \alpha$, unde J este momentul de inerție total redus la arborele motor și α este accelerația unghiulară maximă din profil) și cuplul rezistent al sarcinii (T_s, dependent de natura sarcinii: cuplu constant pentru sarcini gravitaționale, cuplu proporțional cu pătratul vitezei pentru pompe centrifuge, cuplu proporțional cu turația pentru fricțiunea vâscoasă). Pentru o axă liniară, calculul este analog, dar exprimat în forțe ($F = m \cdot a + F_{rezistent}$).

Pasul 3. Selectarea raportului de transmisie. Dacă motorul antrenează sarcina prin reductor sau transmisie, raportul i se alege astfel încât domeniul de viteză și cuplu al sarcinii să fie compatibil cu domeniul motorului. Inerția reflectată se calculează explicit; anumite ghiduri de dimensionare folosesc raportul de inerții ca indicator pentru reglabilitatea axei, dar nu există o condiție universală $J_{motor} = J_{sarcină}$ reflectată. Limita acceptabilă se verifică pentru servoamplificator, transmisie și profilul de mișcare.

Pasul 4. Calculul puterii și al curentului RMS. Puterea instantanee a motorului $P(t) = T(t) \cdot \omega(t)$ variază pe parcursul ciclului. Pentru dimensionarea termică, se calculează valoarea efectivă (RMS) a cuplului pe ciclu:

$$T_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_i T_i^2 \cdot t_i}{\sum_i t_i}} \tag{4.10}$$

unde T_i este cuplul pe segmentul i al ciclului, de durată t_i. Dacă T_{RMS} depășește cuplul nominal continuu al motorului candidat, motorul se va supraîncălzi în timp și se selectează un motor cu cuplu nominal mai mare.

Pasul 5. Selectarea preliminară a motorului și verificarea termică. Se verifică simultan cuplul continuu sau RMS, cuplul de vârf, viteza maximă, curentul și regimul de funcționare. O marjă moderată poate acoperi incertitudinile de model, dar nu înlocuiește verificarea ciclului real și nu justifică supradimensionarea arbitrară.

Exemplul 4.2 ilustrează aplicarea concretă a celor cinci pași la dimensionarea servomotorului pentru o axă de poziționare pick-and-place.

Exemplul rezolvat 4.2. Dimensionarea servomotorului pentru o axă pick-and-place

Enunț. Pe linia de asamblare a unei fabrici de electronice de la Bistrița, o axă liniară pick-and-place transferă plăci PCB cu masa m = 0,8 kg între două stații. Distanța de transfer este L = 600 mm; timpul total impus de cadența liniei este t_{total} = 0,7 s (incluzând decelerarea finală pentru poziționare); precizia de poziționare cerută este ±0,05 mm. Axa este construită cu actuator liniar BSA cu pas al șurubului h = 10 mm/rotație, randament η = 0,90, masă proprie a piuliței și platformei m_p = 1,5 kg, frecare statică F_f = 25 N. Să se dimensioneze servomotorul PMSM care antrenează axa.

Pasul 1. Profilul de mișcare. Se adoptă profil trapezoidal simetric (1/3 accelerare, 1/3 viteză constantă, 1/3 decelerare). Cu $t_{acc} = t_{dec}$ = 0,233 s și t_{const} = 0,233 s, viteza maximă se calculează din condiția ca aria graficului v(t) să fie egală cu L:

$$v_{\max} = \frac{L}{t_{\text{total}} - t_{\text{acc}}} = \frac{0{,}600}{0{,}700 - 0{,}233} \approx 1{,}28 \text{ m/s} \tag{4.11}$$

$$a_{\max} = \frac{v_{\max}}{t_{\text{acc}}} = \frac{1{,}28}{0{,}233} \approx 5{,}5 \text{ m/s}^2 \tag{4.12}$$

Pasul 2. Forța liniară necesară. Masa totală deplasată este $m_t = m + m_p$ = 0,8 + 1,5 = 2,3 kg. Forța de accelerare:

$$F_{\text{acc}} = m_t \cdot a_{\max} + F_f = 2{,}3 \cdot 5{,}5 + 25 \approx 37{,}7 \text{ N} \tag{4.13}$$

Pasul 3. Conversia la cuplu motor. Pasul șurubului h = 10 mm/rotație implică un raport de transmisie de h / (2π) = 10/6,283 ≈ 1,592 mm/rad. Cuplul motor necesar pentru a învinge forța liniară F:

$$T_{\text{motor}} = \frac{F \cdot h}{2\pi \cdot \eta} = \frac{37{,}7 \cdot 0{,}010}{2\pi \cdot 0{,}90} \approx 0{,}067 \text{ N·m} \tag{4.14}$$

Turația maximă a motorului în segmentul de viteză constantă:

$$n_{\max} = \frac{v_{\max} \cdot 60}{h} = \frac{1{,}28 \cdot 60}{0{,}010} = 7.680 \text{ rpm} \tag{4.15}$$

Pasul 4. Cuplul RMS (verificare termică). Pe ciclul de 0,7 s, cuplul este T_{acc} ≈ 0,067 N·m pe 0,233 s, T_{const} ≈ 0,015 N·m (doar frictiune) pe 0,233 s, T_{dec} ≈ −0,037 N·m pe 0,233 s (decelerare). Cuplul RMS calculat:

$$T_{\text{RMS}} \approx \sqrt{\frac{0{,}067^2 + 0{,}015^2 + 0{,}037^2}{3}} \approx 0{,}045 \text{ N·m} \tag{4.16}$$

Pasul 5. Cerințe preliminare pentru motor. Cu factorul de siguranță 1,3 rezultă, pe baza modelului translational simplificat: $T_n \geq$ 0,058 N·m, $T_{max} \geq$ 0,087 N·m și $n_{max} \geq$ 7.680 rpm. Aceste valori NU sunt suficiente pentru alegerea unui cod final de motor, deoarece nu sunt încă incluse inerția șurubului, inerția rotorului și a cuplajului, limitele de accelerație ale actuatorului și viteza critică a șurubului. În această etapă se selectează doar o familie candidată de servoacționări care poate acoperi turația cerută.

Verificare critică. Calculul este o predimensionare. Turația de aproximativ 7.680 rpm poate deveni criteriul dominant și trebuie verificată față de viteza critică a șurubului și limitele motorului. Selecția definitivă se face după calculul inerțiilor reflectate și al cuplului RMS complet, urmat de verificarea catalogului ansamblului motor–servoamplificator–actuator.

Exemplul 4.2 ilustrează două aspecte fundamentale ale dimensionării practice. Primul: calculele teoretice furnizează o predimensionare, iar selecția finală integrează și standardizarea, mentenabilitatea

și disponibilitatea componentelor. Al doilea: profilul de mișcare presupus determină decisiv rezultatul; reducerea timpului total de ciclu crește accelerația și cuplul necesar, iar efectul exact trebuie recalculat pentru noul profil, nu estimat printr-un multiplicator universal.

Pasul 6. Verificarea interfeței mecanice și a dinamicii motor–sarcină. Se verifică inerția reflectată prin transmisie, rigiditatea torsională, jocul, frecvențele proprii, capacitatea cuplajului și condițiile de montaj. Limitele admise pentru raportul de inerție și pentru banda de reglaj sunt dependente de servoamplificator, regulator, transmisie și aplicație și se verifică în ghidul de dimensionare al producătorului, nu printr-un singur prag universal.

4.4 Interfața mecanică motor–sarcină

Până aici, capitolul a tratat alegerea acționării din perspectiva cerințelor funcționale. Conectarea fizică a motorului la mecanism (flanșă, arbore, cuplaj, reductor, aliniere și fixare) reprezintă o problemă de proiectare mecanică distinctă. Erorile de interfață se pot manifesta prin vibrații, zgomot, încălzire, uzură sau cedări premature. Secțiunea tratează configurația de montare, interfața dimensională, selectarea cuplajului și verificarea alinierii, rigidității și inerției reflectate [65], [66].

4.4.1 Configurația de montare a motorului

IEC 60034-7:2020 definește codurile IM pentru tipurile de construcție și configurațiile de montare ale mașinilor electrice rotative. În proiectarea echipamentelor sunt întâlnite configurații precum IM B3, IM B5, IM B14 și variante cu axă verticală; codul exact și poziția cutiei de borne se verifică pentru motorul selectat. Alegerea configurației influențează suprafața de montaj, rigiditatea prinderii, accesul la șuruburi, poziția conectorilor și traseele de cablu [65].

4.4.2 Flanșa și interfață de fixare

IEC 60072-1:2022 standardizează anumite dimensiuni și serii pentru majoritatea mașinilor electrice rotative industriale din domeniul său. Totuși, servomotoarele și motoarele integrate în axe pot utiliza flanșe, arbori și conectori specifici producătorului. Proiectantul mecanic trebuie să lucreze cu desenul dimensional al tipodimensiunii selectate și să nu presupună interoperabilitate geometrică doar pe baza puterii sau a unei denumiri generale de flanșă [66].

4.4.3 Selectarea cuplajului motor–sarcină

Cuplajul transmite cuplul dintre arborele motorului și elementul antrenat și compensează, în limite controlate, abaterile de aliniere rezultate din montaj. Pentru echipamentele de fabricație sunt uzuale patru familii: cuplaje rigide, utilizate când alinierea este foarte bună și se cere rigiditate torsională maximă; cuplaje elastice cu element elastomeric, potrivite pentru acționări generale și atenuarea șocurilor; cuplaje cu burduf metalic, preferate la servoaxe datorită jocului foarte redus și rigidității torsionale ridicate; și cuplaje magnetice, utilizate în aplicații în care separarea fizică sau etanșarea este importantă. Selecția nu se face după tipologie singură: se verifică simultan cuplul nominal și de vârf, rigiditatea torsională, turația, inerția, dezalinierea admisă, mediul și durata de viață din catalogul producătorului (Tabelul 4.6).

Tabelul 4.6. Familii de cuplaje motor–sarcină și criterii de selecție; valorile admisibile se verifică în catalogul cuplajului ales.

Tip cuplaj	Rigiditate torsională	Capacitate de compensare a dezalinierii	Aplicații tipice
Rigid	Foarte ridicată	Foarte redusă; necesită aliniere precisă	Axe de precizie și ansambluri în care flexibilitatea nu este necesară
Elastic cu element elastomeric	Medie	Moderată; valorile se verifică în catalog	Motoare asincrone, reductoare, pompe și transportoare
Burduf metalic	Ridicată	Redusă–moderată, cu joc torsional foarte mic	Servoaxe și sisteme de poziționare
Magnetic	Dependentă de geometrie și de cuplul magnetic admis	Poate permite separare fizică între arbori	Pompe etanșe, agitatoare și aplicații cu barieră fizică
Cardanic / homocinetic	Dependentă de tip	Permite abateri unghiulare mai mari decât cuplajele coaxiale	Transmisii cu schimbarea direcției între arbori

4.4.4 Aliniere, rigiditate și raportul de inerție

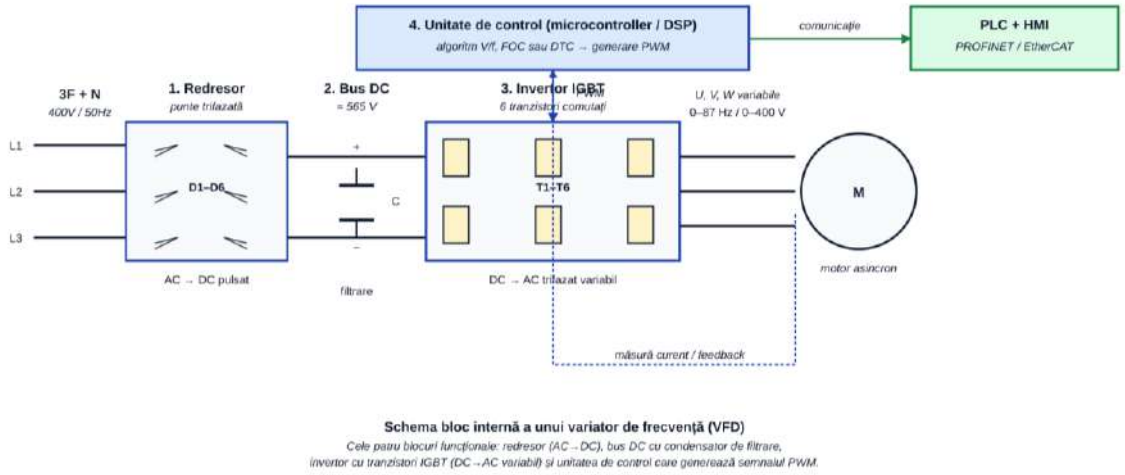
După selectarea cuplajului se verifică alinierea, echilibrarea la viteza de lucru și inerția reflectată. Toleranțele admise sunt cele declarate de producătorul cuplajului și al motorului; aplicarea unui procent universal din toleranța maximă nu este o regulă de proiectare. Pentru axe de precizie se construiește un buget de eroare care include jocul reductorului, elasticitatea cuplajului, pasul șurubului și semnalul de reacție al sistemului de măsurare. De exemplu, la un șurub cu pas de 5 mm/rotație, o eroare liniară de 0,01 mm corespunde la $0{,}72° = 43{,}2$ arcmin la șurub; această conversie arată de ce jocul admis trebuie derivat din cinematica reală, nu din diametrul sau lungimea axei.

4.5 Variatorul de frecvență și servoamplificatorul: nivelul necesar proiectantului mecanic

4.5.1 Ce schimbă convertorul de acționare în comportamentul mecanismului

Variatorul de frecvență este relevant pentru proiectantul mecanic prin efectele asupra mecanismului: permite controlul accelerației și decelerației, reglarea turației și, în funcție de strategie și hardware, limitarea cuplului și gestionarea energiei de frânare. Economiile de energie pot fi importante la anumite pompe și ventilatoare atunci când debitul este reglat prin turație, dar trebuie evaluate din profilul real de funcționare al procesului, nu dintr-un procent generic [67], [60], [62].

Pentru integrarea mecanică sunt importante rampele de accelerație și decelerație, limita de cuplu, viteza minimă și maximă, răcirea motorului la turație redusă și modul de frânare. Un rezistor de frânare disipă energia pe magistrala DC sub formă de căldură; regenerarea energiei în rețea necesită un front-end sau o unitate regenerativă dedicată. Această diferență trebuie reflectată în bilanțul termic și în amplasarea componentelor.



Schema bloc internă a unui variator de frecvență (VFD)
Cele patru blocuri funcționale: redresor (AC→DC), bus DC cu condensator de filtrare, invertor cu tranzistori IGBT (DC→AC variabil) și unitatea de control care generează semnalul PWM.

Figura 4.9. Schema bloc internă a unui variator de frecvență (VFD). Cele patru blocuri funcționale: redresor (AC→DC), magistrală DC cu condensator de filtrare, invertor cu tranzistori IGBT (DC→AC variabil) și unitatea de control care generează semnalul PWM după algoritmul V/f, FOC sau DTC.

Pentru proiectant este suficientă înțelegerea arhitecturii funcționale: redresorul transformă energia AC în DC, magistrala DC stochează temporar energie, invertorul sintetizează tensiunea trifazată pentru motor, iar unitatea de control aplică strategia de reglare (Figura 4.9). La un front-end clasic cu diode și condensator, curentul absorbit din rețea nu este sinusoidal; dimensionarea cablurilor, filtrelor și protecțiilor se face cu datele de intrare declarate de producătorul convertorului.

> **În practică**
>
> Pentru aceeași pompă centrifugă sau același ventilator, în condiții de similitudine, legile de afinitate oferă relațiile aproximative $Q \propto n$, $H \propto n^2$ și $P \propto n^3$. Ele sunt utile pentru predimensionare, dar economiile reale depind de curba instalației, înălțimea statică, randamentul pompei/motorului/convertorului și domeniul de operare. Reducerea turației nu trebuie transformată direct într-un procent universal de economie fără determinarea punctelor de funcționare.

4.5.2 Strategii de control: nivelul de detaliu necesar proiectantului

Strategia de control determină cât de bine convertorul poate impune viteza și cuplul în condiții dinamice. Pentru proiectarea mecanică sunt suficiente trei niveluri conceptuale: V/f scalar pentru sarcini cu cerințe dinamice modeste; control vectorial FOC pentru control mai bun al fluxului și cuplului; control direct al cuplului (DTC) sau strategii echivalente de înaltă performanță pentru aplicații cu dinamică ridicată. Alegerea se face din cerința mecanismului și din capabilitățile concrete ale convertorului.

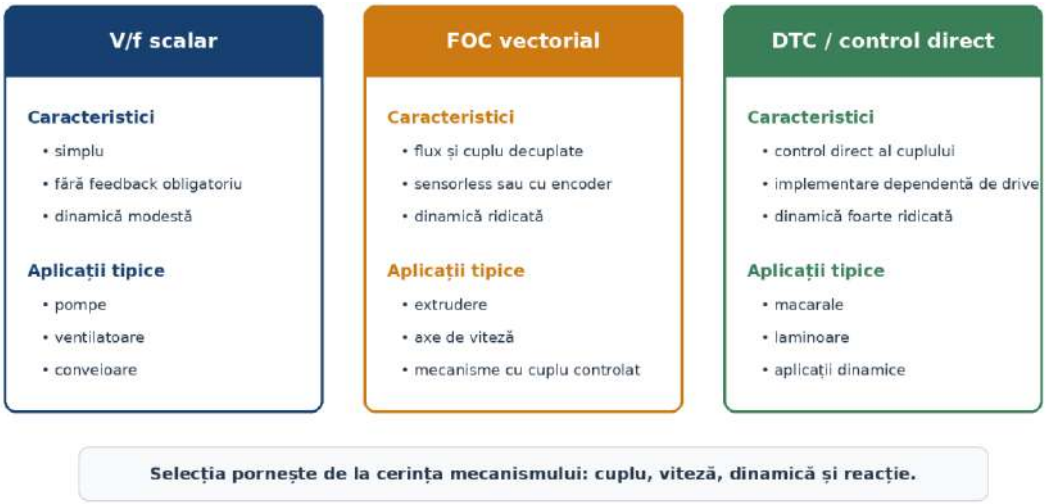


Figura 4.10. Trei familii de strategii de control pentru motoare asincrone în convertoare de acționare industriale: V/f scalar, FOC vectorial și DTC. Figura are rol comparativ; implementarea și performanța depind de platforma concretă.

Controlul V/f scalar menține o relație prestabilită între tensiunea și frecvența aplicate motorului și este adecvat aplicațiilor cu cerințe dinamice moderate. Comparativ cu strategiile vectoriale, performanța la viteze joase și controlul cuplului sunt mai dependente de caracteristicile motorului și de compensările implementate de convertor (Figura 4.10). Precizia și răspunsul dinamic nu se exprimă prin valori universale; ele se verifică în documentația platformei și prin testarea aplicației [62].

FOC, Field Oriented Control (control vectorial orientat după câmp) decuplează, în modelul de control, componenta de curent asociată fluxului de componenta asociată cuplului. Pentru proiectantul mecanic, consecința relevantă este controlul mai bun al cuplului la viteze reduse și răspunsul dinamic superior controlului V/f. Performanțele efective depind de motor, convertor, identificarea parametrilor și existența sau nu a unui encoder; valorile de precizie și bandă de reglaj se verifică în documentația sistemului selectat [68].

DTC, Direct Torque Control (control direct al cuplului) desemnează o familie de strategii care estimează și controlează direct fluxul și cuplul prin selectarea stărilor invertorului sau prin variante moderne derivate. Lucrările lui Depenbrock și Takahashi–Noguchi reprezintă repere istorice pentru dezvoltarea controlului direct al cuplului; implementările comerciale diferă între producători [69], [70].

> **În practică**
>
> Pentru proiectantul mecanic, strategia de control se alege din cerințele mecanismului. V/f scalar este adecvat sarcinilor cu cerințe dinamice modeste; FOC oferă control mai bun al cuplului și comportament superior la viteze reduse; DTC sau alte strategii de înaltă performanță pot fi adecvate aplicațiilor cu dinamică ridicată. Performanța se verifică în documentația convertorului și prin dimensionarea ansamblului.

4.5.3 Parametri de configurare care influențează mecanismul

Parametrizarea inițială a unui VFD trebuie efectuată pe baza datelor motorului și a procedurii producătorului. Parametri incorecți pot conduce la performanță necorespunzătoare, declanșări, încălzire excesivă sau protecție termică inadecvată. Tabelul 4.7 sintetizează un set didactic de parametri uzuali; denumirea și codul exact al fiecărui parametru depind de platforma concretă [71].

Tabelul 4.7. Cei șapte parametri esențiali ai parametrizării unui VFD industrial.

Nr.	Parametru	Citit din	Semnificație și domeniu tipic
1	Putere nominală P_n	Plăcuță motor	Puterea mecanică nominală conform plăcuței/fișei tehnice; utilizată împreună cu curentul, regimul și datele termice ale motorului.
2	Tensiune nominală U_n	Plăcuță motor	Tensiunea nominală și conexiunea înfășurărilor conform plăcuței; se corelează cu tensiunea de ieșire a convertorului.
3	Curent nominal I_n	Plăcuță motor	Curentul nominal conform plăcuței; protecția termică se configurează conform motorului și algoritmului convertorului, nu printr-un multiplicator universal.
4	Frecvență nominală f_n	Plăcuță motor	Frecvența nominală conform plăcuței; împreună cu numărul de poli și datele motorului definește punctul nominal de funcționare.
5	Turație nominală n_n	Plăcuță motor	Turația nominală reală la sarcină; valoarea se citește de pe plăcuță și include alunecarea motorului asincron.
6	Rampa de accelerare t_{acc}	Decis de proiectant	Timpul de accelerare se calculează din inerție, cuplul disponibil, proces și limitele convertorului/motorului.
7	Rampa de decelerare t_{dec}	Decis de proiectant	Timpul de decelerare se calculează din energia mecanică, proces și capabilitatea de frânare/regenerare a sistemului.

Multe convertoare de acționare oferă proceduri de identificare automată a parametrilor motorului (engl.: auto-tuning). Procedura poate fi statică sau rotativă și poate impune decuplarea sarcinii, în funcție de producător și de strategia de control. La punerea în funcțiune se urmează instrucțiunile convertorului selectat; nu se presupune că aceeași procedură este valabilă universal.

Exemplul rezolvat 4.3. Parametrizarea VFD pentru o pompă centrifugă

Enunț. Pe linia de îmbuteliere a unei fabrici de băuturi răcoritoare se instalează o pompă centrifugă antrenată de un motor asincron trifazat, pentru care se adoptă următoarele date nominale didactice (nu o plăcuță sau fișă de catalog verificată): P_n = 5,5 kW; U_n = 400/690 V (Δ/Y); I_n ≈ 10,56 A (Δ) / 6,10 A (Y); f_n = 50 Hz; n_n = 1.460 rpm; cos ϕ = 0,84; randament ipotetic 89,5 %. Motorul este conectat în triunghi (rețea 400 V) și antrenat de un VFD Siemens SINAMICS G120, modul Power Module PM240-2 (6SL3210-1PE21-8AL0, 7,5 kW). Procesul nu cere precizie de cuplu: pompa funcționează cu reglaj de turație pentru menținerea unei presiuni constante pe refulare. Să se enumere parametrii de configurare ai VFD-ului și valorile lor, tratând codurile de parametri ca dependente de versiunea hardware/firmware și de manualul utilizat [71].

Soluție. Strategia de control aleasă este V/f scalar (Vector Control nu se justifică pentru o pompă cu reglaj lent al presiunii). Tabelul de mai jos sintetizează parametrii ce trebuie introduși în VFD prin mediul de inginerie al platformei sau prin panoul integrat BOP-2.

Tabelul 4.8. Parametri principali ai exemplului de parametrizare pentru SINAMICS G120.

Parametru	Denumire	Valoare introdusă
p0304	Tensiune nominală motor	400 V
p0305	Curent nominal motor	≈10,56 A (H)
p0307	Putere nominală motor	5,5 kW
p0308	Cos ϕ nominal	0,84
p0310	Frecvență nominală	50 Hz
p0311	Turație nominală	1460 rpm
p1080	Frecvență minimă f_{min}	15 Hz (H/TBD)
p1082	Frecvență maximă f_{max}	50 Hz
p1120	Rampa de accelerare	10 s
p1121	Rampa de decelerare	15 s
p1300	Modul de control	0 (V/f liniar)

Procedura de punere în funcțiune. Se introduc datele nominale ale motorului, se execută procedura de identificare recomandată pentru varianta de control, se verifică sensul de rotație și curentul în puncte de test, apoi se configurează sursa de comandă și semnalul de proces. Codurile exacte de parametri și secvența de commissioning se verifică în manualul versiunii SINAMICS G120 utilizate [71].

Verificare critică. Frecvența minimă f_{min} = 15 Hz este numai o ipoteză didactică de parametrizare, nu o limită generală pentru pompe. Valoarea admisibilă se stabilește pentru pompa, motorul și instalația selectate, pe baza curbei pompă–sistem, a debitului minim permis, a răcirii motorului și a condițiilor NPSH pentru evitarea cavitației; presiunea redusă pe refulare nu demonstrează singură apariția cavitației. Pentru cerere de debit zero, funcția de oprire/repunere automată („sleep mode”) se configurează numai dacă este permisă de proces, de pompă și de documentația VFD-ului.

4.5.4 Integrarea cu PLC și rețeaua industrială

Pentru o instalație simplă, comanda unui VFD poate utiliza intrări/ieșiri cablate. În echipamente cu mai multe acționări coordonate, integrarea prin rețea industrială poate reduce cablarea și poate oferi diagnostic și schimb ciclic de date. Alegerea între semnale cablate și comunicație se face din cerințele de timp, diagnostic, siguranță, disponibilitate și standardul beneficiarului; nu există un prag universal de număr de acționări [72].

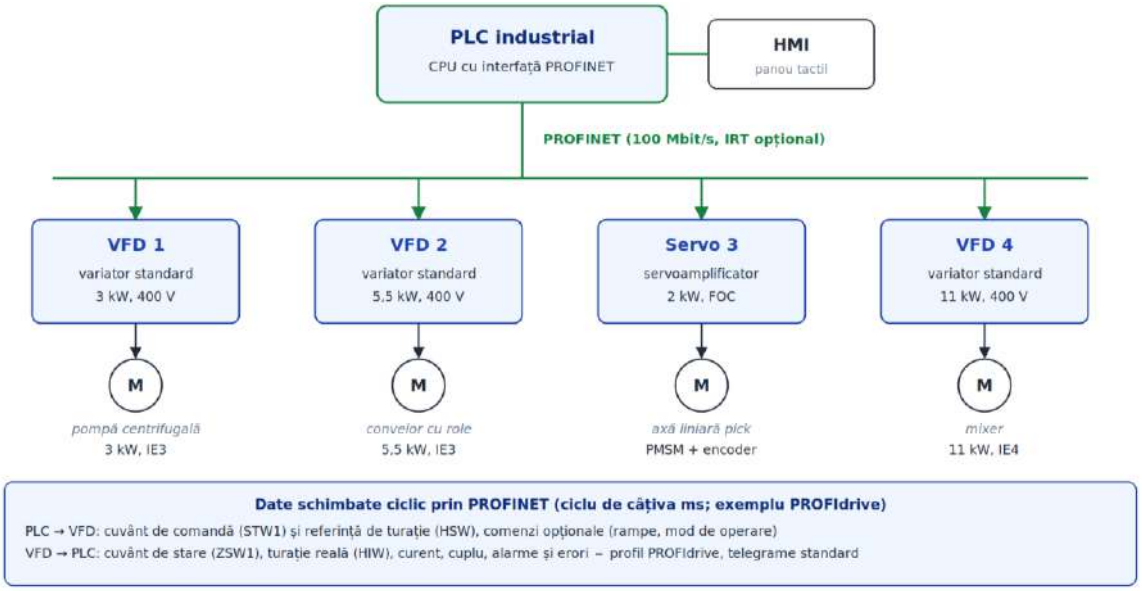


Figura 4.11. Topologie PROFINET tipică pentru un echipament de fabricație cu mai multe acționări. Comanda este centralizată în PLC, iar controlul local al motorului este realizat în convertor. Timpul de ciclu și volumul de date se configurează și se verifică pentru rețeaua și aplicația concretă.

PROFINET și EtherCAT sunt două tehnologii Ethernet industrial utilizate frecvent în mașini și linii de fabricație. Alegerea lor este influențată de ecosistemul beneficiarului, sincronizarea necesară, arhitectura de control și competența de mentenanță. Pentru proiectantul mecanic, cerința relevantă este să știe ce semnal de reacție și ce sincronizare necesită axa, deoarece acestea influențează alegerea convertorului și a rețelei, dar configurarea detaliată aparține arhitecturii de control (Figura 4.11).

Profilurile de dispozitiv nu sunt identice pe toate magistralele. IEC 61800-7 definește o interfață generică și profile pentru sisteme de acționare, iar implementările concrete sunt asociate tehnologiilor de comunicație acceptate de ecosistem. La integrare se verifică profilul susținut simultan de PLC, controlerul de mișcare și convertorul de acționare [72].

> **În practică**
> Într-un echipament cu mai multe acționări, rețeaua industrială și profilul de dispozitiv se aleg în primul rând din standardul tehnic al beneficiarului și din cerințele de sincronizare. PROFINET/PROFIdrive, EtherCAT/CiA 402 sau SoE și alte combinații pot fi corecte în ecosistemele lor. Introducerea unei platforme străine de standardul fabricii trebuie justificată prin performanță, mentenanță, disponibilitatea pieselor și competența personalului.

4.5.5 Criterii de selecție a sistemului de acționare

Pentru proiectantul de echipament, marca convertorului este secundară față de compatibilitatea tehnică și de ecosistem (Tabelul 4.9). Selecția trebuie justificată prin criterii verificabile: tensiune și curent, regim de suprasarcină, strategia de control, funcții de siguranță, opțiuni de frânare/regenerare, semnal de reacție, comunicație, EMC, condiții de mediu, dimensiuni, răcire, service și standardul intern al beneficiarului.

Tabelul 4.9. Criterii de selecție a ecosistemului de acționare pentru un echipament de fabricație.

Criteriu	Întrebare de proiectare	Impact asupra mecanismului / integrării
Regim de cuplu	Ce cuplu continuu și ce cuplu de vârf cere ciclul?	determină mărimea convertorului și posibilitatea accelerărilor/decelerărilor
Frânare	Energia de decelerare trebuie disipată sau recuperată?	impune rezistor, chopper sau unitate regenerativă și afectează bilanțul termic
Semnal de reacție	Este necesară poziționare sau doar viteză?	determină encoderul, cablajul și controlerul de mișcare
Comunicație	Ce rețea și profil sunt standard la beneficiar?	influențează diagnosticarea și integrarea PLC–convertor
Mediu și montaj	Temperatură, IP, altitudine, vibrații, spațiu?	determină reducerea admisibilă a sarcinii-ul, răcirea și amplasarea în tablou

Într-un proiect industrial matur, alegerea finală combină cerințele tehnice cu standardizarea beneficiarului și disponibilitatea pieselor de schimb. Un convertor de acționare care oferă performanță suficientă, dar nu se integrează în ecosistemul de diagnostic și mentenanță al fabricii, poate genera un cost de exploatare mai mare decât un produs nominal mai scump. Această decizie trebuie documentată ca alegere de sistem, nu ca preferință de marcă.

4.6 Protecții și siguranță electrică

4.6.1 Protecția trebuie să limiteze efectul defectului

Un sistem electric proiectat corect nu este un sistem care nu se defectează niciodată (un astfel de sistem nu există), ci unul în care orice defect previzibil este detectat rapid și izolat la cel mai mic nivel posibil al instalației. Acest principiu, denumit izolarea defectelor, stă la baza arhitecturii ierarhice a protecțiilor: în loc de o singură protecție centrală care, în prezența unui defect oriunde în instalație, întrerupe toată alimentarea echipamentului, se utilizează un lanț de protecții cu sensibilități și viteze de declanșare gradate, astfel încât numai protecția cea mai apropiată de defect să declanșeze.

Beneficiul izolării selective a unui defect poate fi ilustrat printr-un scenariu didactic cu cincisprezece stații alimentate pe ramuri distincte. Dacă un defect pe o ramură conduce la declanșarea protecției generale, întreaga linie se oprește; dacă protecțiile sunt coordonate astfel încât să declanșeze numai ramura afectată și procesul permite funcționarea parțială, indisponibilitatea poate fi limitată. Durata intervenției și pierderea de capacitate nu sunt valori universale și trebuie estimate din arhitectura și fluxul real al liniei.

Protecția electrică tratează fenomene diferite: suprasarcini, scurtcircuite, defecte către pământ și supratensiuni tranzitorii. Magnitudinea curenților și tensiunilor, precum și timpul de evoluție, depind de impedanța rețelei, sursă, cabluri, aparataj și tipul defectului; de aceea nu se folosesc valori generale de tip «zeci de kA» sau «mii de volți» ca criterii de proiectare. Parametrii se determină sau se preiau din studiul instalației și din standardele/dispozitivele aplicabile [56], [73].

4.6.2 Funcții complementare de protecție

Protecția unui echipament nu este o singură scară ierarhică în cinci trepte, deoarece dispozitivele răspund la fenomene diferite (Figura 4.12). Este mai corect să vorbim despre funcții complementare: protecție la supracurent și scurtcircuit, protecție la curent rezidual, protecție la supratensiuni tranzitorii, protecția specifică a motorului și dispozitivul de deconectare pentru mentenanță. Unele dintre aceste funcții se coordonează prin selectivitate la supracurent; altele, precum SPD, au un rol diferit și nu participă la aceeași „cursă de declanșare”.

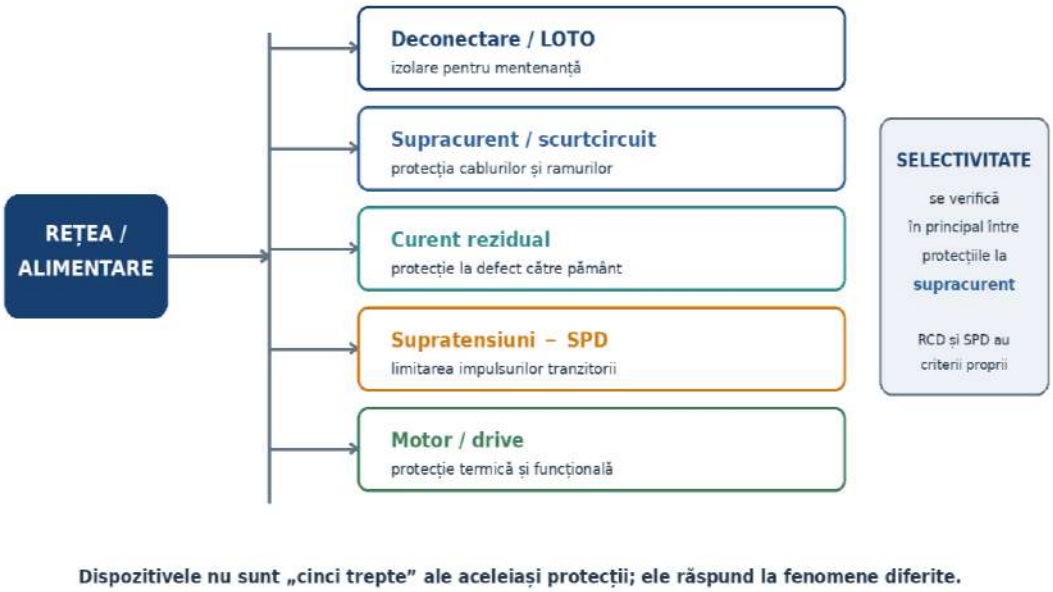


Figura 4.12. Funcții complementare de protecție ale unui echipament de fabricație. Dispozitivele răspund la fenomene diferite; selectivitatea se aplică în principal protecțiilor la supracurent aflate în serie.

Funcțiile complementare de protecție și datele principale care trebuie verificate pentru fiecare dintre ele sunt sintetizate în Tabelul 4.10.

Tabelul 4.10. Funcțiile complementare de protecție și principalele date care trebuie verificate.

Funcție	Dispozitiv tipic	Ce protejează / ce trebuie verificat	Referință principală
Deconectare / izolare	separator sau întrerupător adecvat izolării	separarea sursei pentru mentenanță și LOTO; PE nu se întrerupe	IEC 60204-1
Supracurent / scurtcircuit	MCCB / MCB / siguranțe	cabluri și echipament; capacitatea de rupere ≥ curentul prospectiv	IEC 60947-2 / IEC 60898-1
Curent rezidual	RCD, când este cerut de schema de protecție	protecția la defect către pământ; tipul se alege după forma curentului rezidual	IEC 60364; IEC 62423 pentru tip F/B
Supratensiuni	SPD	limitarea supratensiunilor tranzitorii; coordonare cu instalația clădirii	IEC 61643-11

Funcție	Dispozitiv tipic	Ce protejează / ce trebuie verificat	Referință principală
Motor / convertor de acționare	protecție termică și funcții ale convertorului	suprasarcină, temperatură, faze, limite de curent și cuplu	IEC 61800-5-1; documentația convertorului

Figura și tabelul următoare trebuie citite ca o hartă funcțională a protecțiilor. Selectivitatea se analizează pentru dispozitivele de protecție la supracurent aflate în serie; coordonarea RCD-urilor și a SPD-urilor are criterii proprii. În proiectarea finală se folosesc datele de scurtcircuit ale instalației și tabelele/curbele de coordonare furnizate de producătorul aparatajului (Figura 4.13).

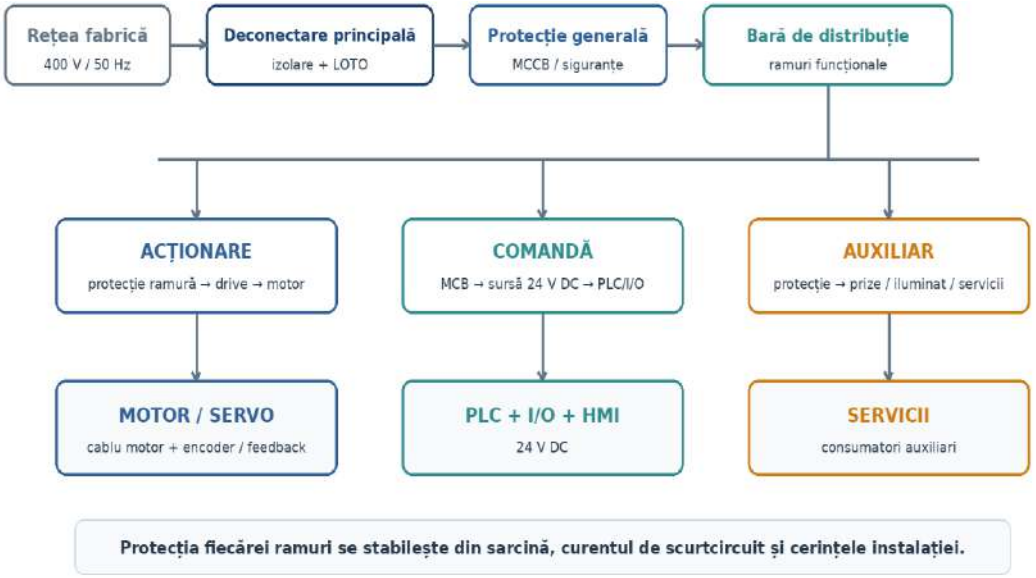


Figura 4.13. Schemă unifilară simplificată cu protecții distribuite pe ramurile de forță, comandă și servicii auxiliare. Configurația exactă se stabilește din schema de protecție și datele instalației.

4.6.3 Protecția la supracurent și caracteristicile de declanșare

Pentru a înțelege de ce MCB-urile au curbe diferite de declanșare, este util să privim mai întâi ce se află fizic în interiorul unui astfel de dispozitiv. Figura 4.14 reprezintă schematic vederea internă a unui MCB modular DIN. Două componente, un bimetal (zona termică) și o bobină magnetică (zona magnetică), sunt montate în serie pe traseul curentului dintre bornele de intrare și ieșire, ambele acționând asupra aceluiași mecanism de declanșare.

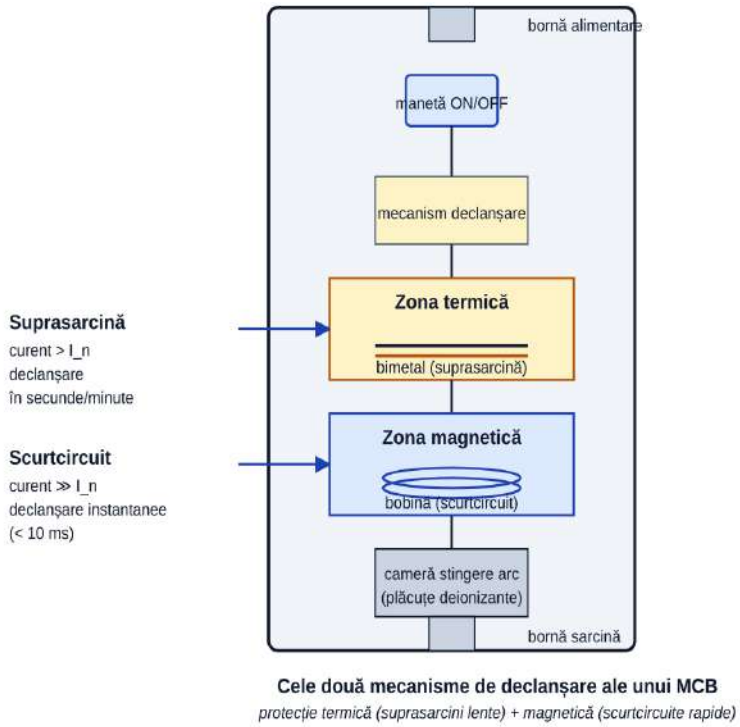


Figura 4.14. Anatomia internă a unui MCB modular DIN. Zona termică (bimetal) protejează împotriva suprasarcinilor lente, prin deformare termică progresivă; zona magnetică (bobină) protejează împotriva scurtcircuitelor, prin acțiune electromagnetică instantanee. Cele două mecanisme acționează asupra aceluiași contact mecanic.

Zona termică a unui MCB răspunde la suprasarcini prin efectul termic al curentului, iar zona magnetică răspunde la curenți mari de defect printr-un mecanism electromagnetic. Timpul și pragurile de declanșare sunt definite prin caracteristica timp–curent a aparatului și prin standardul aplicabil; nu se presupune un timp universal de declanșare. Camera de stingere a arcului permite întreruperea în limitele capacității nominale de rupere declarate [74].

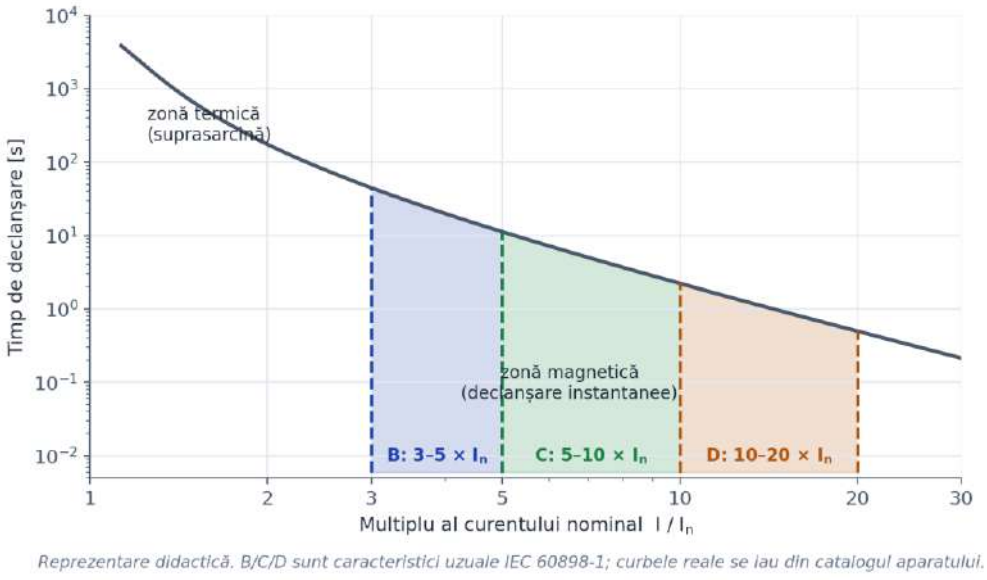


Figura 4.15. Reprezentare didactică a caracteristicilor timp-curent pentru MCB-uri de tip B, C și D. Zona termică este similară, iar pragul magnetic instantaneu diferă. Pentru aparataj industrial conform IEC 60947-2 se verifică reglajele și curbele modelului concret.

Caracteristicile B, C și D sunt întâlnite la întreruptoarele miniatură acoperite de IEC 60898-1, cu pragurile definite de standard (Tabelul 4.11). În aparatajul industrial conform IEC 60947-2 și în anumite familii de produse pot exista alte caracteristici sau reglaje; pentru motoare și surse cu curent de pornire ridicat se verifică simultan caracteristica timp–curent, curentul de pornire, capacitatea de rupere și coordonarea cu dispozitivul din amonte (Figura 4.15) [74], [58].

Tabelul 4.11. Caracteristici uzuale ale MCB-urilor și criterii de alegere în echipamentele de fabricație.

Curba	Prag magnetic	Aplicație tipică în echipamente de fabricație
B	3–5 × I_n	sarcini cu curent de pornire redus; utilizarea se verifică pentru circuitul concret
C	5–10 × I_n	caracteristică frecvent utilizată pentru circuite generale și sarcini cu pornire tranzitorie moderat
D	10–20 × I_n	sarcini cu curent de pornire ridicat, dacă impedanța buclei permite declanșarea rapidă la defect
Alte caracteristici / reglaje	conform aparatului	aparataj industrial IEC 60947-2 și familii speciale; se utilizează curbele și setările producătorului

> **În practică**
> Curba C este frecvent utilizată în circuite generale, dar nu este o alegere universală. Curba B se potrivește sarcinilor cu curent de pornire redus, iar curba D poate fi necesară la curenți tranzitorii ridicați, dacă impedanța buclei permite deconectarea în timpul cerut. Pentru surse în comutație, transformatoare, motoare și convertoare se verifică simultan curentul de pornire, caracteristica timp–curent, capacitatea de rupere și coordonarea cu protecția din amonte.

4.6.4 Protecția diferențială și convertoarele electronice

Dispozitivul de protecție diferențială, Residual Current Device (RCD), denumit în industria europeană FI-Schalter sau disjoncteur différentiel, funcționează pe un principiu fizic distinct de cel al MCB-ului: el nu măsoară mărimea curentului care trece prin circuit, ci diferența dintre curentul absorbit pe conductoarele active și curentul returnat pe conductorul de neutru (Figura 4.16).

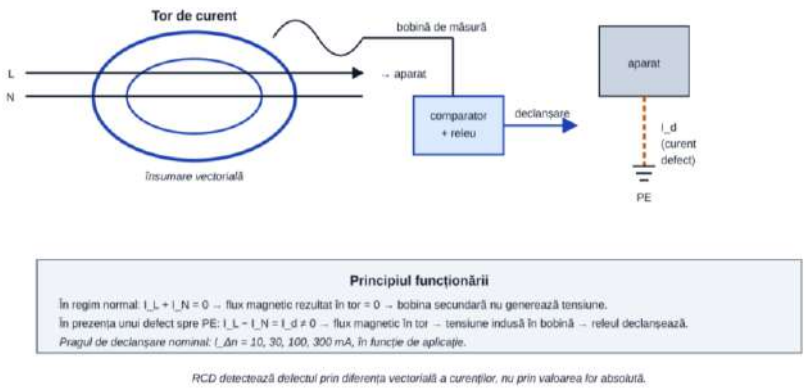


Figura 4.16. Principiul funcționării unui RCD diferențial. Conductoarele active L și N trec împreună printr-un tor magnetic. În regim normal, suma vectorială a curenților este nulă și fluxul magnetic în tor este zero. În prezența unui defect de izolație care generează un curent I_d spre pământ, fluxul devine nenul și induce o tensiune în bobina secundară, care comandă releul de declanșare.

În regim normal, suma vectorială a curenților prin transformatorul diferențial este apropiată de zero. La apariția unui curent rezidual către pământ se produce un dezechilibru care poate comanda declanșarea. Timpul de declanșare nu este o valoare universală de „sub 30 ms”; el depinde de tipul dispozitivului, curentul rezidual aplicat și cerințele standardului aplicabil.

Sensibilitatea unui RCD se exprimă prin curentul diferențial rezidual nominal IΔn. Valoarea și tipul dispozitivului se aleg din măsura de protecție, tipul circuitului și cerințele instalației; 30 mA este o valoare utilizată pe scară largă pentru protecția suplimentară în anumite circuite, dar nu trebuie transformată într-o regulă universală pentru toate circuitele unei mașini. Cerințele concrete se verifică în IEC 60364 și în standardele RCD aplicabile [56], [75].

Tipul RCD se selectează după forma curentului rezidual care poate apărea și după instrucțiunile producătorului echipamentului electronic. IEC 62423 tratează dispozitivele de tip F și B pentru domeniul său de aplicare; tipul B include detecția unor componente reziduale DC netede. Nu este corectă regula «orice VFD cere obligatoriu tip B»: topologia convertorului, alimentarea și măsurile de protecție trebuie analizate pentru aplicația concretă [75].

> **În practică**
> În circuitele cu convertoare electronice nu se aplică regula simplă „VFD = RCD tip B”. Tipul RCD se stabilește din forma posibilă a curentului rezidual, topologia convertorului, sistemul de legare la pământ și instrucțiunile producătorului. Tipul B detectează inclusiv componente reziduale DC netede; tipul F este destinat anumitor aplicații cu convertoare monofazate.

4.6.5 Protecția la supratensiuni tranzitorii (SPD)

Supratensiunile tranzitorii sunt variații rapide ale tensiunii generate, între altele, de fenomene atmosferice și de comutări în rețea. Ele pot solicita izolația și electronica de putere sau de comandă, motiv pentru care protecția se coordonează la nivelul instalației și al echipamentului. Nu se atribuie aici o pondere universală a defectărilor produse de supratensiuni; severitatea depinde de expunere, rețea, măsurile de protecție și sensibilitatea echipamentului.

În testarea și clasificarea SPD-urilor se utilizează forme de undă standardizate, inclusiv impulsuri de curent 8/20 µs și 10/350 µs în încercările relevante. Parametrii dispozitivului și clasa de încercare se selectează conform standardului și coordonării instalației; nu se deduc dintr-o singură caracteristică grafică (Figura 4.17) [76].

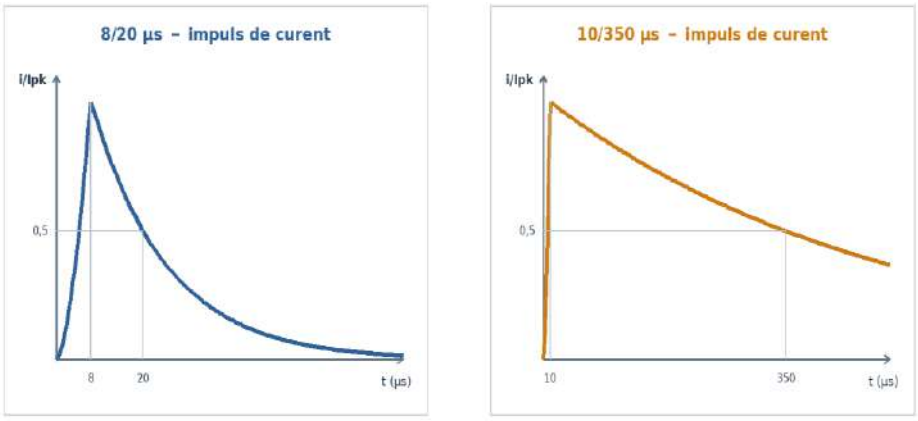


Figura 4.17. Impulsuri standardizate de curent utilizate la încercarea SPD-urilor: 8/20 µs și 10/350 µs. Tipul și parametrii dispozitivului se aleg conform categoriei de solicitare și coordonării cu instalația.

Dispozitivul de protecție la supratensiuni, Surge Protective Device (SPD), conține cel puțin un element neliniar destinat limitării supratensiunilor și devierii curenților de impuls. IEC 61643-11:2025 stabilește cerințe, încercări și parametri pentru SPD-urile conectate la sisteme AC de joasă tensiune. Selecția tipului și a nivelului de protecție trebuie coordonată cu expunerea la trăsnet, arhitectura instalației, tensiunea de ținere a echipamentelor, protecția din amonte și instrucțiunile producătorului; nu se presupune că un anumit «tip 2» este suficient pentru orice echipament industrial [76].

Implementarea internă a SPD-urilor poate utiliza eclatoare, varistoare, diode supresoare sau combinații ale acestora. Pentru proiectare se verifică parametrii declarați, coordonarea între trepte, protecția de rezervă și conexiunile conform documentației producătorului și standardelor aplicabile [76].

4.6.6 Coordonarea și selectivitatea protecțiilor

Selectivitatea urmărește ca defectul să fie eliminat de dispozitivul adecvat cel mai apropiat de circuitul afectat, fără declanșarea inutilă a protecției din amonte. Curbele timp–curent oferă o primă verificare, dar pentru scurtcircuite mari trebuie considerate limitarea de curent, energia I^2t și datele de coordonare ale perechii concrete de aparate (Figura 4.18). Tabelele de selectivitate și back-up ale producătorului sunt sursa de validare pentru combinația exactă de dispozitive [58].

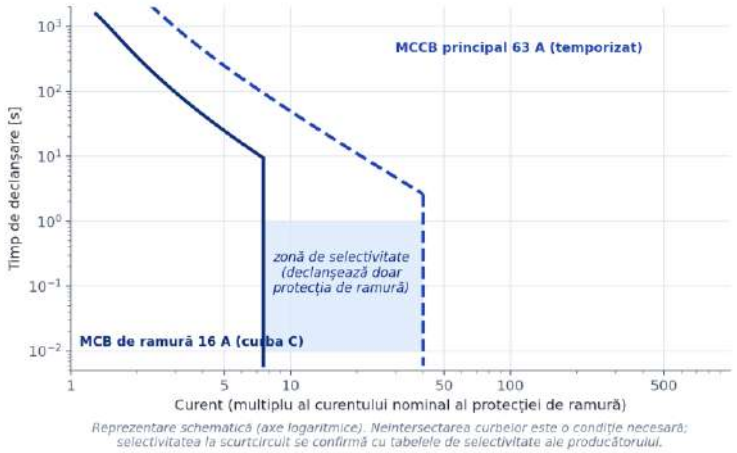


Figura 4.18. Ilustrare schematică a coordonării timp–curent dintre o protecție de ramură și una din amonte. Confirmarea selectivității pentru aparatele concrete se face cu tabelele și curbele producătorului.

Coordonarea dintre două protecții de supracurent poate utiliza diferențe de prag, temporizare, limitarea de energie sau funcții de interblocare, în funcție de aparatele concrete. Nu există un raport universal între curenții nominali care să garanteze selectivitatea. Suprapunerea curbelor timp–curent oferă o verificare preliminară, dar pentru curenți mari se analizează și limitarea I^2t, capacitatea de rupere și tabelele de selectivitate/back-up ale producătorului [58].

Exemplul rezolvat 4.4. Preverificarea selectivității între protecția principală și o ramură

Enunț. Un tablou alimentează mai multe ramuri, fiecare protejată individual, iar în amonte există un MCCB principal. Curentul de scurtcircuit prospectiv la bare este cunoscut din proiectul instalației. Se cere o preverificare a coordonării unei ramuri și identificarea datelor suplimentare necesare pentru confirmarea selectivității.

Soluție. Se verifică mai întâi dacă protecția de ramură are capacitatea de rupere adecvată la punctul de instalare și dacă pragurile ei de declanșare sunt compatibile cu sarcina. Apoi se compară caracteristicile timp–curent cu protecția din amonte. Această suprapunere poate demonstra selectivitate într-un anumit domeniu, dar nu dovedește automat selectivitate totală la curenți mari.

Verificare finală. Pentru codurile concrete ale celor două aparate se consultă tabelele de selectivitate sau software-ul producătorului. Rezultatul se documentează împreună cu valoarea curentului de scurtcircuit prospectiv și setările unității de declanșare. Pentru proiectantul mecanic, concluzia importantă este că modificarea puterii unui motor sau a lungimii/poziției cablului poate schimba curenții și impune reverificarea protecției.

Exemplul 4.4 ilustrează o preverificare conceptuală a coordonării protecțiilor. În proiectul executiv, selectivitatea și protecția de rezervă se confirmă cu tabelele și instrumentele de calcul furnizate de producătorul aparatajului, pe baza curentului prospectiv de scurtcircuit, a caracteristicilor reale ale dispozitivelor și a cablurilor. Pentru proiectantul mecanic, rezultatul relevant este limita de putere și condițiile de alimentare pe care trebuie să le transmită specialistului electric.

4.7 Integrarea fizică a subsistemului electric în mașină

Integrarea electrică are consecințe directe asupra dispunerii mecanice a echipamentului. Tabloul, motoarele și convertoarele de acționare au volum, masă, disipare termică și cerințe de acces; cablurile mobile au raze minime de curbură și durate de viață; presetupele și conectorii trebuie să păstreze gradul IP; traseele de putere, semnal de reacție și comunicație trebuie coordonate cu structura, apărătorile și zonele de service. Aceste interfețe trebuie rezolvate în modelul 3D înainte de înghețarea proiectului.

4.7.1 Șina DIN și organizarea aparaturii

EN/IEC 60715 definește dimensiunile principale ale șinelor de montaj utilizate pentru aparataj. Capacitatea mecanică a șinei și distanța dintre punctele de sprijin se verifică în sistemul concret de montaj și în documentația producătorului; nu se transferă ca valori universale între șine cu grosimi și materiale diferite. În modelul 3D al tabloului se rezervă spațiu pentru aparataj, canale de cablu, raze de îndoire și intervenții de mentenanță.

4.7.2 Presetupe și intrări de cablu

Presetupele trebuie să asigure etanșarea, reținerea mecanică a cablului și compatibilitatea cu diametrul exterior, materialul mantalei și mediul. Cuplurile de strângere și intervalele de cablu sunt specifice produsului și se preiau din fișa tehnică. Pentru păstrarea clasei IP, decupajul din carcasă, garnitura și orientarea cablului sunt la fel de importante ca presetupa însăși.

4.7.3 Lanțuri portcablu și cabluri pentru mișcare repetitivă

Pentru axe mobile, cablul și lanțul portcablu se dimensionează împreună. Se verifică raza minimă de curbură, cursa, viteza, accelerația, umplerea lanțului, separarea cablurilor de putere și semnal și numărul de cicluri cerut. Cablurile destinate instalării fixe nu se folosesc în mișcare repetitivă. Valorile de durată se preiau din combinația cablu–lanț și din condițiile de montaj declarate de producător.

4.7.4 Vibrații, amplasare și compatibilitate mecanică

Vibrațiile și șocurile structurale trebuie evaluate la nivelul ansamblului. ISO 20816-1:2016 oferă linii generale pentru măsurarea și evaluarea vibrației mașinilor, dar nu este un standard de dimensionare a elementelor antivibrante pentru tablouri (Tabelul 4.12). Componentele electrice se montează în limitele de vibrație/șoc declarate de producător, iar izolarea suplimentară se justifică prin măsurători sau prin analiza transmisibilității [77].

Tabelul 4.12. Elemente de integrare mecanică ale subsistemului electric și criterii de verificare.

Componenta	Standard	Parametru cheie	Valoare practica
Șină DIN / placă de montaj	EN/IEC 60715	geometrie, rigiditate, fixare	se verifică în sistemul concret de montaj și în documentația producătorului
Presetupe	IEC 62444	diametru cablu, retenție, etanșare	cuplu și interval de cablu conform fișei tehnice; păstrarea clasei IP se verifică pe ansamblu
Lanț portcablu	documentație cablu + lanț	raza de curbură, umplere, cursă, cicluri	se selectează cabluri pentru mișcare repetitivă și se respectă separarea funcțională
Montaj în vibrații	specificația componentelor; ISO 20816 ca referință de evaluare	șoc și vibrație admisă	se compară mediul mecanic cu limitele declarate ale componentelor
Fixarea tabloului	proiect mecanic + specificația carcasei	masă, centru de greutate, puncte de fixare	se verifică sarcina pe structură, accesul și condițiile de service

4.7.5 Dimensionarea preliminară și amplasarea tabloului electric

Proiectantul mecanic nu dimensionează în mod independent ansamblul electric conform IEC 61439, dar trebuie să rezerve un volum realist și verificabil. Datele minime sunt: dimensiunile aparatelor principale, spațiul pentru canale și raze de îndoire, puterea disipată estimată, temperatura ambiantă, gradul IP, direcția de acces, poziția intrărilor de cablu și rezerva pentru extindere.

Bilanțul termic pornește de la pierderile declarate ale convertoarelor de acționare, surselor, transformatoarelor și aparatajului. Dacă temperatura internă calculată depășește limitele componentelor, se mărește carcasa, se îmbunătățește transferul termic sau se introduce ventilație/climatizare. Un grad IP mai ridicat reduce schimbul natural de aer și poate crește necesarul de răcire; IP-ul nu se selectează separat de bilanțul termic.

Poziția tabloului se stabilește în dispunerea generală a echipamentului împreună cu zonele de mentenanță. Se verifică deschiderea ușii, accesul la întreruptorul principal, extragerea filtrelor și ventilatoarelor, spațiul pentru conectori și cabluri, distanța față de surse de căldură, stropire și vibrații și posibilitatea extinderii fără demontarea structurii mașinii.

4.7.6 Matricea de interfață mecanic–electric

Matricea următoare este un instrument de revizie interdisciplinară. Fiecare rând pornește de la o decizie mecanică și indică ce trebuie reverificat în domeniul electric (Tabelul 4.13).

Tabelul 4.13. Legătura dintre cerințele mecanice și consecințele electrice în proiectarea echipamentului.

Cerință / decizie mecanică	Consecință electrică	Verificare de proiect
Masă și inerție	cuplu de accelerare, putere, curent de vârf	T_{peak}, T_{RMS}, raport de inerție
Viteză și accelerație	turație motor, domeniul convertorului de acționare	n_{max}, rampă, supraviteză admisă
Ciclu de lucru	încălzire motor și convertor de acționare	regim termic, reducerea admisibilă a sarcinii, T_{RMS}
Precizie / repetabilitate	semnal de reacție, servo-control	encoder, joc, rigiditate, rezoluție
Axă verticală	menținerea sarcinii la pierderea energiei	frână, contrabalansare, oprire sigură
Decelerare rapidă / inerție mare	energie pe magistrala DC	rezistor de frânare sau regenerare
Mediu cu praf / lichide	grad IP și soluție de răcire	carcasă, conectori, temperatură
Mișcare repetitivă	cabluri flexibile și lanț portcablu	raza de curbură, cicluri, umplere
Dispunere compactă	densitate termică și acces redus	dimensiune tablou, răcire, service
Mentenanță	deconectare și modularitate	LOTO, conectori, acces, rezervă

4.8 Documentația electrică pe care proiectantul mecanic trebuie să o poată citi

Documentația electrică este o interfață de proiect, nu doar un livrabil al departamentului electric. Proiectantul mecanic trebuie să poată localiza un motor, o bornă, un senzor sau un cablu în documentație și să verifice coerența cu modelul 3D, BOM-ul și lista de echipamente.

4.8.1 Setul minim de documente

Schema unifilară prezintă sursa, dispozitivul principal de deconectare, distribuția și principalele ramuri. Este documentul de orientare pentru puteri și protecții.

Schemele de forță și comandă arată conexiunile detaliate ale motoarelor, convertoarelor de acționare, surselor și elementelor de comandă. Proiectantul mecanic le utilizează pentru a verifica interfețele cu actuatoarele și dispozitivele montate pe mașină.

Planul bornelor, lista de cabluri și lista I/O permit corelarea dintre tablou și componentele din teren. BOM-ul electric și planul de dispunere al tabloului permit verificarea spațiului, masei și accesului de mentenanță.

4.8.2 Trasabilitatea dintre modelul 3D și documentația electrică

Fiecare componentă montată pe mașină trebuie să aibă un identificator unic coerent între modelul mecanic, schema electrică, lista I/O și BOM. O modificare de poziție a unui senzor sau motor poate schimba lungimea cablului, traseul, conectorizarea și condițiile EMC; modificarea trebuie propagată documentat, nu rezolvată informal în atelier.

4.8.3 Ce livrează proiectantul mecanic colegului electrician

Pentru fiecare axă: profil de mișcare, viteză și accelerație maxime, cuplu/forță, inerție, regim de lucru, poziție de montaj și cerință de frânare.

Pentru fiecare componentă de teren: poziție în modelul de ansamblu, grad IP cerut, tip de conector, condiții de mișcare a cablului și acces pentru service.

Pentru tablou: zona disponibilă, suprafață de montaj, restricțiile de masă, direcția de acces, condițiile de mediu și traseele principale de intrare/ieșire. Aceste date sunt intrări pentru proiectarea electrică detaliată și trebuie înghețate prin revizie interdisciplinară.

4.9 Aplicație integrată: subsistemul electric al stației SAP

Această secțiune aplică fluxul de decizie al capitolului pe configurația de referință SAP: o singură axă electrică Z de presare, două funcții pneumatice de fixare CL1/CL2, măsurarea forței și a deplasării și controlul prin PLC/HMI (§1.6). Ca în celelalte studii de caz, scopul este trasabilitatea dintre cerințe, decizii și verificări, nu recomandarea unui produs; valorile numerice sunt ipoteze didactice până la validarea prin calcul și prin fișele tehnice actuale.

4.9.1 Consumatorii și arhitectura de alimentare

Bilanțul electric al SAP (§4.2) pornește de la inventarul consumatorilor: servomotorul axei Z împreună cu servoamplificatorul său; sursa de 24 V DC care alimentează PLC-ul, modulele I/O, senzorii, bobinele electrovalvelor pentru CL1/CL2 și HMI-ul; amplificatorul traductorului de forță și, după caz, ventilația tabloului. Stația se racordează la rețeaua trifazată a beneficiarului printr-un dispozitiv de separare conform IEC 60204-1, iar sistemul de legare la pământ al rețelei (§4.6) determină metoda de protecție la defecte și trebuie confirmat în caietul de sarcini.

Puterile instalate și factorii de simultaneitate rămân de stabilit până la alegerea servoaxei. Structura bilanțului este însă fixată de la început: un circuit de putere pentru servoamplificator, cu protecția și eventualul filtru de rețea, și un circuit de comandă de 24 V DC, dimensionat cu rezervă pentru extinderea I/O.

4.9.2 Dimensionarea preliminară a axei Z

Axa Z transformă cerința de proces, forța de presare și profilul de mișcare din ciclogramă, într-o cerință de cuplu și turație la arborele motorului, prin mecanismul liniar ales în Capitolul 3. Pentru un șurub cu bile cu pasul p și randamentul η, cuplul necesar pentru forța axială F este (ipoteza didactică F_{max} = 8 kN, pas de 5 mm, randament 0,9):

$$T = \frac{F \cdot p}{2\pi \cdot \eta} = \frac{8\,000 \cdot 0{,}005}{2\pi \cdot 0{,}9} \approx 7{,}1 \text{ N·m} \tag{4.17}$$

Valoarea se referă la arborele șurubului, înaintea oricărei transmisii.

Valoarea de vârf nu este suficientă pentru alegerea motorului. Conform §4.3, se verifică și cuplul RMS pe ciclul complet (apropiere rapidă, presare, menținere și retragere, la ipoteza de 120 de ansambluri pe oră), raportul de inerție motor–sarcină (§4.4) și, pentru presarea cu forță controlată, rigiditatea lanțului cinematic și rezoluția buclei de forță. Alegerea dintre o servoaxă și o servopresă integrată rezultă din aceste verificări, nu dintr-o preferință de catalog.

4.9.3 Protecții, integrare fizică și documentație

Servoamplificatorul axei Z trebuie să ofere funcția STO (Safe Torque Off), cerută de funcțiile de siguranță derivate în Capitolul 9. Dacă axa Z este verticală, STO se completează cu o frână de menținere și cu strategia de oprire analizată în același capitol. Protecțiile la supracurent și la defect de izolație se coordonează conform §4.6, ținând cont de curenții de scurgere specifici convertoarelor.

În integrarea fizică (§4.7), cablul motorului și cablul traductorului de forță se pozează separat și se ecranează, deoarece semnalul de forță, de nivel redus, este sensibil la perturbațiile generate de convertor. Setul de documente din §4.8 (schema electrică, lista I/O, lista de cabluri și BOM) folosește aceiași identificatori de cerință ca în caietul de sarcini al SAP, astfel încât fiecare decizie electrică să poată fi urmărită până la cerința care a generat-o.

4.10 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos acoperă cele patru zone principale ale capitolului: alimentare și distribuție, protecții, acționări electrice și variatoare de frecvență. Datele numerice sunt construite în jurul unor situații industriale plauzibile, comparabile cu cele întâlnite în proiectele studenților Master PACSF în stagiul de practică sau în lucrarea de disertație. Pentru fiecare problemă, indicațiile metodologice trimit explicit la subsecțiunile capitolului care argumentează soluția.

Problema 4.1. Selectarea cablului și a protecției pentru o acționare

Pe linia de asamblare a unei fabrici de componente auto, se instalează o pompă centrifugă antrenată de un motor asincron trifazat cu următoarele date nominale didactice, coerente în modelul trifazat aproximativ (nu valori preluate dintr-o plăcuță verificată): P_n = 7,5 kW, U_n = 400 V, I_n ≈ 13,94 A, cos ϕ = 0,86, randament 90,3 % (clasa IE3), pornire prin variator de frecvență cu rampă de accelerare 10 s. Tabloul electric este situat la 35 m distanță de motor, iar cablajul se face pe pat de cabluri în mănunchi cu alte 6 cabluri similare. Temperatura ambientă din hala de producție este maxim 35 °C.

De rezolvat: (a) Estimați curentul RMS de intrare al convertorului pornind de la puterea mecanică, randamentul motorului, randamentul convertorului și factorul de putere total declarat de producător;

nu confundați factorul de deplasare cu factorul de putere în prezența armonicilor. (b) Selectați secțiunea cablului conform părții relevante din IEC 60364, aplicând factorii de corecție pentru metoda de instalare, grupare și temperatură [56]. (c) Selectați protecția de ramură conform documentației convertorului și coordonării cu protecția din amonte. (d) Calculați căderea de tensiune și verificați limita adoptată în specificația proiectului.

Indicații. Pentru o estimare preliminară se poate utiliza:

$$I_{\text{in}} \approx \frac{P_{\text{mec}}}{\sqrt{3}\cdot U\cdot \eta_{\text{motor}}\cdot \eta_{\text{VFD}}\cdot \text{PF}} \tag{4.18}$$

unde PF este factorul de putere total la intrarea convertorului. Valoarea finală a curentului și cerințele de protecție se preiau din documentația modelului concret. Pentru cablu se utilizează IEC 60364-5-52 și metoda de instalare reală; pentru căderea de tensiune se poate utiliza:

$$\Delta U = \sqrt{3}\cdot I\cdot L\cdot (R\cos\varphi + X\sin\varphi) \tag{4.19}$$

unde R și X sunt rezistența și reactanța pe unitatea de lungime ale cablului, la temperatura de calcul.

Răspuns. (a) Cu Pmec = 7,5 kW, ηmotor = 0,903, ηVFD ≈ 0,97 și PF ≈ 0,95 (ipoteză pentru un convertor cu bobină de rețea): Iin ≈ 7.500 / (√3 · 400 · 0,903 · 0,97 · 0,95) ≈ 13,0 A. (b) Pentru cablul motor (35 m, cupru, izolație PVC, pe pat de cabluri, metoda E), factorii de corecție sunt aproximativ 0,94 pentru 35 °C și 0,72 pentru gruparea a 7 cabluri, deci factorul global ≈ 0,68. Pentru o protecție de 16 A, curentul admisibil de bază necesar este 16 / 0,68 ≈ 23,6 A, ceea ce conduce la 2,5 mm² (≈ 25 A de bază), la limită; dacă documentația convertorului impune o protecție de 25 A, rezultă 25 / 0,68 ≈ 37 A și o secțiune de 6 mm². Valorile tabelare se verifică în IEC 60364-5-52. (c) Protecția de ramură este cea indicată în manualul convertorului (tip și calibru de siguranță sau întreruptor) și se coordonează cu protecția din amonte. (d) Pentru 2,5 mm² (R ≈ 8,9 Ω/km la 70 °C, X ≈ 0,08 Ω/km): ΔU ≈ √3 · 13,94 · 0,035 · (8,9 · 0,86 + 0,08 · 0,51) ≈ 6,5 V, adică 1,6 % din 400 V, sub limita uzuală de 3–5 %. Cablul motor este ecranat, conform cerințelor EMC ale convertorului.

Problema 4.2. Coordonarea protecțiilor pentru un tablou cu mai multe acționări

Tabloul electric al unei celule de asamblare alimentează cinci circuite distincte: (1) un VFD de 11 kW pentru pompa de răcire, (2) un VFD de 5,5 kW pentru conveior, (3) un servoamplificator de 3 kW pentru axa Y, (4) un servoamplificator de 3 kW pentru axa Z, (5) un grup de prize industriale 16 A pentru SDV. Tabloul este alimentat printr-un cablu trifazat din rețeaua principală a uzinei, protejat în amonte de un întreruptor automat compact (MCCB) de 100 A cu putere de rupere I_{cu} = 25 kA.

De rezolvat: (a) Întocmiți schema unifilară preliminară a tabloului și identificați funcțiile de protecție necesare. (b) Selectați preliminar protecțiile de ramură conform §4.6.3, folosind curenții nominali și cerințele producătorilor VFD/servo. (c) Verificați coordonarea și selectivitatea dintre protecția principală și protecțiile de ramură conform §4.6.6 și indicați datele suplimentare necesare pentru confirmarea finală. (d) Pentru circuitele care necesită RCD, stabiliți tipul acestuia pe baza formei posibile a curentului rezidual și a instrucțiunilor producătorului convertorului.

Indicații. Selectivitatea nu se deduce numai din calibre sau din denumirea unei curbe. Se folosesc curentul prospectiv de scurtcircuit, caracteristicile timp-curent, limitarea de energie și tabelele de selectivitate/back-up ale producătorului. Pentru RCD, nu se aplică automat regula „VFD = tip B”; se verifică topologia convertorului, sistemul de legare la pământ și documentația dispozitivului.

Răspuns. (a) Schema unifilară cuprinde întreruptorul principal de 100 A, barele tabloului și cinci ramuri protejate individual, plus alimentarea de comandă. (b) Curenți de intrare estimați: VFD 11 kW ≈ 19 A, VFD 5,5 kW ≈ 10 A, fiecare servoamplificator de 3 kW ≈ 5 A, prizele 16 A; totalul este de circa 55 A, compatibil cu 100 A. Protecțiile de ramură (siguranțe gG/gR, întreruptoare-motor sau MCB) se aleg din manualele convertoarelor și servoamplificatoarelor, nu numai din curentul nominal. (c) Fiecare aparat de ramură trebuie să aibă capacitate de rupere suficientă pentru curentul de scurtcircuit prospectiv la bare sau să fie protejat prin back-up de MCCB, conform tabelelor producătorului. Selectivitatea se confirmă cu curbele timp–curent și tabelele de selectivitate pentru perechile concrete de aparate; date necesare: Ik la bare, reglajele MCCB, curbele aparatelor de ramură. (d) Pentru prize: RCD de 30 mA, tip A sau conform cerinței aplicabile. Pentru convertoarele trifazate, curentul rezidual poate avea componentă continuă netedă, astfel încât, dacă protecția diferențială este necesară, se folosește tipul cerut de producător (de regulă tip B sau F); se verifică și curenții de scurgere ai filtrelor EMC.

Problema 4.3. Dimensionarea servomotorului pentru o axă liniară de poziționare

Pentru o mașină de ambalat care lipește etichete pe flacoane farmaceutice, se proiectează o axă liniară orizontală cu actuator electric BSA care preia eticheta de pe o bandă de furnizare și o aplică pe flacon. Date de proiectare: cursa utilă L = 250 mm, masa platformei și a etichetei m = 1,2 kg, timpul total impus de cadența mașinii t_{total} = 0,4 s (linia trebuie să eticheteze 150 flacoane/min), precizia de poziționare cerută ±0,1 mm. Actuatorul ales are: pas șurub h = 5 mm/rotație, randament η = 0,88, masa proprie a piuliței și a saniei m_p = 0,6 kg, frecare statică F_f = 18 N.

De rezolvat: Aplicați metodologia de dimensionare în șase pași prezentată în §4.3.6 și calculați: (a) profilul de mișcare; (b) viteza și accelerația maxime; (c) forța liniară; (d) cuplul și turația motorului; (e) cuplul RMS; (f) cerințele preliminare ale motorului. În pasul 6 verificați interfața mecanică și enumerați datele care mai trebuie cunoscute pentru o selecție definitivă: inerția șurubului, inerția rotorului, rigiditatea cuplajului, jocul și frecvențele proprii. Selectați apoi o familie de servomotoare dintr-un catalog industrial și demonstrați conformitatea prin datele de catalog.

Indicații. Urmați structura Exemplului 4.2 din §4.3.6, dar tratați calculul bazat numai pe masa translată drept predimensionare. Pentru selecția finală trebuie incluse inerțiile rotative ale șurubului, rotorului și cuplajului, apoi verificată turația maximă și raportul de inerții.

Răspuns. (a) Profil trapezoidal simetric: tacc = tdec = 0,4/3 ≈ 0,133 s. (b) vmax = L / (ttotal − tacc) = 0,25 / 0,267 ≈ 0,94 m/s; amax = vmax / tacc ≈ 7,0 m/s^2. (c) mt = 1,2 + 0,6 = 1,8 kg; Facc = 1,8 · 7,0 + 18 ≈ 30,7 N; la viteză constantă F = 18 N; la decelerare frecarea depășește forța de inerție, deci motorul mai furnizează ≈ 5,3 N. (d) Cu h = 5 mm: Tacc = 30,7 · 0,005 / (2π · 0,88) ≈ 0,028 N·m, dar nmax = 0,94 · 60 / 0,005 ≈ 11.250 rpm, peste turația uzuală a servomotoarelor. Concluzia de predimensionare este schimbarea pasului: cu h = 20 mm, nmax ≈ 2.810 rpm și Tacc ≈ 0,111 N·m. (e) Pentru h = 20 mm: Tconst ≈ 0,065 N·m, Tdec ≈ 0,019 N·m, TRMS ≈ $\sqrt{[(0{,}111^2 + 0{,}065^2 + 0{,}019^2)/3]}$ ≈ 0,075 N·m. (f) Cu un factor de siguranță de 1,3: cuplu de vârf ≥ 0,15 N·m, cuplu continuu ≥ 0,10 N·m, turație ≥ 2.810 rpm. Valorile cresc după includerea inerțiilor șurubului, rotorului și cuplajului; precizia de ±0,1 mm este ușor de atins ca rezoluție, dar se verifică prin bugetul de erori al axei.

Problema 4.4. Analiza economică VFD versus pornire directă pentru o pompă

O fabrică de prelucrare a apei industriale operează 24/7 o pompă centrifugă cu motor asincron de 22 kW, cuplată cu o vană de reglaj a debitului pe refulare (sistem clasic: pompa funcționează permanent

la turație nominală, debitul se reglează prin laminare cu vana). Cererea reală de debit a procesului variază astfel: 100 % din capacitate timp de 4.000 ore/an (regim de vârf), 75 % timp de 3.000 ore/an, 50 % timp de 1.000 ore/an, oprire 760 ore/an. Pentru exercițiu se adoptă un tarif didactic de 0,18 €/kWh; în proiectul real se utilizează tariful contractual actual.

De rezolvat: (a) Estimați consumul anual al sistemului existent folosind curba reală pompă–instalație sau, în lipsa ei, ipoteze declarate. (b) Estimați consumul cu VFD folosind legile afinității ca model ideal $Q \propto n$, $H \propto n^2$, $P \propto n^3$ și precizați limitele modelului. (c) Calculați economia anuală. (d) Adoptați pentru exercițiu un cost de investiție de 3.600 € și calculați perioada simplă de recuperare; pentru proiect real se utilizează ofertă actuală și cost total instalat. (e) Discutați sensibilitatea rezultatului la randamentul pompei și la profilul de sarcină.

Indicații. Comparați consumul anual la punctele de funcționare determinate din curbele pompă–instalație, pentru acționarea la turație fixă cu laminare prin vană și pentru reglarea prin VFD. Puterea absorbită de pompă la turație constantă poate varia cu debitul și curba sa caracteristică; nu este obligatoriu egală cu puterea nominală a motorului. Legile de afinitate $Q \propto n$, $H \propto n^2$ și $P \propto n^3$ oferă o aproximație pentru aceeași pompă în condiții de similitudine, nu o lege universală de economisire: în instalațiile cu înălțime statică importantă, randament variabil și limite de debit trebuie determinate efectiv curbele și punctele de funcționare. Economia este diferența dintre energiile integrate pe profilul anual de sarcină, incluzând randamentul motorului și al convertorului.

Răspuns. Ipoteze declarate: puterea la arborele pompei este 20 kW la debit 100 %; cu laminare prin vană, aproximativ 18 kW la 75 % și 16 kW la 50 %; randamentul motorului 0,93 la sarcină nominală, 0,90 și 0,85 la sarcini reduse; randamentul convertorului 0,97. (a) Existent: 4.000 · 21,5 + 3.000 · 19,4 + 1.000 · 17,2 ≈ 161.400 kWh/an. (b) Cu VFD, după legile afinității: P(75 %) ≈ 0,42 · 20 = 8,4 kW, P(50 %) ≈ 0,125 · 20 = 2,5 kW; consumul electric este 4.000 · 22,2 + 3.000 · 9,7 + 1.000 · 3,0 ≈ 120.700 kWh/an. La 100 % consumul crește ușor, din cauza pierderilor convertorului. (c) Economia este ≈ 40.700 kWh/an, adică ≈ 7.300 €/an la 0,18 €/kWh. (d) Recuperarea simplă: 3.600 / 7.300 ≈ 0,5 ani. (e) Rezultatul este optimist: dacă instalația are înălțime statică importantă, turația necesară la debit redus rămâne mai mare decât prevăd legile afinității, iar economia poate scădea substanțial; de aceea se calculează pe curbele reale pompă–instalație.

Problema 4.5. Parametrizarea unui VFD pentru un mixer industrial

Pe linia de producție de iaurt a unei fabrici alimentare, un mixer cu cuvă de 500 L este antrenat de un motor asincron cu următorul set de date nominale didactice, coerent în modelul trifazat aproximativ (nu extras dintr-o plăcuță verificată): P_n = 7,5 kW, U_n = 400 V (Δ), I_n ≈ 14,82 A (Δ), f_n = 50 Hz, n_n = 1.450 rpm, cos ϕ = 0,82, randament 89,1 % (IE3), conexiune triunghi. Procesul cere reglaj de turație în plaja 30–100 % din turația nominală pentru rețete diferite, cu cerințe de cuplu constant pe toată plaja. Variatorul ales este un Siemens SINAMICS G120 cu modul de putere dimensionat pentru 11 kW; parametrii exacți se verifică în manualul versiunii utilizate.

De rezolvat: (a) Întocmiți tabelul cu parametrii de bază ai motorului și ai profilului de mișcare. (b) Justificați alegerea V/f sau FOC. (c) Stabiliți limitele de frecvență numai după verificarea răcirii motorului, a cuplului disponibil și a procesului. (d) Propuneți rampele de accelerare/decelerare pornind de la inerția cuvei și limita de cuplu. (e) Pentru integrarea PROFINET, indicați profilul/telegrama susținută de convertor și PLC și datele de diagnostic necesare, conform §4.5.4.

Indicații. Pentru un mixer cu inerție mare și cerință de cuplu controlat pe o plajă largă de turații, controlul vectorial poate fi o opțiune adecvată; alegerea se validează prin cerințele mecanismului și capabilitățile convertorului. Rampele de accelerare/decelerare se calculează din inerția cuvei, limita de cuplu, proces și energia de frânare, fără a adopta un interval generic de timp. Pentru integrarea PROFINET se configurează profilul/telegrama suportată de convertor și PLC, conform documentației versiunilor utilizate [71], [72].

Răspuns. (a) Pn = 7,5 kW; Un = 400 V (Δ); In ≈ 14,82 A; fn = 50 Hz; nn = 1.450 rpm; cos ϕ = 0,82; Tn = 9.550 · 7,5 / 1.450 ≈ 49,4 N·m. Plaja 30–100 % înseamnă aproximativ 435–1.450 rpm, adică 15–50 Hz. (b) Cuplul constant la turații mici și inerția mare a cuvei favorizează controlul vectorial (cu sau fără encoder), care asigură cuplul la frecvență joasă mai bine decât V/f. (c) Un motor autoventilat pierde răcire la turații mici; la cuplu nominal sub aproximativ 50 % din turație se verifică curba de derating a producătorului și, la nevoie, se prevede ventilație forțată sau un motor supradimensionat. (d) Exemplu cu ipoteze: J redus la arborele motorului = 2 kg·m^2 și cuplu de accelerare disponibil 0,5 · Tn ≈ 24,7 N·m; ω = 151,8 rad/s, deci t = J · ω / T ≈ 12 s, iar rampa se alege de 12–15 s. La decelerare, energia cinetică ½ J ω^2 ≈ 23 kJ trebuie disipată, deci se verifică rezistorul de frânare sau se prelungește rampa. (e) Se folosește un profil PROFIdrive, de exemplu telegrama standard 1 (cuvânt de comandă și referință de turație / cuvânt de stare și turație reală), completată cu date de diagnostic: curent, cuplu, temperatura motorului și codurile de defect.

Problema 4.6. Selecția acționării pentru o axă rotativă de mașină-unealtă

Pentru o mașină-unealtă cu masă rotativă de indexare se cer specificațiile axei rotative cu următoarele cerințe funcționale: 12 poziții echidistante (la 30°), timpul maxim de indexare între două poziții consecutive 0,5 s, repetabilitatea de poziționare ±0,005°, cuplu de prelucrare în timpul operației 25 N·m la oprire, masa dispozitivului de fixare și a piesei reduse la axul de rotație J = 0,18 kg·m^2. Pentru exercițiu se adoptă costuri ipotetice: motor asincron 1,5 kW + VFD vector + reductor = 2.800 €; servomotor PMSM 1,5 kW + servoamplificator + reductor planetar = 5.500 €. Valorile sunt exclusiv didactice și se înlocuiesc cu oferte în analiza unui proiect real.

De rezolvat: (a) Pe baza criteriilor din §4.3.1 (Figura 4.4 și Tabelul 4.5), justificați familia de acționare. (b) Calculați cuplul dinamic necesar pentru indexare, presupunând profil trapezoidal simetric. (c) Calculați cuplul total necesar și raportul dintre cerințele de vârf și cele continue. (d) Stabiliți dacă soluția asincron + VFD satisface cerințele sau dacă este justificată servoacționarea. (e) Calculați un cost didactic pe ciclul de viață pentru 10 ani și 4.000 ore/an, folosind ipoteze explicite de mentenanță și energie. Procentele de mentenanță nu trebuie preluate ca valori industriale universale; într-un proiect real se folosesc date istorice, contracte de service și oferte.

Indicații. Repetabilitatea ±0,005° impune un lanț cinematic cu joc și elasticitate foarte reduse și, în mod uzual, măsurare în buclă închisă. Nu se deduce însă automat rezoluția encoderului numai din repetabilitatea cerută: trebuie analizate encoderul, raportul de transmisie, jocul reductorului, rigiditatea, erorile de interpolare și controlul. Cuplul de vârf necesar indexării favorizează o servoacționare; comparația cu Figura 4.6 din §4.3.3 se validează prin calcul.

Răspuns. (a) Repetabilitatea de ±0,005° (18") și profilul de mișcare rapid favorizează servoacționarea. (b) Pentru 30° în 0,5 s, cu profil trapezoidal 1/3–1/3–1/3: ωmax = 0,524 / 0,333 ≈ 1,57 rad/s, α = 1,57 / 0,167 ≈ 9,4 rad/s^2, iar cuplul dinamic la masă este Tdin = J · α = 0,18 · 9,4 ≈ 1,7 N·m, plus frecarea. (c) Cuplul de prelucrare de 25 N·m la oprire este de circa 15 ori mai mare decât cuplul dinamic, deci

dimensionarea nu trebuie făcută pe el: în practică, poziția se blochează mecanic (cuplaj Hirth sau frână de blocare) pe durata prelucrării. (d) Varianta asincron + VFD nu poate garanta repetabilitatea de 18" fără măsurare în buclă închisă și transmisie fără joc; se justifică un servomotor cu reductor de joc redus și, de regulă, encoder direct pe masă sau blocare mecanică indexată. (e) Exemplu: 10 ani, mentenanță anuală de 3 % (asincron) și 2 % (servo) din investiție, energie aproape egală: asincron ≈ 2.800 + 10 · 84 ≈ 3.640 €; servo ≈ 5.500 + 10 · 110 ≈ 6.600 €. Diferența de cost nu decide, deoarece varianta asincronă nu satisface cerința de repetabilitate.

4.11 Concepte cheie și întrebări de reflecție

4.11.1 Recapitulare: conceptele de bază

- Subsistemul electric se dimensionează pornind de la cerințele mecanice, profilurile de sarcină și bilanțul energetic al echipamentului, nu ca disciplină izolată.
- Selecția unei acționări cere corelarea cuplului/forței, vitezei, accelerației, inerțiilor, regimului de lucru, poziționării și cerințelor de frânare.
- Motorul asincron cu VFD și servoacționarea sunt familii complementare; alegerea depinde de performanța cerută, dinamica axei, feedback și arhitectura de control.
- Funcțiile de protecție (supracurent, defect de izolație, supratensiune și protecțiile specifice drive-urilor) răspund unor fenomene diferite și trebuie coordonate pentru instalația concretă.
- Integrarea fizică include tabloul, cablurile, traseele, mediul, răcirea, IP, accesul pentru service și interfețele mecanice ale echipamentelor de teren.
- Documentația electrică trebuie corelată cu modelul mecanic și cu lista I/O, astfel încât interfețele și responsabilitățile dintre discipline să rămână trasabile.

4.11.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipă. Răspunsurile sintetice apar după fiecare întrebare; pentru exersarea independentă, se recomandă parcurgerea întâi a întrebării fără consultarea răspunsului.

Q1. De ce puterea nominală a motorului nu este suficientă pentru selectarea unei acționări?
Pentru că selecția trebuie să includă profilul de mișcare, cuplul de vârf și RMS, inerțiile, turația, regimul termic, frânarea și interfața mecanică. Puterea este doar unul dintre parametri.
Q2. În ce situație devine justificată o servoacționare față de un motor asincron cu VFD?
Când aplicația cere control dinamic și poziționare/repetabilitate ridicate, feedback adecvat și un lanț mecanic compatibil. Alegerea se validează pentru axa concretă, nu printr-o regulă universală.
Q3. De ce selectivitatea protecțiilor nu se poate deduce numai din calibrele întreruptoarelor?
Pentru că trebuie cunoscute curentul prospectiv de scurtcircuit, curbele timp–curent, limitarea de energie și tabelele de selectivitate/back-up ale aparatelor selectate.
Q4. Ce informații trebuie furnizate proiectantului electric pentru o axă mecanică?
Profil de mișcare, viteză și accelerație maxime, cuplu/forță, inerții, regim de lucru, poziție de montaj, frânare și condițiile de mediu/interfață.

Q5. De ce integrarea electrică este și o problemă mecanică?
Pentru că poziția tabloului și a componentelor, traseele cablurilor, raza de curbură, accesul la service, răcirea, vibrațiile și gradul IP depind de layout-ul și construcția fizică a echipamentului.

5 Subsistemul pneumatic și hidraulic

Acționări fluidice: selecție, dimensionare și integrare în echipament

Despre acest capitol

Capitolul 4 a tratat acționările electrice. Capitolul de față completează arhitectura energetică a echipamentului prin acționările pneumatice și hidraulice, abordate din perspectiva proiectantului mecanic/mecatronic al mașinii.

Accentul nu cade pe proiectarea unei centrale de aer comprimat sau a unei instalații hidraulice de uzină, ci pe transformarea cerințelor mecanice (forță, cursă, viteză, timp de ciclu, rigiditate, spațiu și condiții de mediu) în cerințe pentru cilindru, distribuitor, debit, tubulatură, unitate de putere și interfețe de montaj.

La final, cititorul trebuie să poată preselecta tehnologia de acționare, dimensiona preliminar o axă pneumatică sau hidraulică, verifica montajul mecanic și energia stocată, interpreta o schemă ISO 1219 și formula corect datele de intrare pentru specialistul fluidic și pentru proiectantul sistemului de comandă.

Standarde și referințe normative aplicabile

ISO 4414:2010, reguli generale și cerințe de siguranță pentru sisteme pneumatice ale mașinilor; nu acoperă compresoarele și rețeaua generală de distribuție a fabricii [78].

ISO 4413:2010, reguli generale și cerințe de siguranță pentru sisteme hidraulice și componente [79].

ISO 1219-1:2012 + Amd.1:2016 și ISO 1219-2:2012, simboluri grafice și reguli pentru scheme fluidice [80], [81].

ISO 8573-1:2010, clase de puritate pentru aer comprimat: particule, apă și ulei [82].

ISO 6358-1:2013 + Amd.1:2020 + Amd.2:2026, caracteristicile de debit ale componentelor pneumatice pentru fluide compresibile [83].

ISO 11727:1999, identificarea orificiilor și a mecanismelor de comandă ale valvelor pneumatice [84].

ISO 15552:2018, cilindri pneumatici cu montări detașabile, seria 1 000 kPa, alezaje 32–320 mm [50].

ISO 6020-2:2015 și ISO 6022:2006, dimensiuni de montaj pentru cilindri hidraulici de 16 MPa, respectiv 25 MPa [85], [86].

ISO 4406:2021, codificarea nivelului de contaminare cu particule solide a fluidelor hidraulice [87].

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să analizeze rolul subsistemului pneumatic în mașină și condițiile impuse de sursa și calitatea aerului comprimat (ISO 8573-1);
- să dimensioneze o acționare pneumatică (cilindru, distribuitor, tubulatură) pornind de la forța, cursa și timpul de ciclu cerute;
- să aleagă între distribuitoare individuale și insule de valve și să integreze acționarea cu automatizarea;
- să evalueze soluțiile pentru forțe mari și hidraulica de putere, inclusiv implicațiile de siguranță și mentenanță;
- să justifice alegerea tehnologiei de acționare pentru fiecare funcție și să citească și să întocmească o schemă conform ISO 1219.

Cunoștințe prealabile

Capitolul presupune cunoașterea structurii mecanice și a mecanismelor de presare și fixare din Capitolul 3 și a logicii de alegere a acționărilor din Capitolul 4. Sunt utile noțiuni de mecanica fluidelor (presiune, debit, pierderi de sarcină) la nivelul cursurilor de licență.

Glosar de termeni și acronime

Acronimele și termenii tehnici sunt definiți la prima utilizare și sunt reuniți mai jos pentru consultare rapidă. Denumirea în limba engleză este păstrată numai când ajută la identificarea documentației și a produselor industriale.

Termen	Definiție
FRL	engl.: Filter–Regulator–Lubricator, ansamblu de filtrare, reglare și, numai dacă aplicația o cere, lubrifiere a aerului la punctul de utilizare.
PDP	engl.: Pressure Dew Point, punct de rouă sub presiune; indicator al conținutului de apă din aerul comprimat.
NC / NO	engl.: Normally Closed / Normally Open, stare normal închisă / normal deschisă a unui organ de comandă.
SE / DE	engl.: Single Acting / Double Acting, cilindru cu simplă acțiune / cu dublă acțiune.
DN	Diametru Nominal: diametrul interior al unei conducte sau al unei secțiuni de trecere într-un component, conform ISO.
Cv / Kv	Coeficienți tradiționali de debit. Pentru dimensionare riguroasă a componentelor pneumatice se preferă caracteristicile declarate conform ISO 6358 (conductanță sonică C și raport critic b / parametri echivalenți de catalog).

Termen	Definiție
GMP	engl.: Good Manufacturing Practice, bune practici de fabricație. Cerințele privind aerul care intră în contact cu produsul se stabilesc prin analiza procesului și cerințele de calitate aplicabile; GMP nu impune o singură clasă ISO 8573 universală.
PROFINET	Rețea Ethernet industrială pentru schimb ciclic de date între PLC, I/O și echipamente de câmp; în acest capitol interesează ca interfață a insulelor de valve.
EtherCAT	Rețea Ethernet industrială deterministă utilizată în sisteme de automatizare; în acest capitol este tratată numai ca interfață pentru module/insule descentralizate.
IO-Link	Interfață punct-la-punct standardizată de IEC 61131-9 între master și senzori/actuatori inteligenți; permite parametrizare și diagnostic.
IODD	IO Device Description, fișierul XML care descrie capabilitățile unui dispozitiv IO-Link (parametri, semnale, diagnostic).
MES	Manufacturing Execution System, software de coordonare a producției, între nivelul ERP și controlul automat al echipamentelor.
PLC	Programmable Logic Controller, controler logic programabil, calculatorul industrial al echipamentului.
F_t / F_u	Forță teoretică / forță utilă. $F_t = p \cdot A$; F_u se stabilește la presiunea minimă disponibilă și ține seama de frecare, contrapresiune, dinamică și marja de proiectare.

Harta capitolului

Capitolul este organizat după fluxul de decizie al proiectantului de echipament: de la cerința mecanică și condițiile de alimentare la dimensionarea actuatorului, verificarea debitului și a timpului de cursă, integrarea valvei și a tubulaturii, alegerea soluțiilor pentru forțe mari și selecția între pneumatic, hidraulic și electric. §5.7 sintetizează metodologia integrată și documentarea ISO 1219, iar §5.8 încheie capitolul cu recapitularea conceptelor-cheie și întrebări de reflecție.

5.1 Pneumatica industrială ca subsistem al mașinii

Pneumatica rămâne o tehnologie foarte utilizată pentru fixare, ejectare, manipulare și mișcări punct-la-punct, dar avantajul ei nu rezultă dintr-un prag universal de cost sau de forță. Pentru proiectantul mecanic, criteriul relevant este compatibilitatea dintre cerința funcțională și proprietățile aerului comprimat: compresibilitate, densitate de putere moderată, viteze ridicate și posibilitatea realizării unor actuatoare liniare simple și robuste [78].

Într-un echipament de fabricație, sistemul pneumatic începe practic la interfața de alimentare a mașinii și se termină la actuator. Proiectantul trebuie să cunoască presiunea minimă garantată la punctul de racord, debitul disponibil, clasa de calitate a aerului și modul de evacuare/izolare a energiei. Compresorul și rețeaua generală a fabricii sunt condiții de interfață; ISO 4414:2010 nu acoperă compresoarele și sistemele generale de distribuție ale fabricii [78].

5.1.1 Rolul pneumaticii în echipamentele de fabricație

În echipamentele moderne, aerul comprimat este utilizat frecvent pentru fixare, ejectare, transfer și manipulare. Alegerea pneumaticii rezultă din compatibilitatea dintre cerința funcțională și proprietățile tehnologiei, nu dintr-o superioritate generală față de acționările electrice sau hidraulice:

- Fixarea pieselor pe dispozitive: cilindri cu curse și forțe adaptate aplicației, utilizați pentru menținerea piesei în poziția necesară prelucrării, asamblării sau verificării.
- Ejecția pieselor finite: actuatoare care extrag sau deplasează piesa din matriță, dispozitiv ori sistemul de transport, cu cursa și dinamica stabilite din proces.
- Transferul și transportul: cilindri rodless sau actuatoare lineare ghidate care deplasează piesa între stațiile de lucru ale unei linii sincronizate.
- Manipularea cu vacuum și gripping: ejectoare sau generatoare de vacuum și organe de prindere selectate în funcție de material, geometrie, etanșeitate, sarcină și condițiile de proces.

Selecția pneumaticii pentru aceste funcții se justifică prin simplitatea unor actuatoare liniare, robustețea industrială, dinamica mișcărilor punct-la-punct și integrarea facilă cu valve și senzori. Compararea cu o axă servoelectrică trebuie făcută pentru aceeași funcție și pe ciclul de viață al aplicației, luând în calcul precizia, flexibilitatea, consumul energetic, mentenanța, infrastructura și costul total; nu există intervale universale de cost pe axă.

5.1.2 Avantaje și limitări relevante pentru proiectant

Decizia de a utiliza pneumatică în locul acționării electrice sau hidraulice se sprijină pe o analiză echilibrată a avantajelor și limitărilor. Tabelul 5.1 sintetizează principalele criterii relevante în proiectarea echipamentelor de fabricație.

Tabelul 5.1. Sinteza avantajelor și limitărilor pneumaticii în echipamente de fabricație.

Avantaje	Limitări
Actuatoare liniare simple, robuste și cu raport bun între performanță și complexitate pentru mișcări punct-la-punct.	Eficiența energetică globală depinde de producerea, tratarea, distribuția și pierderile de aer; este de regulă mai redusă decât la acționările electrice directe.
Viteze liniare ridicate și răspuns rapid pentru mase moderate.	Forțele mari conduc la diametre, debite și consumuri de aer crescute; nu există un prag universal de forță.
Componente rezistențe la mediu industrial și ușor de înlocuit.	Poziționarea continuă de precizie este dificilă fără servopneumatică și măsurare de poziție.
Energia pneumatică poate simplifica arhitectura în anumite zone cu risc de explozie.	Electrovalvele, senzorii și echipamentele asociate trebuie totuși selectate conform cerințelor zonei Ex.
Blocarea temporară a actuatorului nu produce în mod obișnuit suprasarcina termică specifică unui motor electric.	Aerul comprimat stochează energie; depresurizarea și prevenirea mișcărilor neașteptate sunt cerințe de siguranță.

Avantaje	Limitări
Standardizare dimensională bună pentru multe familii de cilindri și accesorii.	Compatibilitatea trebuie verificată pe seria concretă: montări, senzori, amortizare, racorduri și lungimea constructivă pot diferi.
Instalare modulară și integrare simplă cu insule de valve.	Scurgerile, volumele moarte și tuburile subdimensionate cresc consumul și timpul de răspuns.

Pentru proiectantul de echipament, concluzia este una de sistem: pneumatică este foarte competitivă pentru mișcări discrete și rapide, dar trebuie evaluată simultan la forță, timp de cursă, consum de aer, zgomot, mentenabilitate și siguranță. O comparație economică serioasă se face la nivel de ciclu de viață și utilizează consumul calculat al aplicației, nu valori universale de cost pe axă.

5.1.3 Interfața cu sursa și lanțul de alimentare cu aer comprimat

Aerul comprimat traversează, de la sursă până la actuator, o succesiune de echipamente de tratare și distribuție care formează lanțul de alimentare. Fiecare etapă are un rol specific în transformarea aerului atmosferic într-o sursă de energie controlabilă și compatibilă cu cerințele aplicației.

Figura 5.1 prezintă lanțul de alimentare cu aer comprimat, separând generarea și tratarea centrală de distribuția către mașină și de reglarea locală a presiunii.



Figura 5.1. Lanțul de alimentare cu aer comprimat. Figura separă generarea și tratarea centrală de distribuția către mașină și de reglarea locală a presiunii; scăderea la regulator este intenționată, în timp ce pierderile pe traseu trebuie minimizate.

Componentele lanțului de alimentare se diferențiază prin funcția tehnologică și prin amplasarea față de echipamentul beneficiar:

Compresorul, sursa primară, convertește energia mecanică în energie pneumatică. Alegerea tehnologiei și dimensionarea instalației centrale se fac la nivelul utilităților fabricii, pe baza debitului, presiunii, regimului de funcționare, eficienței energetice și cerințelor de redundanță [88]. Pentru proiectantul mașinii, valorile relevante sunt cele garantate la punctul de racord [89].

Uscătorul, componentă a sistemului de tratare a aerului, reduce conținutul de apă astfel încât clasa de calitate și punctul de rouă sub presiune să fie compatibile cu rețeaua și procesul. Refrigerarea, adsorbția și membranele reprezintă soluții posibile, selectate în funcție de condițiile de mediu, debit și calitatea cerută [89].

Rezervorul tampon: acumulează aer și atenuează vârfurile de consum. Relații de forma „volumul rezervorului = constantă × debit” pot fi folosite numai pentru predimensionare. Dimensionarea finală se bazează pe profilul de consum, intervalul admis de presiune, volumul rețelei și strategia de reglare a compresorului [89].

Rețeaua de distribuție: transportă aerul de la stația centrală la utilaje. Pentru proiectantul mașinii sunt importante presiunea minimă garantată și debitul disponibil la punctul de racord. Pierderea admisibilă pe rețea se stabilește de beneficiar și trebuie verificată pentru debitul maxim simultan; nu se presupune un prag universal exprimat în bar/100 m [89].

Unitatea FR / FRL, tratarea finală la punctul de utilizare, este tratată în detaliu în §5.1.4.

Actuatorul. Beneficiarul final: cilindrul, ejectorul vacuum sau motorul rotativ care convertește presiunea în lucru mecanic util.

Presiunea la actuator este mai mică decât presiunea de generare din două motive diferite: pierderi nedorite pe conducte, filtre, valve și racorduri, respectiv reducerea intenționată în regulator pentru stabilirea presiunii de lucru. Aceste efecte nu trebuie confundate. Energia disipată prin laminare și pierderi nu este „recuperată” prin volumul rețelei; volumele pneumatice stochează energie și influențează răspunsul tranzitoriu [78], [89].

5.1.4 Unitatea de condiționare FR / FRL

Înainte de distribuitor și actuator, aerul este condiționat local prin filtrare și reglarea presiunii (Figura 5.2). Configurația de bază este FR (filtru–regulator). Lubrificatorul se adaugă numai dacă documentația componentelor sau procesul o solicită; în multe echipamente moderne se utilizează componente proiectate pentru funcționare fără adaos continuu de ulei [78], [89].

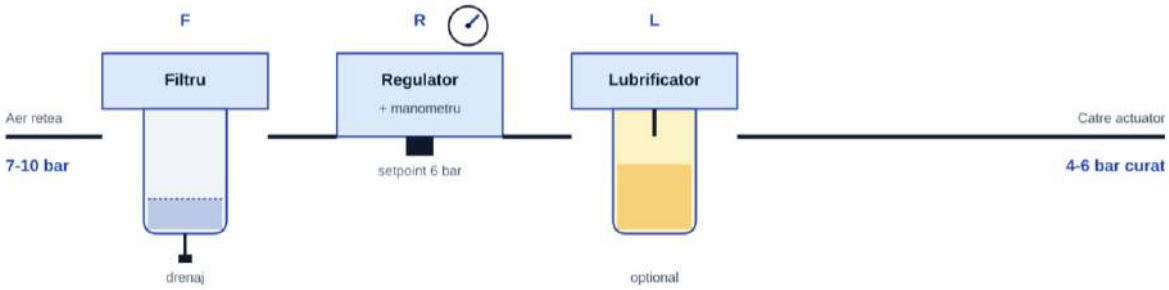


Figura 5.2. Schemă funcțională a unei unități de condiționare a aerului: filtrare, reglarea presiunii și lubrifiere opțională.

Filtrul (F)

Îndepărtează particulele solide și condensul rezidual din aer. Gradul de filtrare și arhitectura în una sau mai multe trepte se aleg din clasa de puritate cerută, sensibilitatea componentelor, debit și documentația producătorului [82], [89].

- Pre-filtrarea poate fi utilizată pentru reținerea particulelor grosiere și pentru protejarea treptelor de filtrare mai fine; dimensiunea nominală a elementului filtrant se selectează din cerințele aplicației și din catalog.
- Filtrarea de lucru protejează valvele și actuatoarele; clasa și finețea necesare nu se deduc dintr-o valoare universală, ci din cerința de puritate și din specificațiile componentelor.
- Filtrarea fină/coalescentă poate fi necesară pentru aerosoli de ulei sau procese sensibile. Performanța trebuie exprimată prin parametrii declarați ai filtrului și prin clasa de aer urmărită, nu printr-o singură dimensiune de particulă.

Bolul filtrului trebuie să permită evacuarea condensului prin soluția prevăzută de producător. Căderea de presiune crește cu debitul și cu încărcarea elementului filtrant; pragul de service se stabilește din curba produsului, indicatorul de colmatare/diferență de presiune și planul de mentenanță, nu dintr-o valoare universală [89].

Regulatorul (R)

Reduce și menține presiunea la valoarea necesară aplicației, în limita presiunii disponibile în amonte. Setpoint-ul se stabilește din forța și dinamica actuatorului, nu dintr-un interval generic de 4–6 bar. Regulatorul compensează variațiile din amonte în domeniul său de funcționare, dar nu poate crește presiunea peste nivelul disponibil la intrare [78], [89].

Lubrificatorul (L)

Lubrificatorul adaugă în aerul de lucru o ceață fină de ulei pentru componentele care necesită ungere suplimentară. În echipamentele moderne, numeroși cilindri și distribuitoare sunt proiectați pentru funcționare fără lubrifiere externă; de aceea, lubrificatorul nu se introduce implicit. Decizia se ia din documentația producătorului și din condițiile procesului. Dacă lubrifierea a fost introdusă într-un circuit, regimul trebuie menținut consecvent. În aplicațiile alimentare, farmaceutice sau în alte procese sensibile la contaminare se preferă, atunci când componentele permit, funcționarea fără adaos de ulei.

> **Reguli de proiectare pentru unitatea FR / FRL**
>
> Se amplasează astfel încât volumul pneumatic aval și căderea de presiune să fie reduse, dar elementele de reglare, drenaj și izolare să rămână accesibile pentru mentenanță.
> Filtrul precedă regulatorul pentru a proteja elementele interne ale acestuia.
> Condensul se evacuează controlat și se gestionează conform cerințelor instalației și ale mediului.
> Presiunea reglată trebuie să poată fi verificată local; pentru procese critice se adaugă traductor de presiune.
> Izolarea și depresurizarea trebuie proiectate astfel încât intervenția să nu lase energie pneumatică periculoasă în actuator sau în volumele aval.

5.1.5 Calitatea aerului: codificarea ISO 8573-1

Calitatea aerului comprimat la punctul de utilizare nu este o caracteristică binară, ci un compromis tehnic-economic. ISO 8573-1:2010 introduce o codificare în trei poziții pentru particule, apă și ulei, permițând specificarea clasei de puritate necesare aplicației [82].

Cele trei poziții ale codului exprimă separat clasa pentru particule solide, apă și ulei. Pentru particule, clasificarea nu este o simplă „dimensiune maximă admisă”, ci utilizează concentrații de particule în domenii dimensionale definite de standard. Pentru apă se utilizează, în clasele relevante, punctul de rouă sub presiune (PDP), iar pentru ulei se consideră concentrația totală în condițiile precizate de standard.

- Particule solide (X): clasa este definită prin concentrațiile maxime admise ale particulelor în intervalele dimensionale precizate de ISO 8573-1; nu printr-o singură dimensiune maximă.
- Conținut de apă (Y): pentru clasele relevante se utilizează punctul de rouă sub presiune (PDP); în domeniile prevăzute de standard pot există și criterii privind apa lichidă.

- Conținut de ulei (Z): concentrația totală de ulei se exprimă în mg/m^3 și se verifică prin metodă de măsurare aplicabilă.

Cele trei axe ale clasificării ISO 8573-1, particule, apă și ulei, sunt reprezentate didactic în Figura 5.3.

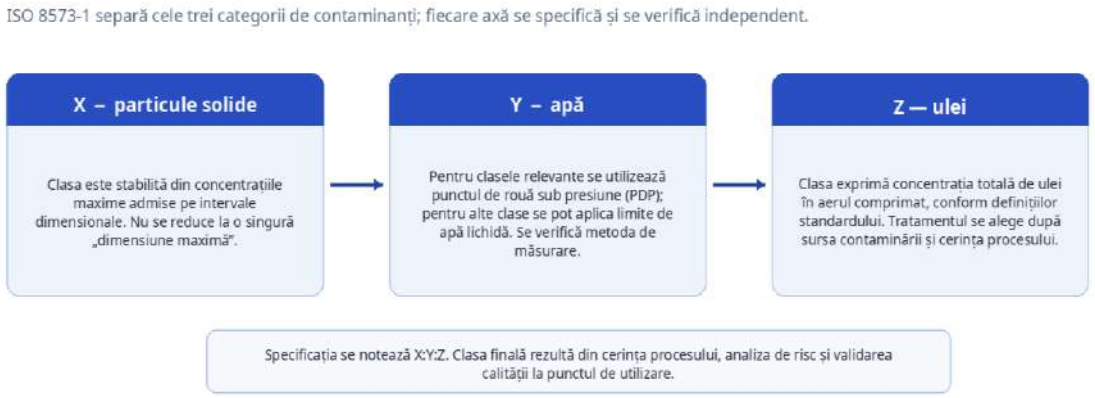


Figura 5.3. Reprezentare didactică a celor trei axe ale clasificării ISO 8573-1: particule, apă și ulei. Valorile exacte și metoda de măsurare se verifică în standard și în documentația sistemului de tratare.

Combinațiile din Tabelul 5.2 sunt exemple didactice de specificare a purității pentru categorii diferite de aplicații. Ele nu reprezintă clase obligatorii pentru un sector industrial; clasa finală se stabilește din cerințele procesului și ale componentelor [82].

Tabelul 5.2. Aplicații tipice ale claselor de calitate ISO 8573-1 și recomandări de tratare.

Cod ISO	Exemplu de utilizare și observație de proiectare
4:4:4	Exemplu orientativ pentru acționări pneumatice generale, dacă producătorul componentelor și procesul permit această clasă.
3:4:3	Exemplu orientativ pentru componente mai sensibile la particule și aerosoli; se validează prin cerințele de catalog.
2:4:2	Nivel de puritate ridicat, posibil justificat pentru instrumentație și procese sensibile. Nu reprezintă un „standard automotive" universal.
1:2:1	Nivel foarte ridicat de puritate. Pentru aplicații alimentare/farmaceutice, acceptabilitatea se stabilește prin analiza riscului de contaminare și cerințele procesului.
1:1:1	Specificație foarte severă; justificarea tehnică trebuie documentată deoarece costul energetic și complexitatea tratării cresc semnificativ.

Exemplul rezolvat 5.1. Specificarea calității aerului pentru un proces sensibil

Date: echipament de dozare într-o zonă controlată; debit estimat 200 m^3/h la punctul de utilizare; aerul poate avea contact indirect cu produsul. Cerința de calitate nu se deduce doar din denumirea industriei.

Metodă: (1) se identifică riscul asociat particulelor, apei, aerosolilor și vaporilor de ulei; (2) se stabilește clasa ISO 8573-1 pentru fiecare contaminant; (3) se verifică metodele de măsurare și validare; (4) dacă există cerințe microbiologice, acestea se tratează separat prin filtrare sterilizantă validată și prin proceduri de igienă, deoarece carbonul activ nu este un filtru sterilizant.

Concluzie: o specificație de tip 1:2:1 poate fi o țintă de proiectare în anumite procese, dar nu este o cerință GMP universală. Clasa finală trebuie documentată prin analiza de risc și prin cerințele de calitate ale procesului.

În practică: tratare centrală și tratare locală

O instalație nu trebuie să trateze întregul debit al fabricii la cea mai severă clasă dacă numai câteva consumatoare au cerințe speciale. O arhitectură frecvent eficientă este tratarea centrală la nivelul necesar majorității consumatorilor și tratarea suplimentară locală pentru procesele critice. Decizia se validează energetic și prin monitorizarea calității la punctul de utilizare.

5.2 Proiectarea acționării pneumatice: componente, dimensionare și integrare

Pentru proiectantul mecanic, selecția unei axe pneumatice trebuie să pornească de la sarcină și de la ciclul mecanic, nu de la catalogul distribuitorului. Cilindrul, valva, tubulatura și presiunea disponibilă formează un singur lanț: un cilindru suficient ca diametru poate rămâne prea lent dacă debitul este limitat sau poate deveni instabil dacă sarcină laterală și montajul nu sunt controlate.

5.2.1 Distribuitoare pneumatice: funcție și stări

Distribuitorul pneumatic este organul care direcționează aerul comprimat către actuator și controlează astfel funcționarea acestuia. Funcțional, un distribuitor este caracterizat prin numărul de orificii (căi) și numărul de poziții (stări de comutare), notație utilizată și în reprezentarea simbolică a circuitelor fluidice [80].

Identificarea numerică a orificiilor și a mecanismelor de comandă trebuie raportată la standardele aplicabile familiei de valve; pentru identificarea porturilor și a mecanismelor de comandă este relevant ISO 11727:1999 [84]. În documentație pot apărea simultan identificatori numerici și notațiile tradiționale P, A, B, R, S; proiectantul trebuie să urmeze schema și marcajele producătorului.

- 1 (P): alimentarea cu aer comprimat (presiune disponibilă).
- 2 și 4 (A, B): orificiile de utilizare (către actuator).
- 3 și 5 (R, S): evacuările (atmosferă, prin silențiator).

Comanda distribuitorului, comutarea între poziții, se realizează fie prin actuatoare electromecanice (solenoizi, simbol SOL), fie prin presiune pilot (aer comprimat dintr-un alt circuit, simbol Z), fie manual sau mecanic (pârghii, role, plonjoare). Distribuitoarele monostabile au o singură poziție comandată și o poziție de repaus (menținută de un arc); distribuitoarele bistabile mențin poziția comandată până la o nouă acțiune contrară (Figura 5.4).

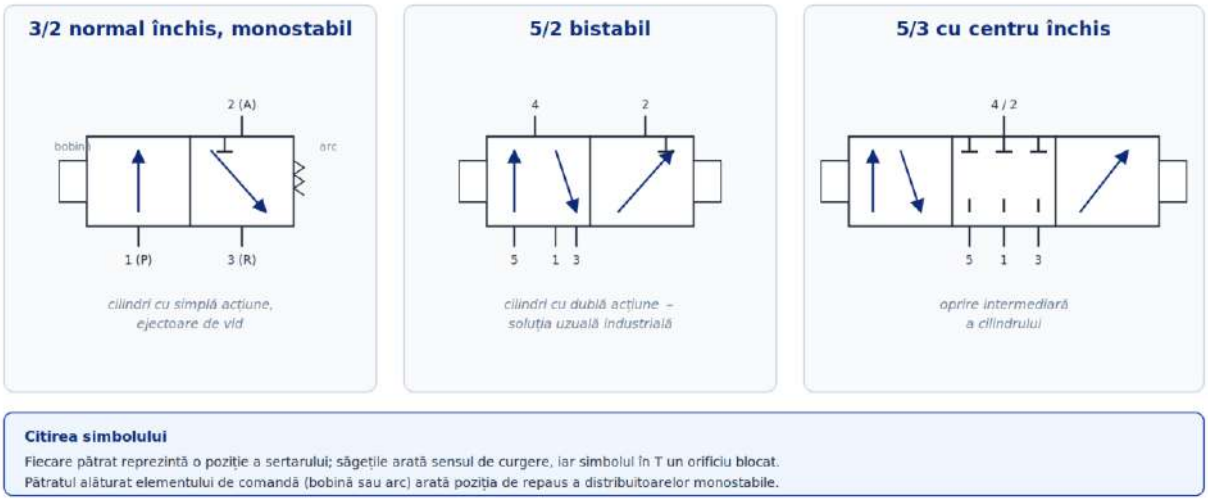


Figura 5.4. Simboluri ISO 1219-1 pentru distribuitoarele uzuale: 3/2 monostabil, 5/2 bistabil, 5/3 cu centru închis.

Configurațiile de mai jos sunt uzuale în echipamentele de fabricație și ilustrează relația dintre numărul de căi, numărul de poziții și comportamentul actuatorului:

3/2 NC (Normally Closed). Distribuitor pentru cilindri cu simplă acțiune și pentru ejectoare vacuum. În poziția de repaus, aerul este oprit și actuatorul este conectat la atmosferă (revenirea cilindrului prin arc). La activarea solenoidului, aerul curge la actuator. Opțiune economică: un singur solenoid, un singur arc.

3/2 NO (Normally Open). Varianta inversă: în repaus, aerul curge la actuator. Folosit când securitatea cere ca actuatorul să fie alimentat în absența semnalului electric (de ex. frâna pneumatică eliberată cu aer).

5/2 monostabil: configurație frecvent utilizată pentru cilindri cu dublă acțiune. Două orificii de utilizare conduc către camerele cilindrului, iar cele două evacuări permit descărcarea alternativă a acestora. Sensul extindere/retragere depinde de racordarea concretă; revenirea sertarului în poziția de repaus se realizează prin arc.

5/2 bistabil: are două comenzi și păstrează starea distribuitorului după dispariția semnalului de comandă. Aceasta nu înseamnă că poziția mecanică a cilindrului este garantată la pierderea alimentării: compresibilitatea aerului, scăpările și forțele externe pot produce mișcare. Menținerea sigură a unei sarcini se proiectează separat, de exemplu prin blocare mecanică, rod-lock sau o arhitectură pneumatică validată pentru funcția de siguranță.

5/3: oferă o poziție centrală suplimentară, ale cărei conexiuni pot fi închise, evacuate sau presurizate în funcție de execuție. Un centru închis izolează camerele, dar nu trebuie descris ca o „frână” mecanică sigură. Comportamentul la oprire se evaluează cu sarcină reală, scăpările, compresibilitatea și cerințele de siguranță.

5.2.2 Tipuri constructive de distribuitoare

Pe lângă clasificarea funcțională, distribuitoarele se diferențiază prin tipul constructiv al sertarului și prin modul de comandă.

Sertar (spool) vs supapă cu plonjor (poppet)

Distribuitoarele cu sertar (spool) folosesc un element culisant care, prin translație axială, conectează sau separă orificiile. Pot oferi debite ridicate și comutare rapidă, dar sensibilitatea la contaminare, scăpările și forța de comandă depind de geometrie, etanșări și execuție. Capacitatea de debit se verifică din caracteristicile declarate ale modelului selectat.

Distribuitoarele cu plonjor (engl.: poppet valve) utilizează un element de închidere axială și o etanșare prin contact. Avantajele tipice sunt etanșarea bună în poziția închisă și robustețea la contaminare; dezavantajele sunt debitul mai redus și creșterea forței de comandă cu presiunea. Domeniul de debit și presiunea minimă de pilotare se verifică în fișa tehnică. Utilizarea într-o zonă cu atmosferă potențial explozivă nu rezultă din principiul pneumatic al valvei: bobina, senzorii și întregul ansamblu trebuie să aibă certificarea corespunzătoare zonei Ex.

Comanda directă, pilotată și mecanică

Comanda directă cu solenoid presupune ca forța electromagnetică a bobinei să acționeze direct elementul de distribuție. Domeniul de presiune, debitul, dimensiunea racordurilor și puterea bobinei sunt dependente de produs; nu există o limită universală de tip „peste G1/4 este necesară pilotarea”.

Comanda pilotată utilizează presiunea pneumatică pentru deplasarea elementului principal, solenoidul acționând circuitul pilot. Această arhitectură permite comanda unor debite mai mari cu o forță electromagnetică redusă, dar poate impune o presiune minimă de pilotare sau o alimentare pilot separată. Valorile concrete se verifică în fișa tehnică a valvei.

Comanda mecanică și manuală (pârghii, role, plonjoare acționate de camă sau de ramul mecanic) este utilizată pentru sincronizare directă cu o mișcare mecanică adiacentă sau pentru opriri manuale.

Capacitatea de debit: Cv și Kv

Capacitatea de curgere a valvei trebuie corelată cu debitul cerut de actuator și cu diferența de presiune disponibilă. Cv și Kv pot apărea în cataloage, dar pentru pneumatică caracterizarea conform ISO 6358-1 oferă parametri de curgere declarați printr-o metodă standardizată. Nu se utilizează o regulă universală de forma „Cv al valvei = 1,3 × Cv al cilindrului”; se verifică întregul traseu: valvă, racorduri, tub și evacuare [83].

5.2.3 Cilindri pneumatici: principiu și tipuri constructive

Cilindrul pneumatic transformă energia aerului comprimat în deplasare liniară și forță utilă. Constructiv, include un corp cilindric, piston, etanșări, capace și, la cilindrul cu tijă, o tijă care transmite sarcina; execuția concretă depinde de familia constructivă și de presiunea nominală [90].

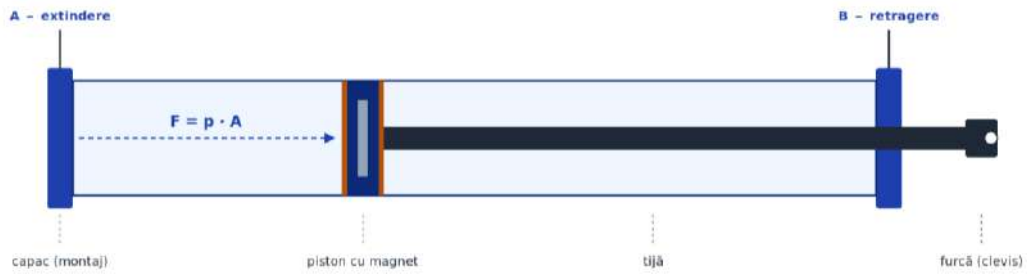


Figura 5.5. Cilindru pneumatic cu dublă acțiune: secțiune longitudinală. Aerul intră alternativ prin orificiile A și B.

Funcționarea unui cilindru cu dublă acțiune (DE) urmează un ciclu în patru pași (Figura 5.5):

- Pasul 1. Aer la orificiul A (cameră spate); aerul evacuează prin orificiul B. Pistonul și tija se extind cu forță $F = p \times A_{piston}$.
- Pasul 2. La finalul cursei, distribuitorul comută. Aerul intră la B, evacuează prin A. Pistonul se retrage cu forță $F = p \times (A_{piston} - A_{tija})$, mai mică datorită secțiunii reduse de pe partea tijei.
- Pasul 3. La apropierea de capătul cursei, sistemul de amortizare al cilindrului, dacă există și este necesar, reduce energia de impact. Lungimea și capacitatea de amortizare sunt specifice seriei și se verifică față de masa, viteza și energia aplicației.
- Pasul 4. Poziția detectată de senzori magnetici (reed sau Hall) montați pe corpul cilindrului: feedback către PLC.

Tipurile principale de cilindri pneumatici se diferențiază prin numărul de camere active și prin soluția constructivă pentru transferul forței la sarcină:

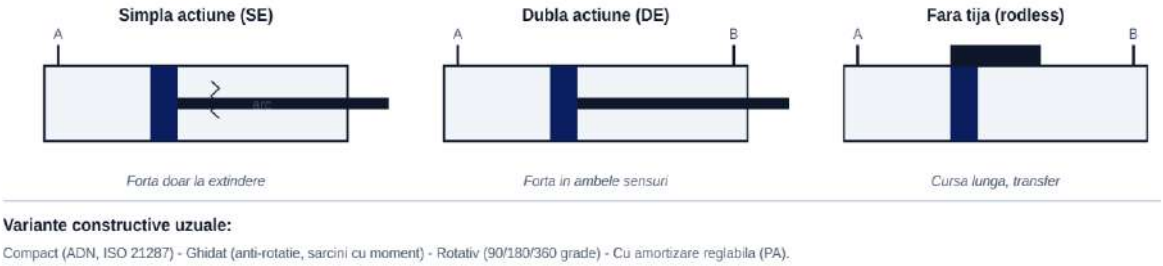


Figura 5.6. Tipuri uzuale de cilindri pneumatici: comparație schematică conform ISO 1219.

Cilindru cu simplă acțiune (SE): o singură cameră este alimentată cu aer, iar revenirea este realizată prin arc sau printr-o forță externă, în funcție de construcție. Forța de revenire, cursa și dinamica sunt dependente de model; selecția se face din datele producătorului.

Cilindru cu dublă acțiune (DE): cele două camere sunt alimentate alternativ, permițând dezvoltarea forței în ambele sensuri. Domeniile de alezaj, cursă, amortizare și viteză depind de seria constructivă; pentru seriile standardizate se verifică standardul dimensional și catalogul producătorului.

Cilindru fără tijă (rodless). Pistonul este cuplat printr-o bandă metalică sau un cuplaj magnetic la o sanie externă care glisează pe corp. Avantaj: gabarit redus pe direcția cursei (cursă = lungime totală), fără tijă care iese din corp. Aplicații: transfer pe linia de producție, mișcări pe X-Y în spații înguste.

Cilindru compact (ISO 21287): familie metrică de cilindri pneumatici compacți cu o singură tijă, pentru alezaje 20–100 mm și presiune maximă de lucru de 1 000 kPa (10 bar). Standardul precizează că seria nu este echipată cu amortizare reglabilă; cursa și variantele disponibile se verifică în catalog [91].

Cilindru ghidat: DE prevăzut cu două tije paralele de ghidare, anti-rotație, capabil să preia momente de încovoiere și sarcini transversale. Folosit în aplicații cu sarcini neechilibrate (manipulatoare cu dispozitive de prindere lateral).

Actuator rotativ pneumatic: transformă energia pneumatică într-o rotație limitată sau, pentru alte familii constructive, într-o rotație continuă. Unghiul disponibil, cuplul și principiul intern (de exemplu cremalieră–pinion sau paletă) sunt dependente de produs și de aplicație.

Amortizarea și etanșările

La capătul cursei, energia cinetică a masei mobile trebuie disipată fără depășirea solicitărilor admise ale cilindrului și structurii. Viteza permisă și energia care poate fi absorbită de amortizarea internă sunt dependente de seria de actuator, presiune, masă și reglaj; nu se adoptă un interval universal de viteză [90].

- Amortizare pneumatică reglabilă: utilizează restricționarea controlată a evacuării în zona finală a cursei. Lungimea efectivă de amortizare și domeniul de reglaj sunt caracteristici ale produsului și se verifică din catalog.
- Amortizare elastică: utilizează elemente elastomerice sau soluții similare pentru absorbția energiei la capăt de cursă; este adecvată numai dacă energia și frecvența de impact se încadrează în limitele declarate.
- Amortizor extern: poate fi necesar atunci când energia de impact depășește capacitatea amortizării integrate. Dimensionarea se face din masa echivalentă, viteza de impact, energia pe ciclu și frecvența de lucru, nu numai din diametrul cilindrului.

Etanșările pistonului și tijei sunt elemente critice ale fiabilității. NBR este o soluție uzuală pentru aer comprimat și uleiuri minerale în domeniul de temperatură declarat de producător; FKM se utilizează la temperaturi mai ridicate și în prezența unor fluide agresive, iar PTFE apare frecvent în combinații de etanșare cu frecare redusă. Durata de viață nu se exprimă printr-un număr universal de cicluri: ea depinde de presiune, viteză, lubrifiere, contaminare, aliniere, temperatură și profilul de lucru.

5.2.4 ISO 15552: interschimbabilitate dimensională și limitele ei

ISO 15552:2018 stabilește o serie metrică de dimensiuni de bază, montaj și accesorii pentru cilindri pneumatici cu montări detașabile, presiune nominală maximă 1 000 kPa (10 bar) și alezaje 32–320 mm (Tabelul 5.3) [50]. Avantajul este interoperabilitatea la nivelul cotelor standardizate. Totuși, proiectantul trebuie să verifice seria concretă: lungimea totală, amortizarea, senzorii, accesoriile, filetul tijei și detaliile de montare pot diferi între furnizori chiar dacă interfața principală este standardizată.

Consecința inginerească este reducerea dependenței de un furnizor atunci când interfața mecanică este definită prin standard. Libertatea de substituție nu trebuie însă presupusă automat: înaintea înlocuirii se verifică desenul dimensional, cursă, presiunea admisă, sarcinile laterale, senzorii și performanța de amortizare.

Tabelul 5.3. Forța teoretică la extindere pentru diametre uzuale ISO 15552 la 6 bar; valorile nu includ frecarea, contrapresiunea sau marja de proiectare.

Ø piston [mm]	F teoretică la 6 bar [kN]	Utilizare orientativă	Observație de proiectare
32	0.48	opritoare/ejectare	Verificați p_{min}, frecarea și dinamica.
40	0.75	fixare ușoară	Verificați p_{min}, frecarea și dinamica.
50	1.18	manipulare/fixare	Verificați p_{min}, frecarea și dinamica.
63	1.87	fixare medie	Verificați p_{min}, frecarea și dinamica.

Ø piston [mm]	F teoretică la 6 bar [kN]	Utilizare orientativă	Observație de proiectare
80	3.02	fixare/transfer	Verificați p_{min}, frecarea și dinamica.
100	4.71	forțe ridicate	Verificați p_{min}, frecarea și dinamica.
125	7.36	forțe ridicate, gabarit mare	Verificați p_{min}, frecarea și dinamica.

5.2.5 De la forța cerută la diametrul cilindrului

Forța teoretică dezvoltată de un cilindru pneumatic la extindere se calculează din relația fundamentală a presiunii pe suprafața pistonului:

$$F = p \cdot A = p \cdot \frac{\pi d^2}{4} \tag{5.1}$$

Unde F este forța teoretică [N], p este presiunea efectivă [Pa = N/m^2] și d este diametrul pistonului [m]. La retragere, forța este redusă cu aria ocupată de tijă:

$$F_{\text{retragere}} = p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(d^2 - d_{\text{tijă}}^2\right) \tag{5.2}$$

Diametrul tijei nu se deduce printr-un raport universal față de alezaj; se preia din seria selectată și se verifică față de flambaj, sarcini laterale și montaj [90].

În proiectarea preliminară, relația F = p·A se aplică la presiunea efectivă disponibilă în camera cilindrului, nu la presiunea nominală a compresorului. Forța utilă este influențată de frecarea etanșărilor, contrapresiunea pe evacuare, accelerația sarcinii și variația presiunii. În locul unui procent universal de pierderi, se utilizează datele producătorului și o marjă aleasă în funcție de dinamică. Pentru exercițiile din acest capitol se poate adopta explicit un coeficient didactic k_u = 0,70–0,80, urmând validarea cu datele de catalog; intervalul nu este o cerință normativă [90].

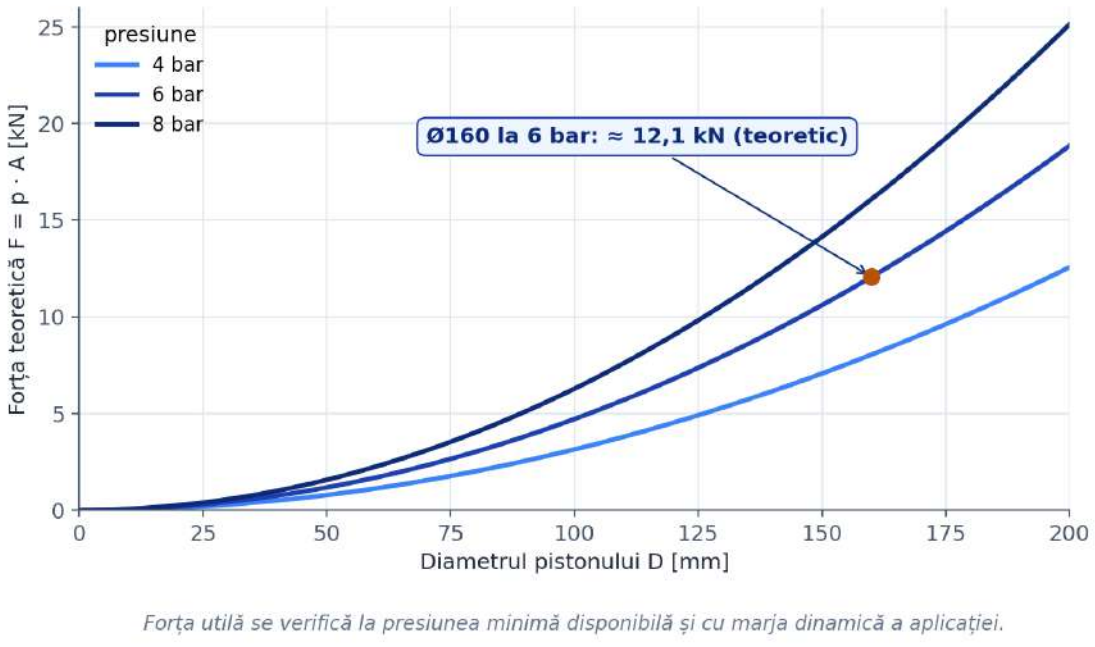


Figura 5.7. Forța teoretică de extindere a cilindrului în funcție de diametru și presiune. Curbele sunt utile pentru predimensionare; selecția finală se face la presiunea minimă disponibilă și cu marja de proiectare a aplicației.

Diagrama din Figura 5.7 permite estimarea rapidă a ordinului de mărime al diametrului în proiectul preliminar. Markerul evidențiază Ø160 mm la 6 bar, pentru care forța teoretică de extindere este aproximativ 12,1 kN. Selecția finală se verifică însă la presiunea minimă garantată la actuator și cu marja corespunzătoare dinamicii aplicației.

Exemplul rezolvat 5.2. Dimensionarea unui cilindru pentru o forță utilă de fixare de 8 kN

Date: F_u = 8 kN; presiunea minimă garantată la intrarea cilindrului p_{min} = 5,5 bar; cursă 30 mm; mișcare de fixare, fără cerință de impact; pentru predimensionare se adoptă coeficientul de utilizare k_u = 0,75.

Aria minimă rezultă:

$$A_{\min} = \frac{F_u}{p_{\min} \cdot k_u} = \frac{8\,000}{5{,}5 \cdot 10^5 \cdot 0{,}75} \approx 0{,}0194\ \text{m}^2 \tag{5.3}$$

Diametrul echivalent este:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{4A_{\min}}{\pi}} \approx 157\ \text{mm} \tag{5.4}$$

Se selectează diametrul standard Ø160 mm. La 5,5 bar, forța teoretică este aproximativ 11,06 kN; cu k_u = 0,75 rezultă o forță de proiectare de aproximativ 8,29 kN, deci cerința de 8 kN este satisfăcută cu o rezervă redusă.

Verificare critică: dacă aplicația are șocuri, sarcini laterale, o presiune minimă mai mică sau solicită o rezervă mai mare, Ø160 nu mai este suficient. Soluția se reevaluează prin creșterea diametrului, modificarea mecanismului sau trecerea la o tehnologie cu densitate de forță mai mare. Nu se aplică unui cilindru ISO 15552 o presiune peste domeniul său nominal pentru a „recupera” forța.

În practică: standardizarea cilindrului nu înlocuiește verificarea aplicației

Standardizarea ISO 15552 simplifică montajul și aprovizionarea, dar fiabilitatea depinde de aliniere, sarcini laterale, amortizare, calitatea aerului și regimul de ciclare. Planul de mentenanță se stabilește din datele producătorului și din numărul real de cicluri, nu dintr-un interval universal atribuit unei industrii.

5.2.6 Dimensionarea debitului, vitezei și timpului de cursă

După verificarea forței, proiectantul trebuie să demonstreze că actuatorul poate parcurge cursa în timpul impus de ciclul mașinii. Pentru o estimare cinematică, debitul volumic în camera activă este:

$$Q = A \cdot v \tag{5.5}$$

unde A este aria efectivă și v viteza pistonului. În pneumatică reală, debitul de alimentare trebuie raportat la condițiile de presiune și temperatură, iar valva și tubulatura se verifică prin caracteristicile de curgere declarate conform ISO 6358-1 [83].

Exemplu de predimensionare: un cilindru Ø63 mm care trebuie să se deplaseze cu 0,5 m/s are A ≈ $3{,}12 \cdot 10^{-3}$ m² și solicită Q ≈ $1{,}56 \cdot 10^{-3}$ m³/s, adică aproximativ 94 L/min la presiunea din cameră. Raportat orientativ la aer liber pentru aproximativ 6 bar(g), debitul normal este de ordinul a 650 NL/min. Valoarea finală se corectează cu temperatură, contrapresiunea, umplerea volumelor moarte și profilul de accelerație.

Consecință de proiectare: alegerea valvei numai după diametrul racordului este insuficientă. Se verifică succesiv debitul necesar, conductanța valvei, diametrul și lungimea tubului, racordurile, amortizarea și evacuarea. Dacă timpul calculat sau măsurat este prea mare, mărirea cilindrului poate agrava problema deoarece crește volumul ce trebuie umplut.

5.2.7 Montajul mecanic al cilindrilor pneumatici și hidraulici

Subsecțiunea §5.2.4 a tratat ISO 15552 din perspectiva interschimbabilității dimensionale. Pentru inginerul mecanic, completarea necesară este alegerea tipului de montare și proiectarea interfeței tijă–sarcină astfel încât forța să fie transmisă fără sarcini laterale sau momente parazite excesive. Standardele definesc coduri și dimensiuni de montaj; alinierea, îmbinările și verificarea la sarcina reală rămân responsabilitatea proiectului [50], [92].

Configurațiile de montare ISO 15552

ISO 15552:2018 include, cu identificarea tipurilor conform ISO 6099:2018, următoarele montări detașabile: MF1, flanșă rectangulară la capul cu tijă; MF2, flanșă rectangulară la capacul posterior; MP2, furcă detașabilă la capac; MP4, ochi simplu detașabil; MP6, ochi detașabil cu lagăr sferic; MS1, unghiuri/picioare de capăt; MT4, trunnion intermediar, fix sau mobil [50], [92]. Aceste coduri descriu tipul de montare, nu frecvența lui de utilizare și nici dimensiunea șuruburilor sau pinilor; aceste dimensiuni se preiau din standardul și desenul seriei concrete.

Interfața tijă-sarcină și alinierea

Tijă cilindrului trebuie încărcată predominant axial. Sarcinile laterale și momentele de încovoiere accelerează uzură bucșei de ghidare și a etanșării și pot produce flambaj sau îndoire. Nu se impune o toleranță universală de aliniere pentru toate cilindreele: valorile admisibile se preiau din documentația seriei și din accesoriile de montaj. Pentru sarcini ghidate separat se utilizează capete articulate, cuplaje de aliniere sau actuatoare ghidate, astfel încât cilindrul să nu devină elementul de ghidare al mecanismului.

Șuruburi de fixare și cupluri de strângere

Șuruburile de fixare ale cilindrului și flanșelor transmit reacțiunile către structură și trebuie dimensionate ca orice îmbinare solicitată ciclic. Clasa șurubului, preîncărcarea și cuplul de strângere se stabilesc din geometria îmbinării, coeficientul de frecare, acoperire/lubrifiere și documentația producătorului. Valorile tabelare pot fi utilizate doar orientativ; în aplicații critice se documentează metodă de strângere și dispozitivul de blocare împotriva slăbirii.

Tabelul 5.4 prezintă tipurile de montare incluse în ISO 15552:2018 pentru cilindrii pneumatici cu montări detașabile.

Tabelul 5.4. Tipurile de montare incluse în ISO 15552:2018 pentru cilindri pneumatici cu montări detașabile; codificarea tipurilor urmează ISO 6099:2018 [50], [92].

Cod	Tip de montare ISO 15552	Rol geometric / utilizare	Verificare de proiect
MF1	Flanșă rectangulară la capul cu tijă	Fixare prin flanșa frontală; sarcina este transmisă axial prin structură	Cotele de flanșă, șuruburile și reacțiile se verifică pentru alezajul/seria selectată.
MF2	Flanșă rectangulară la capacul posterior	Fixare prin flanșa posterioară	Se verifică accesul, rigiditatea suportului și alinierea axei.
MP2	Furcă detașabilă la capac	Montare articulată în jurul unui pin	Pinul, lagărul și libertatea unghiulară se dimensionează din sarcină și ciclu.

Cod	Tip de montare ISO 15552	Rol geometric / utilizare	Verificare de proiect
MP4	Ochi simplu detașabil la capac	Montare articulată cu ochi simplu	Se verifică presiunea de contact, uzura pinului și alinierea.
MP6	Ochi detașabil cu lagăr sferic	Montare articulată cu compensarea unor mici nealinieri unghiulare	Capacitatea lagărului sferic și unghiul admis se preiau din seria concretă.
MS1	Unghiuri/picioare de capăt	Fixare pe o suprafață suport prin elemente laterale	Îmbinarea filetată și placa suport se dimensionează la reacțiile reale.
MT4	Trunnion intermediar, fix sau mobil	Montare pivotantă în jurul axei trunnionului	Poziția trunnionului, lagărele/suporturile și momentele se verifică pe mecanism.

5.2.8 Tubulaturi, racorduri și etanșări

Tubulatura și racordurile fac parte din dinamica actuatorului, nu doar din montaj. Materialul, diametrul interior, lungimea, raza de îndoire și numărul de racorduri influențează căderea de presiune și timpul de umplere. Presiunea admisă, temperatura, compatibilitatea chimică și raza minimă se verifică pentru seria concretă; nu se presupun valori universale independente de produs [78], [90].

Tubulaturi: materiale și dimensiuni standardizate

Tuburile pneumatice sunt disponibile în mai multe familii de materiale, de exemplu poliamidă (PA), poliuretan termoplastic (TPU/PUR) și PTFE. PA este utilizată frecvent pentru trasee fixe și robuste, TPU/PUR pentru trasee flexibile și mișcare repetată, iar PTFE atunci când compatibilitatea chimică sau temperatura justifică această alegere. Presiunea admisă, domeniul de temperatură, raza minimă de îndoire și debitul permis depind de material, grosimea peretelui, diametru și producător. Pentru circuitele hidraulice se folosesc conducte și furtunuri dimensionate explicit pentru presiunea, impulsurile, fluidul și condițiile de montaj ale aplicației; valorile pneumatice nu se transferă la hidraulică [78], [90].

Racorduri push-in și filete de proces

Racordurile push-in folosesc un mecanism de reținere a tubului și o etanșare internă, iar interfața filetată către valvă sau cilindru poate utiliza, în funcție de produs, filete paralele sau conice din familii metrice, G/BSPP, R/BSPT, NPT etc. Metoda de etanșare, lungimea de angrenare și cuplul de strângere se stabilesc din standardul filetului și din instrucțiunile producătorului racordului/componentului. Nu se aplică un cuplu generic și nici o regulă universală privind banda PTFE sau alegerea G versus NPT numai după regiunea geografică.

Materiale de etanșare și compatibilitate cu fluide

Materialul etanșării se selectează simultan după fluid, temperatură, presiune, viteză de alunecare, uzură și compatibilitate cu suprafețele. NBR, FKM, EPDM, PTFE, poliuretanul și HNBR sunt familii uzuale, dar performanța depinde de compoziția exactă a elastomerului și de aplicație. De aceea, intervalele de temperatură și compatibilitatea chimică nu se transferă automat între producători sau între compuși cu aceeași denumire generică; se verifică fișa materialului și catalogul etanșării (Tabelul 5.5) [90].

Tabelul 5.5. Familii uzuale de materiale și soluții de etanșare; compatibilitatea finală se verifică pentru compusul, fluidul și condițiile de lucru concrete.

Familie / soluție	Puncte forte orientative	Limitări de verificat	Utilizare reprezentativă
NBR	Compatibilitate bună cu multe uleiuri minerale; soluție frecventă pentru etanșări industriale	Temperatură, ozon, fluide agresive și compusul exact	Pneumatică și hidraulică cu fluide compatibile
FKM	Rezistență termică și chimică ridicată pentru numeroase fluide	Compatibilitatea cu mediul concret, temperatura joasă și costul	Procese termice/chimice și fluide compatibile
EPDM	Bună rezistență la apă, abur și unele fluide polare	În general nefavorabil pentru uleiuri/hidrocarburi minerale; se verifică formula exactă	Circuite cu fluide compatibile, aplicații de proces
PTFE	Frecare redusă și rezistență chimică foarte bună	Elasticitate redusă; geometria etanșării și elementele de energizare sunt critice	Inele de ghidare/back-up și etanșări speciale
PUR	Rezistență bună la abraziune și uzură în aplicații dinamice	Temperatura, hidroliza și fluidul pot limita utilizarea	Etanșări dinamice de tijă/piston
HNBR	Rezistență îmbunătățită față de NBR în anumite medii și temperaturi	Compatibilitatea depinde de formularea compusului	Aplicații cu cerințe extinse față de NBR
Metal–elastomer / bonded seal	Etanșare statică compactă pentru anumite racorduri și filete	Materialul elastomerului, geometria și standardul racordului	Interfețe statice unde producătorul prevede această soluție

5.3 Insule de valve și integrarea cu automatizarea

Pentru pneumatică modernă, poziționarea valvei și dimensionarea traseului sunt la fel de importante ca diametrul cilindrului: volumul mort și conductanța determină timpul real de cursă.

5.3.1 Conceptul de insula de valve

Insula de valve (engl. valve manifold sau valve terminal) este un ansamblu compact care reunește mai multe distribuitoare pneumatice într-o unitate cu alimentare comună și interfață electrică/ de comunicație către sistemul de control. Numărul de poziții, debitul pe canal și posibilitățile de extensie sunt dependente de familia de produs.

Avantajele unei insule de valve față de distribuitoarele individuale separate sunt:

- Cablaj electric redus: comunicația și alimentarea pot fi agregate la nivelul insulei, reducând numărul de conexiuni individuale față de o arhitectură cu valve dispersate. Topologia exactă depinde de interfața aleasă și de cerințele de alimentare.
- Alimentare pneumatică comună: colectorul insulei distribuie aerul către mai multe valve. Diametrul și numărul racordurilor de alimentare/evacuare se dimensionează din debitul simultan și datele producătorului.
- Diagnostic centralizată: fiecare valva poate raporta starea (comutata, nealimentata, eroare) prin magistrală.

- Modularitate constructivă: insulele sunt extensibile prin module ale aceleiași familii constructive. Pasul mecanic, tipul plăcii de bază, racordarea electrică și compatibilitatea dintre generații se verifică în catalogul producătorului.
- Tip pre-configurabil de furnizor: comenzile se livrează asamblate și testate, reducând timpul de punere în funcțiune.
- Costul total de proprietate poate fi mai mic decât în soluția cu distribuitoare individuale atunci când reducerea cablajului, a tubulaturii, a timpului de montaj și a intervențiilor de service compensează costul inițial al insulei. Comparația se face pentru configurația concretă, nu printr-un procent universal.

Insulele de valve sunt disponibile în trei variante constructive:

Insula tip stație unică. Toate valvele într-o singură cutie metalică, cu un singur racord de rețea. Soluția clasică, potrivită pentru concentrarea valvelor într-un singur loc al echipamentului (de exemplu, lângă PLC, în tabloul de comandă).

Insula extensibilă prin module: secțiunile se asamblează într-o arhitectură modulară, permițând configurarea numărului și tipului de valve în limitele familiei constructive. Lungimea maximă, compatibilitatea dintre module și extinderea ulterioară se verifică în documentația producătorului.

Insula de rețea (descentralizată). Mai multe insule mici, distribuite în spațiul echipamentului, conectate la PLC prin același cablu de magistrală (topologie liniară, daisy-chain sau în inel). Această variantă este detaliată în §5.3.2.

5.3.2 Arhitectura centralizată vs descentralizată

Cea mai importantă decizie de proiectare la nivel de subsistem pneumatic este alegerea între arhitectura centralizată (toate insulele în tabloul de comandă) și arhitectura descentralizată (insule mici plasate lângă actuatori) (Figura 5.8). Tabelul de mai jos sintetizează compromisurile.

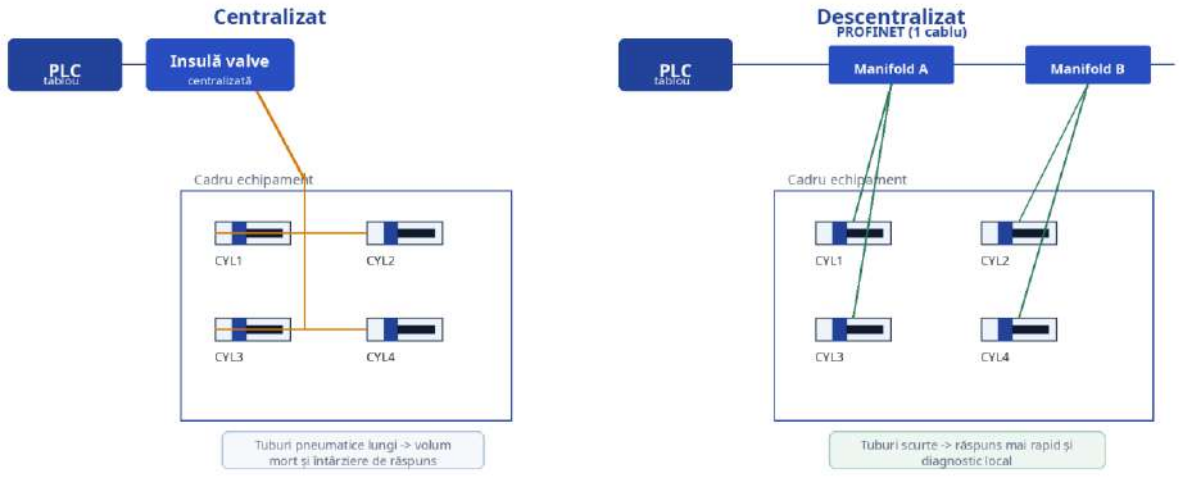


Figura 5.8. Comparație între arhitectura centralizată și descentralizată pentru un echipament cu 4 cilindri.

Compromisurile dintre cele două arhitecturi sunt sintetizate în Tabelul 5.6.

Tabelul 5.6. Compromisuri între arhitecturile centralizată și descentralizată pentru subsistemul pneumatic.

Criteriu	Centralizat	Descentralizat
Trasee pneumatice	Valvele sunt concentrate; traseele către actuatori pot fi mai lungi.	Valvele pot fi plasate mai aproape de actuatori, reducând lungimea traseelor locale.
Volum pneumatic și răspuns	Volumul aval poate crește timpul de umplere/evacuare; se verifică prin calcul și test.	Volumul aval poate fi redus, dar performanța depinde de valvă, tub, sarcină și presiune.
Cablaj și rețea	Cablajul este concentrat într-o zonă sau în tablou.	Alimentarea și comunicația sunt distribuite în câmp.
Protecție la mediu	Componentele pot beneficia de protecția tabloului/carcasei centrale.	Modulele locale trebuie selectate pentru mediul și gradul de protecție cerut.
Diagnostic	Diagnosticul este concentrat la insula centrală; localizarea pneumatică poate necesita urmărirea traseului.	Diagnosticul poate fi asociat mai direct zonei/insulei locale.
Montaj și service	Mai multă tubulatură între centru și actuatori; punct de service concentrat.	Mai puțină tubulatură locală, dar mai multe module/conexiuni distribuite.
Scalabilitate	Potrivită când actuatoarele sunt grupate și arhitectura rămâne compactă.	Potrivită când actuatoarele sunt dispersate sau mașină este modulară.
Criteriul de alegere	Se validează din debit, timp de răspuns, cablare, mediu și acces la mentenanță.	Se validează pe aceleași criterii; descentralizarea nu este automat superioară.

Nu există o distanță universală la care arhitectura descentralizată devine automat mai bună. Decizia se justifică prin volumul pneumatic dintre valvă și actuator, timpul de răspuns cerut, numărul de axe, costul cablării și tubulaturii, accesul la mentenanță și gradul IP necesar. Pentru axe rapide, reducerea volumului aval poate fi mai importantă decât economia de cablu.

5.3.3 Magistrale industriale: PROFINET, EtherCAT, IO-Link

Conectarea insulelor de valve și a I/O distribuit la PLC poate utiliza diferite rețele industriale. În această secțiune sunt ilustrate PROFINET, EtherCAT și IO-Link deoarece sunt relevante pentru arhitecturile discutate; selecția reală se aliniază standardului beneficiarului, ecosistemului de control și cerințelor de timp real, diagnostic și mentenanță (Figura 5.9).

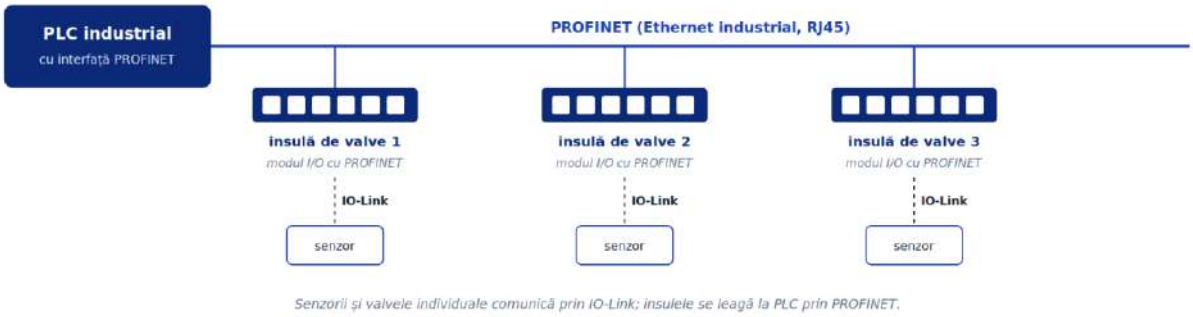


Figura 5.9. Topologie cu magistrală PROFINET la nivel superior și IO-Link în câmp pentru senzorii și valvele individuale.

PROFINET (Process Field Network)

PROFINET este o familie de comunicații Industrial Ethernet integrată în ecosistemul IEC 61158/IEC 61784 și acoperă aplicații de la I/O ciclic la funcții sincronizate, în funcție de profil și configurație [93], [94]. Pentru pneumatică, cerința de comunicație trebuie corelată cu dinamica end-to-end a valvei, traseului pneumatic și actuatorului; alegerea protocolului se aliniază arhitecturii generale a mașinii.

- PROFINET RT (Real Time): mecanism pentru schimb ciclic de date în aplicații de automatizare. Timpul de actualizare admis se stabilește din cerința aplicației și configurația rețelei, nu dintr-un interval numeric universal [94].
- PROFINET IRT (Isochronous Real Time): mecanism destinat aplicațiilor care necesită sincronizare temporală strictă, de exemplu anumite funcții de motion control. Performanța se validează pe configurația concretă [94].
- PROFINET cu mecanisme TSN (Time-Sensitive Networking): integrarea mecanismelor Ethernet time-sensitive în arhitecturile industriale, acolo unde profilurile și echipamentele utilizate le permit.

Avantajul practic al PROFINET este integrarea directă cu ecosistemele de automatizare care îl adoptă ca standard de fabrică. Pentru proiectantul mecanic, consecința este alegerea timpurie a poziției insulelor, a conectorilor și a rutelor de cablu; platforma concretă se stabilește împreună cu beneficiarul și echipa de automatizare.

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology)

EtherCAT este o tehnologie Industrial Ethernet standardizată în cadrul IEC 61158, caracterizată prin procesarea datelor „on-the-fly” și mecanisme de sincronizare prin Distributed Clocks [93], [95]. Pentru o insulă pneumatică, performanța rețelei nu trebuie confundată cu timpul real de comutare al valvei și de umplere a cilindrului.

În configurații adecvate, EtherCAT poate asigura timpi de ciclu foarte scurți și jitter redus. Valorile efective depind de controler, numărul și tipul nodurilor, topologie, dimensiunea datelor și configurația aplicației și trebuie verificate pentru sistemul concret. Topologia EtherCAT poate fi configurată în forme liniare, arborescente sau combinate, iar nodurile procesează datele adresate lor în timpul trecerii cadrului („on-the-fly”) [95]. EtherCAT procesează datele în tranzit și poate utiliza eficient cadrul Ethernet pentru schimbul ciclic. Pentru proiectantul echipamentului, criteriile relevante sunt timpul de ciclu, jitter-ul, numărul de noduri, topologia și compatibilitatea cu ecosistemul de control; comparațiile procentuale generale între protocoale nu sunt suficiente pentru selecție. Distributed Clocks poate susține

sincronizarea temporală precisă a dispozitivelor distribuite atunci când hardware-ul și configurația aplicației implementează mecanismul corespunzător [95].

EtherCAT este o opțiune relevantă atunci când aplicația cere I/O ciclic rapid, motion sincronizat sau sincronizare temporală precisă. Alegerea nu se face după un prag fix de număr de axe ori o valoare generică de latență, ci din cerințele dinamice ale mecanismului, ecosistemul clientului și performanța end-to-end demonstrată.

IO-Link

Standardizat prin IEC 61131-9:2022 sub denumirea SDCI, IO-Link este o interfață digitală punct-la-punct între master și senzori/actuatori, care extinde I/O clasic prin schimb bidirecțional de date, parametrizare, identificare și diagnostic [96]. Nu înlocuiește magistrala principală a mașinii, ci operează la nivelul dispozitivelor de câmp.

Funcționalitățile relevante ale IO-Link în contextul echipamentelor pneumatice includ:

- Identificare și parametrizare structurată a dispozitivului: masterul utilizează descrierea IODD și datele de identificare pentru integrare, configurare și înlocuire controlată.
- Diagnostic extins: în funcție de produs pot fi disponibile stări de canal, evenimente, contoare, valori de proces și informații de mentenanță.
- Parametrizare de la distanță: parametrii expuși de dispozitiv pot fi modificați prin master și software-ul de engineering, în limitele definite de producător și de proiect.
- Integrare în imaginea de proces: datele IO-Link sunt transferate prin master către PLC, însă configurarea IODD, a parametrilor și a diagnosticului rămâne parte a proiectului de automatizare.

O arhitectură frecventă combină Industrial Ethernet la nivelul controler–I/O distribuit cu IO-Link între master și dispozitivele de câmp. Avantajul este accesul la date de proces, identificare și diagnostic la nivelul dispozitivului, fără a presupune că această arhitectură este obligatorie pentru toate aplicațiile.

5.3.4 Diagnostic și mentenanță predictivă

Insulele de valve și dispozitivele de câmp moderne pot furniza diagnostic extins care susține detectarea anomaliilor și mentenanța bazată pe stare. Disponibilitatea datelor nu înseamnă însă că defectarea poate fi prezisă automat; valoarea diagnosticului depinde de variabilele disponibile, modelul de degradare și istoricul aplicației.

Funcții de diagnostic uzuale

La nivelul unei insule moderne, informațiile disponibile pot include starea alimentării, diagnosticul fiecărui canal, ciclurile de comutare, curentul bobinei și, în anumite familii, presiunea locală. Setul exact de variabile depinde de produs și de interfață de comunicație:

- Număr total de cicluri executate per valvă: permite raportarea uzurii la durata de viață declarată de producător și la istoricul aplicației; pragul de intervenție se stabilește pe familia concretă de valve și pe condițiile de lucru.
- Ore de funcționare cumulate: utile pentru corelarea intervențiilor cu timpul de exploatare și analiza tendințelor.
- Curentul de comandă al solenoidului: atunci când este disponibil ca diagnostic, variațiile sale pot contribui la identificarea unor anomalii electrice sau mecanice.
- Tensiune de alimentare: diagnostic al cablajului magistralei.

- Indicatorii vizuali (LED): codificarea culorilor și semnificația exactă sunt definite de producător și trebuie documentate în proiect.
- Senzorii de presiune integrați în unele produse pot susține monitorizarea locală a presiunii și diagnosticul pierderilor sau al alimentării insuficiente.

Strategia de mentenanță bazată pe stare

Datele colectate de la dispozitive pot fi utilizate de PLC, MES, historian sau o platformă de analiză pentru indicatori de stare și detectarea tendințelor. O funcție predictivă necesită însă date suficiente, un mecanism de degradare observabil, criterii de decizie și validare; simpla conectare a dispozitivului nu transformă automat mentenanța în una predictivă.

- Înlocuirea condiționată de stare: se definește un prag de avertizare din datele producătorului, istoricul de defectare și tendința indicatorilor măsurați, evitând folosirea unui procent generic din „durata de viață”.
- Optimizarea inventarului de piese de schimb: comenzi calibrate pe consumul real al echipamentului.
- Identificarea anomaliilor de proces: creșterea timpului de cursă sau modificarea profilului de presiune poate indica alimentare insuficientă, restricții, scurgeri, frecare crescută ori alte cauze. Diagnosticul se bazează pe corelarea mai multor semnale și pe un baseline al aplicației; o abatere temporală izolată nu identifică univoc cauza.
- Generarea de rapoarte tehnice automate pentru OEE (Overall Equipment Effectiveness) și KPI-urile de fabricație.

> **Pneumatică inteligentă și diagnostic**
>
> Datele utile pentru mentenanță sunt cele care pot fi legate de degradarea fizică: număr de cicluri, timp de cursă, presiune locală, curentul bobinei, scăderi anormale de presiune și frecvența alarmelor. Conectarea la IO-Link sau la o rețea industrială nu transformă automat aceste date în mentenanță predictivă; este necesară o bază de referință și o regulă/model de detecție a abaterilor.

> **În practică: poziționarea insulei este o decizie mecatronică**
>
> O insulă centrală simplifică protecția și mentenanța electrică, dar poate crește lungimea tuburilor. O insulă descentralizată reduce volumele pneumatice și poate îmbunătăți timpul de răspuns, dar cere protecție IP și acces local. Alegerea se face pe layout-ul real al mașinii și se verifică printr-un bilanț de timpi, spațiu și mentenabilitate.

5.4 Acționări pentru forțe mari: amplificator de presiune, multiplicator de presiune și soluții pneumohidraulice

Când o acționare pneumatică standard devine voluminoasă sau consumă prea mult aer pentru forța cerută, proiectantul poate evalua amplificatorul de presiune aer–aer, multiplicatorul de presiune aer–ulei sau o acționare pneumohidraulică. Aceste soluții folosesc principii diferite și nu permit utilizarea unui cilindru pneumatic standard la presiuni hidraulice [90].

5.4.1 Cele trei concepte care nu trebuie confundate

Amplificator de presiune aer–aer (booster): crește presiunea aerului pentru un consumator pneumatic, în limitele de presiune admise de consumator. Fluidul rămâne aer; debitul util scade și consumul energetic crește. Este potrivit pentru debite locale moderate și presiuni peste rețeaua uzuală, nu pentru a depăși presiunea nominală a unui cilindru.

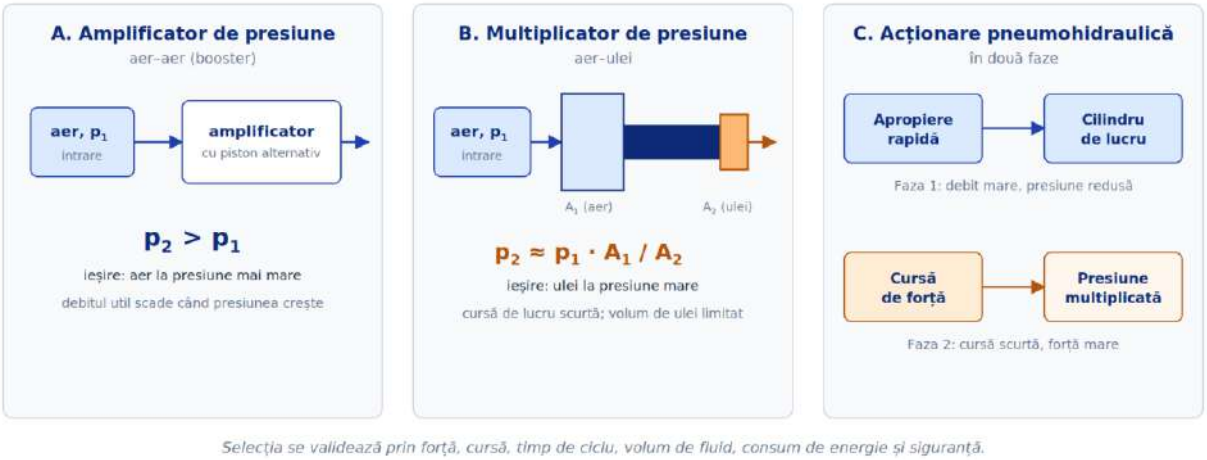


Figura 5.10. Diferențierea dintre amplificatorul de presiune aer–aer, multiplicatorul de presiune aer–ulei și acționarea pneumohidraulică. Fluidul de ieșire și volumul util de lucru sunt criterii esențiale de selecție.

Multiplicator de presiune aer–ulei: aerul acționează un piston de arie A_1, cuplat mecanic la un plunjer hidraulic de arie A_2 (Figura 5.10). În modelul ideal, $p_2/p_1 \approx A_1/A_2$; ieșirea este ulei la presiune mai mare, într-un circuit hidraulic dimensionat pentru acea presiune [90].

$$i = \frac{A_1}{A_2} = \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \tag{5.6}$$

Raportul de multiplicare este ales din cerința de presiune și din geometria dispozitivului. În practică există mai multe rapoarte nominale, iar valoarea efectivă depinde și de frecare, contrapresiuni și eficiența ansamblului. Creșterea raportului mărește presiunea disponibilă, dar reduce debitul și volumul util pe cursă; de aceea selecția se face simultan pe presiune, volum, timp de ciclu și presiunile maxime admise ale tuturor componentelor.

Acționare pneumohidraulică: combină o fază de apropiere rapidă cu debit mare și presiune redusă cu o cursă de lucru scurtă la presiune ridicată. Este utilă la presări și fixări unde forță mare este necesară numai pe ultimii milimetri ai cursei. Timpul de ciclu se calculează din volumele reale, conductanța circuitului pneumatic și debitul hidraulic disponibil; relația simplă $Q_2 = Q_1/i$ nu este suficientă pentru debitul de aer exprimat în condiții normale.

5.4.2 Principiul multiplicatorului de presiune aer–ulei și limitele de proiectare

Multiplicator de presiune cu o cursă de lucru: aerul deplasează pistonul primar, iar plunjerul hidraulic furnizează un volum finit de ulei la presiune ridicată. Se utilizează când volumul necesar pe cursă de lucru este cunoscut și redus.

În unele construcții cu o singură cursă de lucru, revenirea ansamblului poate fi realizată prin arc sau printr-o altă arhitectură prevăzută de producător. Avantajele, cursa hidraulică disponibilă și modul de

revenire sunt proprietăți ale produsului, nu caracteristici universale ale tuturor multiplicatoarelor de presiune.

Sistem cu apropiere rapidă și cursă de lucru: mișcarea liberă se execută cu debit mare la presiune redusă, iar amplificarea se activează numai după contactul cu piesa. Această arhitectură reduce timpul de ciclu și dimensiunea multiplicatorului.

Sistemele cu apropiere rapidă și cursă de lucru operează în două faze: deplasare cu debit mai mare și presiune redusă, urmată de faza de presare la presiune ridicată. Condiția de comutare poate fi definită prin presiune, poziție sau logica internă a unității, în funcție de produs. Timpul de ciclu și energia se verifică pentru arhitectura concretă.

Sisteme cu presiune/forță reglabilă: forța de proces poate fi ajustată prin reglarea presiunii de comandă sau prin configurația multiplicatorului, în limitele declarate de producător. Modificarea raportului geometric nu este, în general, o reglare continuă.

Unele familii oferă rapoarte de multiplicare sau configurații constructive diferite pentru adaptarea la forța și volumul cerut. Disponibilitatea acestor variante, posibilitatea schimbării raportului și costul sunt dependente de producător și nu se generalizează.

Unități pneumohidraulice integrate: cilindrul de lucru și multiplicatorul sunt proiectate ca un ansamblu unic. Avantajul este integrarea compactă; dezavantajul este dependența de o familie constructivă și necesitatea verificării volumului hidraulic disponibil, a cursei de forță și a energiei pe ciclu.

În unitățile pneumohidraulice integrate, cilindrul de lucru și multiplicatorul pot fi reunite într-un singur ansamblu. Avantajele sunt gabaritul redus, alimentarea pneumatică simplă și eliminarea unui HPU separat. Selecția se face după forța utilă, cursa de apropiere, cursa de forță, raportul de multiplicare, volumul hidraulic util, frecvența de ciclu și energia termică disipată; valorile nu se transferă între familii de produse fără verificarea catalogului.

5.4.3 Preselecția soluției și exemplu de dimensionare

Amplificatoarele și unitățile pneumohidraulice sunt candidate atunci când aplicația cere local o presiune/forță mai mare decât este convenabil să se obțină pneumatic direct, iar volumul și cursa de lucru permit multiplicarea presiunii (Tabelul 5.7). Selecția se face prin comparația dintre forță, cursă, volum util, timp de ciclu, consum energetic, gabarit, mentenanță și cost; nu există un domeniu universal de 5–50 kN sau o limită fixă de cursă [90].

Tabelul 5.7. Aplicații industriale uzuale ale amplificatoarelor de presiune în echipamentele de fabricație.

Situație de proiectare	Soluție de preselectat	Verificare critică
Consumator pneumatic care cere local o presiune mai mare, în limitele sale nominale	Amplificator de presiune aer–aer (booster)	Debit disponibil, consum de aer, presiune maximă admisă
Forță mare pe o cursă de lucru scurtă, fără HPU dedicat	Multiplicator de presiune aer–ulei + cilindru hidraulic	Raport A_1/A_2, volum de ulei, presiunea componentelor, timp de ciclu
Apropiere lungă și rapidă + cursă scurtă de presare	Unitate pneumohidraulică în două faze	Cursă de forță, energia pe ciclu, comutarea între faze

Situație de proiectare	Soluție de preselectat	Verificare critică
Forță mare pe cursă lungă sau debit ridicat repetitiv	Sistem hidraulic dedicat	Putere HPU, răcire, filtrare, acumulare
Poziționare programabilă și trasabilitate ridicată la forțe moderate/mari	Acționare electrică / servo-presă	Cuplu, inerție, șurub/reductor, frânare, cost energetic
Sarcină suspendată sau funcție de siguranță	Oricare dintre soluții + funcție dedicată de menținere	Energia stocată și comportamentul la pierderea alimentării

Exemplul rezolvat 5.3. Multiplicator de presiune aer–ulei pentru o fixare de 8 kN

Cerință: F_u = 8 kN; cursă de lucru hidraulică s = 25 mm; aer disponibil p_1 = 6 bar(g); spațiul nu permite un cilindru pneumatic Ø160. Se adoptă o soluție aer–ulei cu cilindru hidraulic dedicat Ø80 mm și se urmărește o presiune de lucru de aproximativ 24 bar.

Aria cilindrului Ø80 este $A \approx 5{,}03 \cdot 10^{-3}$ m^2. La p_2 = 24 bar, forța teoretică este $F_t \approx 12{,}1$ kN. Chiar dacă pentru predimensionare se consideră un coeficient global k = 0,85, rezultă $F_{u,est} \approx 10{,}3$ kN > 8 kN.

Raportul geometric ideal necesar este $i = p_2/p_1 \approx 4$. Se selectează un multiplicator de presiune aer–ulei cu raport nominal apropiat de 4:1, presiune admisă peste 24 bar și volum hidraulic util mai mare decât volumul cilindrului pe cursă de lucru: $V = A \cdot s \approx 0{,}126$ L. Se rezervă supliment pentru conducte, compresibilitate și ciclul de revenire.

Observație: cilindrul de lucru este hidraulic, dimensionat pentru ulei și pentru presiunea circuitului. Un cilindru pneumatic ISO 15552 din seria 1 000 kPa nu se transformă într-un cilindru hidraulic prin alimentarea la 16–24 bar.

În practică: când multiplicatorul de presiune este justificat

Soluția aer–ulei este atractivă atunci când forța mare este necesară numai pe o cursă scurtă și instalația dispune deja de aer comprimat. Pentru curse lungi, frecvență mare sau energie mecanică ridicată pe ciclu, un HPU dedicat sau o acționare electrică poate avea o arhitectură mai simplă și un cost de exploatare mai bun.

5.5 Hidraulica de putere: densitate mare de forță și controlul sarcinii

Hidraulica devine relevantă atunci când combinația dintre forță, densitate de putere, menținerea sarcinii și ciclul de lucru justifică un circuit cu fluid sub presiune. Nu există un prag universal de forță peste care hidraulica devine obligatorie; alegerea se face pe întregul profil de cerințe și cu aplicarea regulilor de proiectare și siguranță pentru sistemele hidraulice [79], [90].

Pentru proiectantul mecanic, hidraulică trebuie privită prin patru interfețe: forța și viteză actuatorului, rigiditatea circuitului, integrarea HPU-ului în mașină și managementul energiei/contaminării. Aceste elemente determină gabaritul, structura de rezistență, răcirea, accesul la mentenanță și comportamentul sigur la oprire.

5.5.1 Ce diferențiază hidraulică de pneumatică

Pneumatica, hidraulică și acționarea electrică sunt tehnologii complementare (Tabelul 5.8). Proiectarea robustă folosește fiecare tehnologie acolo unde avantajul ei este demonstrat prin calcule și prin integrarea în arhitectura mașinii.

Tabelul 5.8. Diferențe fundamentale între subsistemele pneumatic și hidraulic.

Caracteristică	Pneumatic	Hidraulic
Fluid	Aer comprimat	Ulei mineral / fluid hidraulic compatibil
Presiune uzuală în mașini	de ordinul câtorva bar; se verifică seria componentelor	de ordinul zecilor–sutelor de bar; se verifică presiunea nominală și de vârf
Compresibilitate	Ridicată; influențează rigiditatea și poziționarea	Mult mai redusă decât la aer, dar nu neglijabilă în servoaxe și conducte lungi
Forță / densitate de putere	Bună pentru mișcări rapide și forțe moderate	Foarte ridicată; avantajoasă la forțe și sarcini mari
Poziționare	În principal punct-la-punct; servopneumatica este o aplicație specială	Poate realiza control continuu cu traductor și valvă proporțională/servo
Circuit	De regulă evacuare în atmosferă	Poate fi circuit deschis cu rezervor/retur sau circuit închis, după aplicație
Calitatea fluidului	Filtrare și controlul apei/uleiului conform cerinței	Curățenia fluidului este critică pentru pompe și valve de precizie
Energia stocată	În volumele de aer comprimat	În fluidul presurizat și mai ales în acumulatoare
Mediu	Fără scurgeri de ulei, dar cu evacuare și zgomot	Risc de scurgere; pot fi necesare retenție, materiale și fluide speciale
Integrare mecanică	Cilindri compacți, tubulatură ușoară	HPU, conducte/furtunuri, răcire, rezervor și structură pentru reacții mai mari

Rigiditatea hidraulică poate fi estimată cu modulul volumic β al fluidului. Ca exemplu didactic, pentru β = 1,5 GPa și o creștere de presiune Δp = 10 MPa rezultă:

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta p}{\beta} = \frac{10}{1\,500} \approx 0{,}0067 \tag{5.7}$$

Un volum închis de 1 L s-ar comprima astfel cu aproximativ 6,7 mL; conectat la un piston de arie 0,01 m^2, efectul geometric echivalent este de ordinul 0,67 mm. Valoarea β depinde de fluid, temperatură, aerul dizolvat/entrained și presiune, deci exemplul nu reprezintă o constantă universală [90].

5.5.2 Unitatea de putere hidraulică (HPU) și integrarea ei în mașină

Hydraulic Power Unit-ul (HPU) furnizează debitul și presiunea necesare circuitului hidraulic. Poate fi dedicat unei mașini, unui grup de funcții sau integrat într-o instalație mai amplă, în funcție de arhitectura fabricii. Poziționarea și centralizarea se decid din pierderi de presiune, trasee, siguranță, zgomot, răcire, mentenanță și economie; nu se atribuie un raport universal de eficiență între HPU local și central [79], [90].

Figura 5.11 prezintă structura unei stații hidraulice (HPU), cu rezervorul, pompa, supapele, filtrele și instrumentația aferentă.

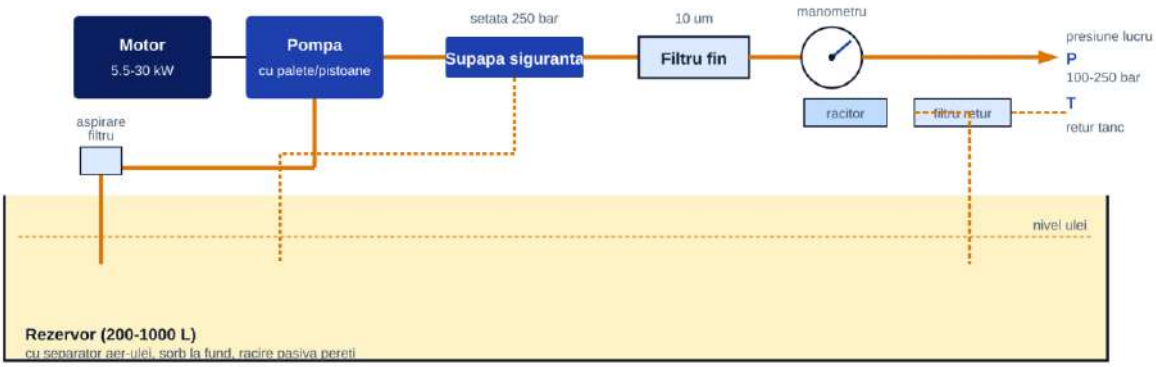


Figura 5.11. Stația hidraulică (HPU): rezervor, pompă, supape, filtre și instrumentație.

Componentele esențiale ale unui HPU sunt:

Rezervorul de ulei: asigură volumul de lucru, dezarearea, decantarea, compensarea variațiilor de nivel și contribuția la răcire. Reguli de tip „V = 3–5 × debitul pompei" sunt doar euristici de predimensionare. Volumul final se stabilește din ciclul mașinii, timpul de staționare necesar pentru dezareare, pierderile termice, volumul cilindrilor/conductelor și recomandările furnizorului HPU.

Pompa hidraulică: se selectează dintre familii constructive precum pompe cu roți dințate, palete sau pistoane, în funcție de presiune, debit, variabilitatea cilindreei, zgomot, eficiență, contaminare admisă și regim de lucru. Limitele de presiune și randamentul se preiau din seria concretă; nu se transferă valori maxime între tehnologii sau producători [90].

Motorul electric: se dimensionează din puterea hidraulică, randamentul total, ciclul de lucru și vârfurile de sarcină. Clasa de eficiență și metoda de comandă se stabilesc în acord cu cerințele electrice și cu strategia energetică a HPU-ului; nu există un interval de putere generic valabil pentru toate stațiile.

Supapa de limitare a presiunii (pressure relief valve) protejează circuitul împotriva depășirii presiunii admise. Presiunea de reglaj se stabilește din presiunea de lucru, presiunile maxime admise ale componentelor, dinamica circuitului și cerințele de siguranță; nu se adoptă un setpoint generic [79].

Filtrarea: se proiectează în funcție de sensibilitatea pompei, valvelor și actuatorului. Nivelul de contaminare cu particule solide se codifică prin ISO 4406:2021 [87]. Ținta de curățenie nu este universală: componentele cu toleranțe fine pot necesita un control mai sever al contaminării decât circuitele hidraulice convenționale.

Răcirea/managementul termic: temperatura fluidului trebuie menținută în domeniul în care vâscozitatea, materialele de etanșare, pompa și valvele funcționează conform specificației. Necesarul de răcire rezultă din bilanțul termic și din limitele fluidului/componentelor, nu dintr-un interval universal de temperatură [90].

Instrumentația: presiunea, temperatura, nivelul și alți parametri pot fi monitorizați prin semnale analogice, digitale sau interfețe inteligente, în funcție de senzor și arhitectura de control. IO-Link poate fi utilizat acolo unde instrumentația îl acceptă, dar nu este o cerință implicită pentru toate HPU-urile [96].

5.5.3 De la forță și viteză la cilindru, debit și putere

Dimensionarea hidraulică trebuie legată direct de cerința mecanică. Pentru un cilindru în extensie:

$$A_{\text{req}} = \frac{F_{\text{u}}}{p \cdot \eta_{\text{m}}} \tag{5.8}$$

unde η_m reprezintă efectele mecanice și hidraulice incluse în predimensionare. După alegerea alezajului se verifică debitul și puterea hidraulică instantanee:

$$Q = A \cdot v, \qquad P_{\text{h}} = p \cdot Q \tag{5.9}$$

Motorul pompei se dimensionează din relația:

$$P_{\text{motor}} = \frac{P_{\text{h}}}{\eta_{\text{total}}} \tag{5.10}$$

Dimensionarea se face împreună cu regimul de lucru și vârfurile de debit [79], [90].

Exemplu: se cere F_u = 40 kN la v = 0,08 m/s, cu presiune de proiectare 160 bar și η_m = 0,90. Rezultă $A_{req} \approx 2{,}78 \cdot 10^{-3}$ m² și $d_{req} \approx 59{,}5$ mm; se selectează preliminar Ø63 mm. Pentru Ø63, Q ≈ 15 L/min. Puterea hidraulică la 160 bar este aproximativ 4,0 kW; cu η_{total} = 0,82, necesarul mecanic la pompă este aproximativ 4,9 kW, ceea ce conduce preliminar la un motor de 5,5 kW, înaintea verificării ciclului și temperaturii.

Acest lanț de calcul este mai util proiectantului mecanic decât alegerea separată a pompei și cilindrului: orice modificare a vitezei schimbă debitul, orice modificare a presiunii schimbă forța și pierderile, iar aceste două mărimi determină puterea și încălzirea HPU-ului.

5.5.4 Cilindri hidraulici

Cilindrii hidraulici sunt similari conceptual cu cei pneumatici: un piston cu tijă se deplasează axial într-un cilindru, însă construcția este dimensionată pentru presiuni, reacțiuni și energii specifice sistemelor hidraulice, de regulă semnificativ mai mari decât în pneumatică.

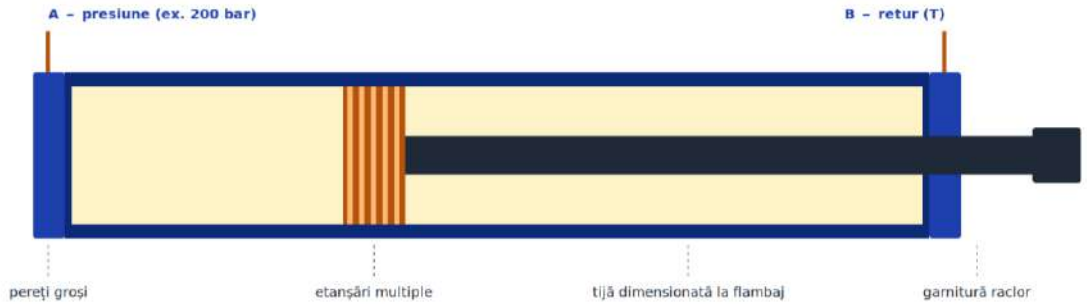


Figura 5.12. Cilindru hidraulic în secțiune longitudinală: pereți groși, etanșări multiple, tijă groasă.

Față de cilindrii pneumatici, cilindrii hidraulici au corp, capace, tije, ghidaje și etanșări dimensionate pentru presiuni și reacțiuni mai mari (Figura 5.12). Grosimea peretelui, diametrul tijei și numărul/tipul etanșărilor nu se stabilesc prin valori universale; se aleg din standardul dimensional aplicabil, presiunea nominală, presiunea de probă, material, flambaj, sarcini laterale și ciclul de viață. Pentru seriile standardizate sunt relevante, între altele, ISO 6020-2:2015 (16 MPa) și ISO 6022:2006 (25 MPa) [85], [86].

- Corpul și capacele cilindrului sunt dimensionate pentru presiunea nominală, presiunea de probă, material, geometria de montaj și ciclul de solicitare; grosimea peretelui nu se preia dintr-un interval generic.

- Tiranții axiali (engl.: tie rods), atunci când fac parte din construcția cilindrului, preiau reacțiile dintre capace și corp; alte familii folosesc corp sudat sau înșurubat. Tipul constructiv se selectează din standardul și catalogul seriei.
- Pachetul de etanșare al pistonului și tijei este ales în funcție de presiune, fluid, temperatură, viteză și contaminare. Numărul și materialul elementelor de etanșare diferă între serii și nu constituie o regulă dimensională universală.
- Diametrul tijei se verifică la compresiune/tracțiune, flambaj, sarcini laterale și rigiditate, în concordanță cu seria constructivă și montajul. Raportul dintre diametrul tijei și al pistonului este dependent de produs și de condițiile de încărcare.
- Pentru control continuu al poziției, cilindrul poate integra sau primi un traductor liniar, de exemplu magnetostrictiv. Rezoluția și precizia necesare se stabilesc din bucla de control și din cerința procesului, iar compatibilitatea mecanică și presiunea admisă se verifică în catalog.

Forța dezvoltată se calculează din aceeași relație F = p × A, dar cu valori radical diferite. Un cilindru hidraulic Ø50 la 200 bar dezvoltă:

$$F = 200 \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}05^2}{4} \approx 39{,}3\ \text{kN} \tag{5.11}$$

Pentru exemplul numeric de mai sus, același diametru de 50 mm la 6 bar în pneumatică dezvoltă teoretic aproximativ 1,18 kN, față de aproximativ 39,3 kN la 200 bar în exemplul hidraulic. Comparația ilustrează efectul presiunii asupra densității de forță; selecția tehnologiei rămâne dependentă de cursă, viteză, control, structură, energie și siguranță [90].

5.5.5 Valve proporționale și servovalve

Pentru aplicații în care comutarea binară ON/OFF nu este suficientă, circuitele hidraulice pot utiliza valve proporționale sau servovalve, la care debitul/poziția sertarului este comandată continuu printr-o interfață electrică sau digitală (Figura 5.13). Tipul semnalului, rezoluția și performanțele dinamice sunt dependente de produs și de electronica de comandă; nu se presupune implicit o interfață 4–20 mA/0–10 V sau o rezoluție micrometrică.

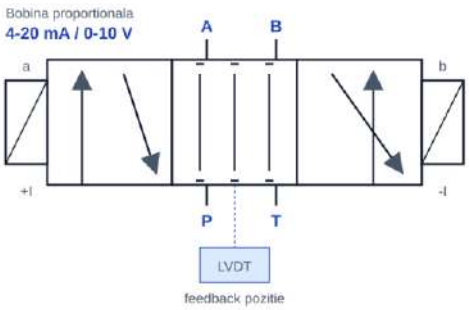


Figura 5.13. Simbolul ISO 1219 al unei servovalve 4/3 cu centru închis și feedback de poziție LVDT.

Valvele proporționale și servovalvele se compară prin debit nominal, cădere de presiune, histerezis, repetabilitate, bandă de frecvență și sensibilitate la contaminare. Valorile de precizie și bandă sunt dependente de produs și de condițiile de încercare; performanța unei axe nu se deduce numai din valvă, ci din valvă + cilindru + traductor + volum de ulei + structură + regulator.

Valvele proporționale și servovalvele acoperă domenii de performanță care se pot suprapune. Selecția se face din debit, presiune, dinamică, histerezis, repetabilitate, sensibilitate la contaminare, arhitectura buclei și costul total al sistemului; nu se utilizează un raport universal de cost și nici afirmația că una dintre familii este suficientă pentru „majoritatea” aplicațiilor [90].

5.5.6 Acumulatoare hidraulice și energia stocată

Acumulatorul hidraulic are două roluri tehnice principale în subsistemul hidraulic: stocarea energiei pentru consumuri intermitente cu vârf mare și absorbirea șocurilor de presiune (waterhammer) provocate de închiderile rapide de valve.

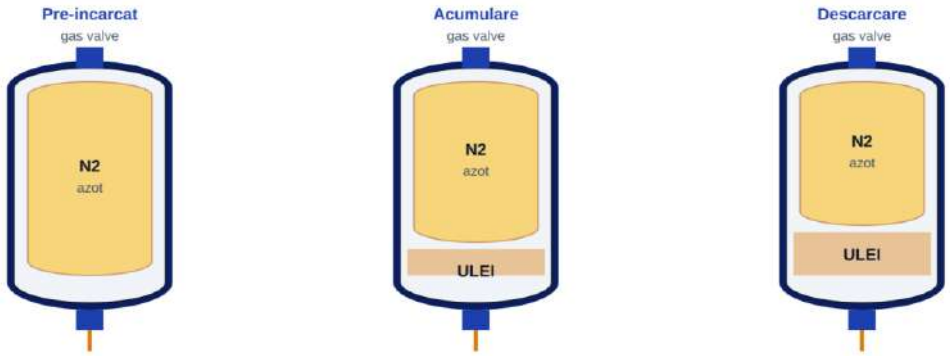


Figura 5.14. Acumulator hidraulic cu vezică de azot, trei stări de funcționare: preîncărcat, acumulare, descărcare.

Acumulatorul cu vezică utilizează, de regulă, azot preîncărcat, separat de fluidul hidraulic printr-o vezică elastică (Figura 5.14). Presiunea de preîncărcare, raportul de compresie și volumul necesar se dimensionează din ciclul de presiune/debit și din limitele producătorului; nu se adoptă universal o preîncărcare de 60–80 % sau un timp de răspuns fix [79], [90].

Două funcțiuni tipice pe care un acumulator le îndeplinește în echipamentele de fabricație:

- Compensare debit de vârf: acumulatorul poate furniza temporar debit suplimentar atunci când cererea tranzitorie depășește debitul disponibil al pompei. Volumul și presiunile se calculează din profilul real al actuatorului și din legea gazului adoptată pentru dimensionare.
- Absorbția șocurilor de presiune: un acumulator amplasat și dimensionat corespunzător poate reduce anumite suprapresiuni tranzitorii. Amplitudinea fenomenului depinde de viteza fluidului, lungimea și elasticitatea conductelor, timpul de comutare, fluid și impedanța circuitului; nu se presupune un multiplicator universal de 3–5× [79], [90].
- Menținere temporară a presiunii/energiei: acumulatorul poate alimenta circuitul pentru un interval limitat după oprirea pompei, dacă volumul, presiunile și pierderile permit. Durata se calculează pentru sarcina concretă și nu se exprimă printr-un număr generic de minute.

Riscuri și mentenanță hidraulică

Curățenia uleiului se urmărește printr-o țintă ISO 4406 adecvată componentelor cele mai sensibile; intervalele de schimb al filtrelor se stabilesc din indicatorii de colmatare, analiza uleiului și planul de mentenanță.
Scurgerile de ulei pot produce contaminare, risc de alunecare și, în funcție de fluid și proces, risc de incendiu; traseele și zonele de retenție se proiectează în consecință.
Acumulatorul hidraulic stochează energie semnificativă. O estimare de 1 kJ pentru 10 L la 100 bar este mult prea mică: mărimea caracteristică p·V este deja de ordinul 100 kJ. Energia recuperabilă se calculează din legea politropică a gazului pentru presiunile de preîncărcare, minimă și maximă.
Înainte de intervenții, energia hidraulică și pneumatică trebuie izolată și disipată printr-o procedură verificabilă; manometrul singur nu constituie dispozitiv de izolare.
Temperatură uleiului se monitorizează și se corelează cu vâscozitatea recomandată de producătorul pompei și al valvelor; dimensionarea răcirii pornește din bilanțul pierderilor, nu dintr-un prag universal.

În practică: hidraulică se justifică prin profilul de sarcină

În prese, mașini de formare și echipamente cu forțe mari, hidraulică poate oferi o densitate de forță și o menținere a sarcinii dificil de obținut într-un gabarit similar cu alte tehnologii. Performanța finală depinde însă de rigiditatea structurii, volumele de fluid, valve, senzori și control; alegerea nu se justifică doar prin valoarea forței maxime.

5.6 Alegerea tehnologiei de acționare: pneumatic, hidraulic sau electric

În faza de concept, tehnologia de acționare se selectează separat pentru fiecare funcție, din cerințe de forță, mișcare, control, energie, mediu și mentenanță. Pneumatica, hidraulica și acționarea electrică sunt soluții complementare. Pentru SAP de referință, presarea este realizată de axa Z electrică, iar cilindrii pneumatici CL1/CL2 execută fixarea; soluțiile de presare pneumatică, cu amplificator de presiune sau hidraulică discutate în acest capitol sunt variante didactice ALT–PNEU/ALT–HYD, nu descrieri ale axei principale SAP. Secțiunea compară principiile tehnice fără a substitui calculul și selecția pe catalog.

5.6.1 Matrice comparativă pentru faza de concept

Comparația din Tabelul 5.9 sintetizează dimensiunile-cheie de comparație dintre cele trei tehnologii, evaluate pentru aplicațiile uzuale în echipamente de fabricație.

Tabelul 5.9. Comparație sintetica a celor trei tehnologii principale de acționare în echipamente de fabricație.

Criteriu	Pneumatic	Hidraulic	Electric / servo
Forță și densitate de putere	Forțe mici–medii; gabaritul și consumul cresc rapid la forțe mari	Foarte bună la forțe mari și gabarit compact	Domeniu foarte larg prin șuruburi, reductoare și actuatoare electromecanice; nu există prag fix de forță
Viteză / dinamică	Foarte bună pentru mișcări punct-la-punct cu mase moderate	Bună la sarcini mari; dependentă de debit și valvă	Foarte bună; profil complet programabil

Criteriu	Pneumatic	Hidraulic	Electric / servo
Poziționare	În principal discretă; servo-pneumatică este specială	Continuă cu valvă proporțională/servo și traductor	Continuă, precisă, cu encoder
Rigiditate la sarcină	Redusă din cauza compresibilității	Ridicată, dar influențată de volume și compresibilitatea uleiului	Ridicată; depinde de transmisie și joc
Eficiență energetică	Sensibilă la producerea aerului și scurgeri	Dependentă de arhitectura HPU și regimul de sarcină	De regulă ridicată, mai ales la control direct și recuperare
Infrastructură	Necesită aer comprimat disponibil la mașină	Necesită HPU sau sursă hidraulică	Necesită alimentare electrică și drive
Mediu / contaminare	Fără ulei dacă sistemul este oil-free; evacuare și zgomot	Necesită controlul scurgerilor și fluidului	Fără fluid de proces; protecția IP și termică rămân relevante
Zone Ex	Poate reduce sursele electrice locale; componentele electrice rămase trebuie certificate	Poate fi adecvată cu proiectare specifică	Necesită echipamente conforme zonei Ex
Mentenabilitate	Simplă, dar scurgerile de aer sunt greu de observat	Mai exigentă: fluid, filtre, furtunuri, etanșări	Bună, cu diagnostic drive; transmisia mecanică rămâne critică
Când este candidatul natural	fixare, ejectare, opritoare, manipulare simplă	presare, formare, ridicare grea, menținere sub sarcină	poziționare, sincronizare, profil programabil, eficiență
Criteriul decisiv	simplitate + timp de ciclu	forță/putere în gabarit redus	controlabilitate și flexibilitate

5.6.2 Arbore de preselecție fără praguri artificiale

În faza de concept, preselecția trebuie să combine cerințele de mișcare, forță, energie și mediu. Arborele din Figura 5.15 evită un prag unic de forță: întâi separă aplicațiile care cer poziționare programabilă, apoi pe cele în care densitatea de forță și menținerea sarcinii sunt dominante, iar pentru mișcările punct-la-punct verifică disponibilitatea aerului și timpul de ciclu.

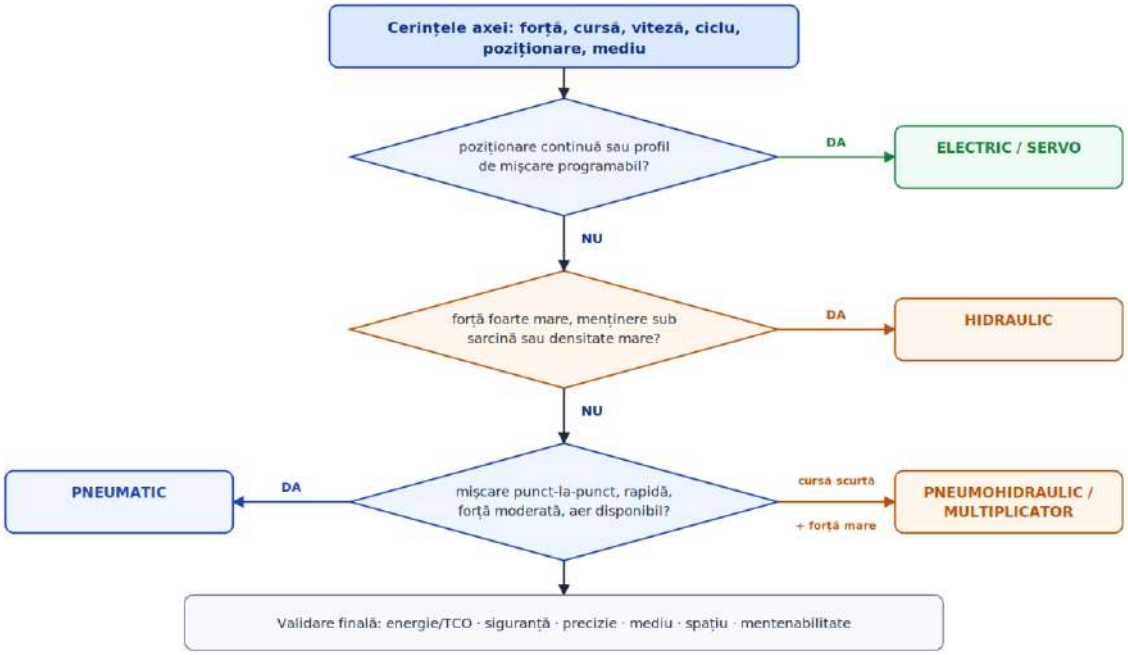


Figura 5.15. Arbore de preselecție a tehnologiei de acționare. Nu există un prag universal de forță; alegerea se validează prin energie, TCO, siguranță, precizie, mediu, spațiu și mentenabilitate.

Cele patru întrebări decisive, în ordinea aplicării:

Întrebarea 1. Este necesară poziționare continuă sau un profil de mișcare programabil? Dacă da, acționarea electrică/servo este de regulă primul candidat; hidraulică servo rămâne relevantă la forțe foarte mari.

Întrebarea 2. Forța mare, menținerea sub sarcină sau densitatea de putere domină proiectul? Dacă da, se evaluează hidraulică și, pentru curse de lucru scurte, o soluție pneumohidraulică.

Întrebarea 3. Mișcarea este punct-la-punct, rapidă, cu forță moderată și există aer comprimat la mașină? Pneumatica devine un candidat puternic, cu condiția verificării debitului și consumului.

Întrebarea 4. Ce restricții de mediu și siguranță există? Zonele curate penalizează riscul de scurgere al uleiului; zonele Ex impun verificarea tuturor componentelor electrice; zgomotul, temperatură și mentenabilitatea pot schimba alegerea inițială.

5.6.3 Domenii orientative de aplicabilitate în spațiul forță–viteză

Figura următoare trebuie citită ca hartă orientativă, nu ca diagramă cu frontiere normative. Domeniile tehnologiilor se suprapun larg; transmisia mecanică, raportul de reducere, răcirea, disponibilitatea infrastructurii și costul energetic pot deplasa substanțial limita unei soluții concrete.

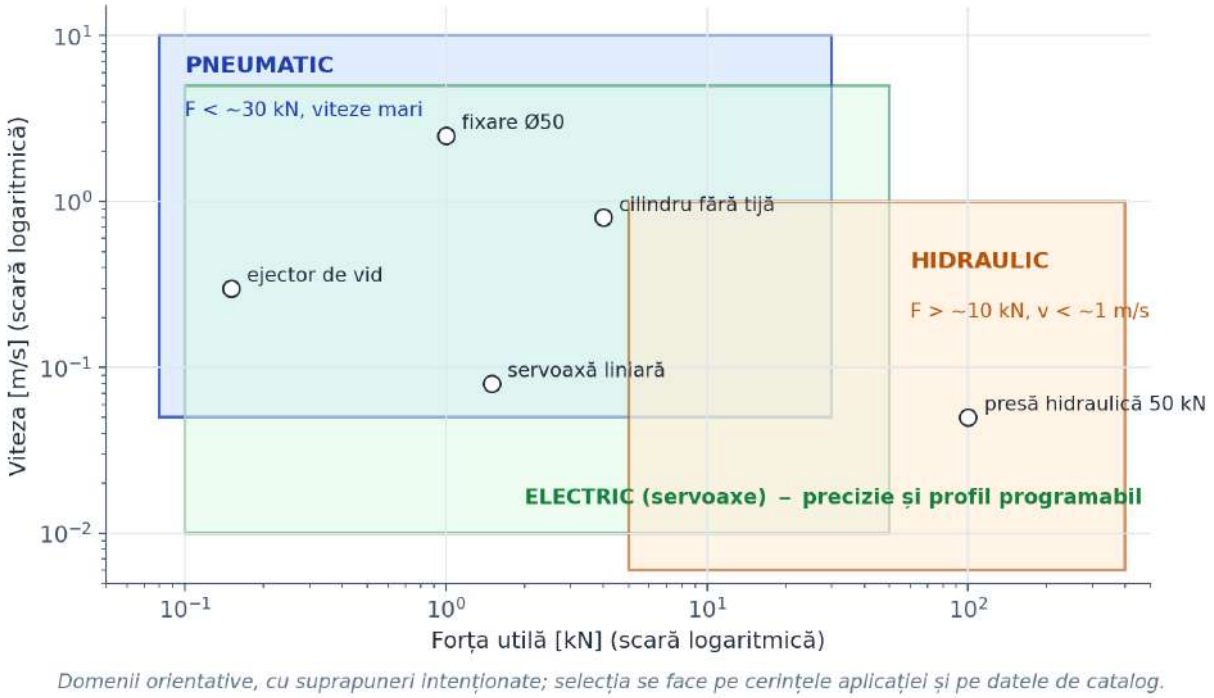


Figura 5.16. Domenii orientative ale acționărilor pneumatice, hidraulice și electrice în spațiul forță–viteză. Zonele sunt conceptuale și nu reprezintă limite de catalog sau praguri normative.

Diagrama evidențiază în primul rând suprapunerea tehnologiilor. Pneumatica este atractivă pentru mișcări rapide și simple, hidraulică pentru densitate mare de forță și menținerea sarcinii, iar electricul pentru controlabilitate și programabilitate (Figura 5.16). În zona de suprapunere, decizia se ia prin calcul și prin criterii de integrare, nu printr-un prag fix de forță.

5.6.4 Soluții hibride: combinarea tehnologiilor

În practica industrială, un echipament poate integra două sau trei tehnologii de acționare, fiecare alocată subfuncției pentru care satisface cel mai bine cerințele. Exemple reprezentative:

- Echipament cu axă principală servoelectrică și axe auxiliare pneumatice pentru fixare/ejectare: arhitectură posibilă atunci când precizia axei principale și simplitatea funcțiilor auxiliare justifică separarea tehnologiilor.
- Presă hidraulică cu transfer servoelectric: combinație în care hidraulica furnizează forța procesului, iar axele electrice asigură transportul și poziționarea programabilă.
- Echipament pneumatic cu amplificator de presiune pentru o funcție locală de presare: soluție de evaluat atunci când presiunea/forța suplimentară este necesară doar local și volumul/ciclul permit multiplicarea presiunii.
- Robot industrial electric cu unealtă pneumatică de prindere: combinație utilizabilă atunci când gripperul pneumatic satisface cerințele de sarcină, ciclu, siguranță și infrastructură.

Aceste exemple ilustrează un principiu de proiectare: tehnologia se alocă pe subfuncții, iar arhitectura finală se justifică prin performanță, integrare, siguranță, energie, mentenabilitate și cost pe ciclul de viață.

5.7 Metodologia integrată de proiectare și documentarea ISO 1219

Ultima secțiune a capitolului integrează cunoștințele dobândite (selecția tehnologiei, dimensionarea componentelor, alegerea distribuitoarelor și arhitectura sistemului) într-o metodologie unitară de proiectare a unui subsistem pneumatic sau hidraulic. Punctul-cheie al acestei integrări este reprezentarea grafică standardizată conform ISO 1219, care permite comunicarea fără ambiguitate între proiectant, beneficiar și echipa de service.

5.7.1 ISO 1219: simboluri și scheme pentru comunicarea proiectului

Pentru citirea și redactarea schemelor sunt relevante în special primele două părți ale familiei ISO 1219:

ISO 1219-1:2012+Amd.1:2016 specifică elementele și regulile pentru simbolurile grafice utilizate în sistemele fluidice [80]. Simbolurile descriu funcții și conexiuni, independent de marca comercială a componentei.

ISO 1219-2:2012 stabilește regulile principale pentru desenarea schemelor pneumatice și hidraulice utilizând simbolurile ISO 1219-1 [81]. ISO 1219-3:2016 completează familia cu reguli pentru module de simboluri și simboluri conectate [97]. O schemă lizibilă necesită, pe lângă simboluri, identificatori, precizarea stărilor și documentația proiectului.

Pentru exercițiile și schemele din această carte se utilizează convenția didactică de identificare de mai jos. Ea facilitează lectura schemelor, dar nu trebuie interpretată ca o regulă de codificare impusă de ISO 1219:

[Nr. circuit] [Tip component] [Nr. ordine în circuit]

Unde:

- Numărul circuitului: 0 pentru alimentare și condiționare (sursă, izolare, filtru, regulator), 1, 2, 3… pentru circuitele funcționale individuale.
- Tipul componentului: A pentru actuatori (cilindri, motoare), V pentru valve (distribuitoare, supape), Z pentru elemente auxiliare (filtre, răcitoare, manometre).
- Numărul de ordine: 1, 2, 3… în cadrul aceluiași circuit și tip de component.

Astfel, pentru un dispozitiv cu doi cilindri:

- 0Z1: sursa de aer (rețea sau compresor).
- 0V1: dispozitiv de izolare manuală a alimentării cu aer; schema nu demonstrează prin acest element o funcție de siguranță validată.
- 0Z2: filtru de aer din ansamblul de preparare; lubrifierea nu este implicit obligatorie.
- 0V2: regulator de presiune; manometrul asociat este reprezentat distinct.
- 1V1: distribuitor 5/2 al primului circuit.
- 1A1: cilindru DE al primului circuit.
- 2V1: distribuitor 5/2 al celui de-al doilea circuit.
- 2A1: cilindru DE al celui de-al doilea circuit.

5.7.2 Citirea unei scheme pneumatice de dispozitiv

Figura 5.17 ilustrează un circuit de principiu pentru două funcții de fixare CL1/CL2, cu cilindri pneumatici cu dublă acțiune și distribuitoare 5/2 monostabile. Pozițiile de repaus sunt cele indicate de arcuri; interblocările, stabilitatea fixării și reacția la pierderea aerului trebuie stabilite prin proiectarea efectivă și evaluarea riscului conform principiilor aplicabile sistemului pneumatic [78]. Presarea principală SAP rămâne electrică, pe axa Z.



Figura 5.17. Schemă pneumatică de principiu pentru fixarea CL1/CL2, cu simboluri funcționale conform convențiilor ISO 1219; nu este documentație de execuție.

Citirea schemei urmează un flux logic de la sursa la actuator:

- Aerul este preluat din sursa 0Z1 prin dispozitivul de izolare manuală 0V1. Pentru mentenanță, izolarea și eliminarea energiilor periculoase necesită o procedură verificată; simpla închidere a acestui element nu garantează evacuarea presiunii reziduale.
- Aerul trece prin filtrul 0Z2 și regulatorul 0V2; manometrul indică presiunea reglată. Este ilustrat un grup de filtrare–reglare (FR); un lubrificator se adaugă numai dacă este justificat de componente și aplicație.
- Magistrala de presiune alimentează în paralel cele două circuite. Presiunea de lucru se stabilește prin dimensionare; 6 bar poate fi utilizat numai ca ipoteză didactică, nu ca parametru SAP validat.
- Distribuitoarele 1V1 și 2V1, acționate electric prin comenzile de proces Y1 și Y2, direcționează aerul către cilindrii 1A1 și 2A1. Confirmările și interblocările funcționale se definesc separat.
- În absența comenzii electrice, arcul readuce distribuitorul 5/2 în poziția de repaus (nu există o poziție centrală). În ipoteza alimentării cu aer și a racordării ilustrate, poziția de repaus comandă retragerea cilindrului, iar acționarea electrică îi comandă extinderea; pierderea presiunii nu garantează retragerea sau menținerea fixării.
- Aerul din camerele evacuate este direcționat spre porturile de evacuare 3 și 5 ale distribuitoarelor. Eventualele amortizoare de zgomot, reglaje de debit și soluții de evacuare se selectează și se documentează în proiectul de detaliu.

5.7.3 Metodologia de proiectare integrată pentru inginerul mecanic

Asamblarea unui subsistem pneumatic sau hidraulic complet pentru un dispozitiv de fabricație urmează, în practica, șapte pași sistematici:

Pasul 1. Identificarea funcțiunilor

Listarea tuturor sub-funcțiilor de acționare ale echipamentului: fixări, ejectări, transferuri, opritoare, manipulatoare. Pentru fiecare, se documentează forța utilă cerută, cursă, viteză, frecvența de ciclu și condițiile de mediu.

Pasul 2. Selecția tehnologiei pentru fiecare funcțiune

Aplicarea arborelui de decizie din §5.6.2 individual pentru fiecare sub-funcție. Rezultatul este o listă hibrida: de exemplu 6 axe pneumatice, 1 axa hidraulică și 2 axe servoelectrice.

Pasul 3. Dimensionarea componentelor

Pentru fiecare axă se dimensionează actuatorul la presiunea minimă disponibilă, apoi se verifică debitul, timpul de cursă și montajul mecanic. Pentru pneumatică se verifică valva și traseul prin caracteristicile ISO 6358-1/catalog [83]. Pentru hidraulică se calculează debitul $Q = A \cdot v$ și puterea $P_h = p \cdot Q$. Standardele dimensionale (de exemplu ISO 15552 [50], ISO 6020-2 [85] sau ISO 6022 [86]) definesc interfețe, nu înlocuiesc calculul de rezistență și performanță.

Pasul 4. Calculul consumurilor

Estimarea debitului de aer cumulat (sau debitului de ulei la hidraulică) la cea mai severa cadența operațională. Acest calcul determină dimensiunile stației (compresor, HPU, rețea de distribuție) și justifică investiția centralizată.

Pasul 5. Arhitectura distribuției

Decizia centralizat vs descentralizat (§5.3.2). Pentru pneumatică: alegerea poziției insulelor de valve. Pentru hidraulică: poziționarea HPU, lungimea conductelor de presiune și retur, plasarea acumulatorilor.

Pasul 6. Schemă ISO 1219 și BOM

Desenarea schemei conforme ISO 1219-2, cu numerotare completă a componentelor. Generarea Bill of Materials (BOM) cu denumiri standardizate de catalog și cantități. Cross-check între schemă și BOM.

Pasul 7. Siguranță, energie stocată și conformitate

Se verifică cerințele ISO 4414 pentru pneumatică sau ISO 4413 pentru hidraulică, izolarea și disiparea energiei, comportamentul la pierderea alimentării, prevenirea mișcărilor neașteptate și accesul la mentenanță [78], [79]. Schema, BOM-ul și analiza de risc trebuie să descrie aceeași arhitectură fizică. Conformitatea mașinii se stabilește la nivel de ansamblu, nu prin simpla existență a marcajelor de pe componente.

Exemplul rezolvat 5.4. Sinteză de proiectare: dispozitiv de strângere cu trei cilindri pneumatici

Cerință: trei puncte de strângere dispuse la 120°, F_u = 4 kN/punct, cursă 30 mm, ciclu 12 s/piesă, presiune minimă garantată la cilindru 5,5 bar. Pentru predimensionarea acestei fixări se adoptă k_u = 0,75.

Dimensionare:

$$A_{\min} = \frac{4\,000}{5{,}5{\cdot}10^5{\cdot}0{,}75} \approx 9{,}70 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}^2, \qquad d_{\min} \approx 111\ \mathrm{mm} \tag{5.12}$$

Se selectează preliminar Ø125 mm ISO 15552. La 5,5 bar, $F_t \approx 6{,}75$ kN, iar $k_u \cdot F_t \approx 5{,}06$ kN > 4 kN.

Debit și timp de cursă: pentru fiecare cilindru se calculează volumul celor două camere și debitul normal pe profilul de mișcare. Deoarece cele trei cilindree pot porni simultan, valva/insula și conducta comună se dimensionează pentru vârful de debit, nu doar pentru consumul mediu pe ciclu.

Montaj: cilindrii nu trebuie să devină elemente de ghidare ale piesei; reacțiile laterale sunt preluate de dispozitivul mecanic. Se verifică accesul la senzori, reglajul amortizării, traseul tuburilor și posibilitatea izolării/depresurizării înainte de intervenții.

Documentație: schemă ISO 1219, lista de componente și modelul 3D trebuie să fie coerente. Selecția finală a cilindrilor și valvelor se face din datele de catalog privind forța, amortizarea, conductanța, presiunea admisă și durata de viață.

5.7.4 Aplicare pe SAP: fixarea pneumatică CL1/CL2

În configurația de referință SAP, acționarea pneumatică este rezervată celor două funcții de fixare CL1/CL2, iar presarea este realizată de axa electrică Z. Alegerea urmează logica din §5.6: fixarea cere mișcări discrete, cu forță moderată și fără control de poziție pe cursă, domeniu în care pneumatica este simplă și robustă; presarea cere forță controlată și monitorizarea curbei forță–cursă, ceea ce justifică acționarea electrică.

Aplicarea metodologiei din §5.7.3 pe funcțiile CL1/CL2 parcurge următorii pași:

- forța de fixare se deduce din reacțiunile transmise dispozitivului în timpul presării (Capitolul 3), cu un factor de siguranță față de deplasarea piesei;
- alezajul cilindrilor se alege din forța de fixare și din presiunea de lucru, care rămâne ipoteză de dimensionare până la confirmarea rețelei de aer a beneficiarului;
- distribuitoarele 5/2 monostabile din Figura 5.17 definesc poziția clemelor la pierderea comenzii, comportament care se analizează împreună cu evaluarea riscului din Capitolul 9;
- pozițiile de fixare sunt confirmate prin senzorii C1/C2 (Capitolul 6), iar pornirea presării este interblocată cu aceste confirmări;
- circuitul prevede izolarea și evacuarea controlată a energiei pneumatice pentru intervențiile de mentenanță.

5.8 Concepte cheie și întrebări de reflecție

5.8.1 Recapitulare: conceptele de bază

Capitolul 5 a urmărit acționările pneumatice și hidraulice din perspectiva proiectantului de echipament: de la cerința mecanică la diametrul actuatorului, debit, timp de cursă, montaj și interfața cu automatizarea, apoi la soluțiile pentru forțe mari și alegerea între pneumatic, hidraulic și electric.

Cele patru concluzii operative-cheie pe care studenții ar trebui să le rețină:

- Selecția tehnologiei este o decizie de sistem: forța singură nu este suficientă; se evaluează simultan cursă, viteză, poziționarea, energia, mediul, siguranța și mentenabilitatea.

- Standardizarea interfețelor (ISO 15552, ISO 6020-2/6022, ISO 1219) reduce riscul de integrare, dar nu garantează automat echivalența tuturor produselor sau performanțelor.
- Insulele de valve conectate prin rețele industriale și dispozitivele inteligente de câmp sunt o opțiune larg utilizată pentru reducerea cablării și extinderea diagnosticului. PROFINET, EtherCAT și IO-Link reprezintă exemple relevante, nu o arhitectură obligatorie; valoarea pentru mentenanță și Industry 4.0 depinde de datele efectiv disponibile și de integrarea lor în sistemul de control [93]–[96].
- Hidraulica, pneumatica și acționarea electrică sunt tehnologii complementare. Hidraulica este atractivă când densitatea de forță și menținerea sarcinii sunt dominante, pneumatica pentru anumite mișcări rapide și discrete, iar electricul pentru controlabilitate și programabilitate. O arhitectură hibridă este justificată numai dacă avantajele pe subfuncții depășesc costurile și complexitatea integrării.

În capitolul următor (Capitolul 6: Senzori și instrumentație) sunt prezentate componentele care închid bucla informațională a subsistemelor studiate aici, transformând mărimile fizice ale procesului în semnale pentru control, diagnostic și validare.

5.8.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipă. Răspunsurile sintetice apar după fiecare întrebare; pentru exersarea independentă, se recomandă parcurgerea întâi a întrebării fără consultarea răspunsului.

Q1. Ce criterii trebuie analizate înainte de alegerea între acționare pneumatică, hidraulică și electrică?

Forța nu este suficientă; trebuie evaluate simultan cursa, viteza, poziționarea, energia, mediul, siguranța, mentenabilitatea, spațiul și interfața cu automatizarea.

Q2. De ce forța teoretică a unui cilindru nu este egală cu forța utilă disponibilă în aplicație?

Pentru că selecția trebuie să țină cont de presiunea minimă disponibilă, frecări, contrapresiune, pierderi și marja de proiectare, precum și de geometria/montajul actuatorului.

Q3. Ce rol are ISO 1219 în proiectarea subsistemului fluidic?

Oferă convenții pentru reprezentarea simbolică și documentarea schemelor, astfel încât arhitectura, componentele și conexiunile să poată fi comunicate și verificate coerent împreună cu BOM-ul.

Q4. Cum se decide între o arhitectură pneumatică centralizată și una descentralizată?

Se evaluează lungimea traseelor, timpul de răspuns, cablarea, accesul la mentenanță, diagnosticul, spațiul și integrarea în rețeaua de control; nu există o soluție universală.

Q5. Ce trebuie verificat pentru energia fluidică stocată înainte de mentenanță sau în condiții de defect?

Trebuie definite izolarea și disiparea energiei, comportamentul la pierderea alimentării, prevenirea mișcărilor neașteptate și accesul sigur, în acord cu arhitectura fizică și analiza de risc.

5.9 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și

criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 5.1. Dimensionarea unui cilindru de fixare

Enunț. Un dispozitiv de fixare necesită o forță utilă $F_u = 3$ kN. Presiunea minimă garantată la cilindru este $p_{min} = 5$ bar, iar pentru predimensionare se adoptă $k_u = 0{,}75$. Determinați diametrul minim și alegeți alezajul din seria ISO 15552 (..., 80, 100, 125 mm).

Răspuns. $A_{min} = F_u / (p_{min} \cdot k_u) = 3000 / (5 \cdot 10^5 \cdot 0{,}75) = 8{,}0 \cdot 10^{-3}$ m^2, iar $d_{min} = \sqrt{(4A_{min}/\pi)} \approx 101$ mm. Alezajul Ø100 mm are $A \approx 7{,}85 \cdot 10^{-3}$ m$^2 < A_{min}$, deci este insuficient. Se alege Ø125 mm: $F_t = 5 \cdot 10^5 \cdot 12{,}27 \cdot 10^{-3} \approx 6{,}14$ kN și $k_u \cdot F_t \approx 4{,}60$ kN > 3 kN. Se verifică apoi timpul de cursă, debitul, amortizarea și reacțiunile în dispozitiv.

Problema 5.2. Consumul de aer al unui cilindru dublu efect

Enunț. Un cilindru Ø63 mm cu tija Ø20 mm și cursa 100 mm execută 10 cicluri complete pe minut la presiunea de 6 bar(g). Estimați consumul de aer liber, neglijând volumele moarte și tubulatura.

Răspuns. Volumul la extindere: $V_1 = \pi \cdot 0{,}063^2/4 \cdot 0{,}1 \approx 3{,}12 \cdot 10^{-4}$ m^3. Volumul la retragere: $V_2 = \pi \cdot (0{,}063^2 - 0{,}020^2)/4 \cdot 0{,}1 \approx 2{,}80 \cdot 10^{-4}$ m^3. Pe ciclu, $V = 5{,}92 \cdot 10^{-4}$ m^3 la presiunea absolută de aproximativ 7 bar. Raportat la aer liber: $5{,}92 \cdot 10^{-4} \cdot 7 / 1{,}013 \approx 4{,}1 \cdot 10^{-3}$ m^3 = 4,1 NL pe ciclu, deci aproximativ 41 NL/min la 10 cicluri/min. Valoarea reală este mai mare din cauza volumelor moarte, a tubulaturii și a pierderilor; pentru dimensionarea valvei contează debitul de vârf, nu media.

Problema 5.3. Predimensionarea unui agregat hidraulic

Enunț. Un cilindru hidraulic Ø50 mm trebuie să dezvolte 30 kN la extindere, cu viteza de 0,05 m/s. Se adoptă $\eta_m = 0{,}90$ pentru cilindru și $\eta_{total} = 0{,}80$ pentru grupul pompă–motor. Determinați presiunea de lucru, debitul, puterea hidraulică și puterea motorului electric.

Răspuns. $A = \pi \cdot 0{,}05^2/4 \approx 1{,}963 \cdot 10^{-3}$ m^2. $p = F / (A \cdot \eta_m) = 30\,000 / (1{,}963 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}90) \approx 17{,}0$ MPa = 170 bar. $Q = A \cdot v \approx 9{,}82 \cdot 10^{-5}$ m^3/s ≈ 5,9 L/min. $P_h = p \cdot Q \approx 17{,}0 \cdot 10^6 \cdot 9{,}82 \cdot 10^{-5} \approx 1{,}67$ kW. $P_{motor} = P_h / \eta_{total} \approx 2{,}1$ kW, deci se alege preliminar un motor de 2,2 kW. Se verifică presiunea nominală a componentelor, regimul termic și vârfurile de debit ale ciclului.

6 Senzori și instrumentație

Detecție, măsurare și viziune industrială

Despre acest capitol

Capitolele 3–5 au definit structura mecanică și acționările echipamentului. Capitolul de față tratează funcția de măsurare, mijlocul prin care mașina își verifică propria stare și calitatea operației, din perspectiva proiectantului care trebuie să o specifice și să o integreze în construcția mecanică.

Accentul nu cade pe fizica traductoarelor, ci pe transformarea unei cerințe mecanice (prezență, poziție, cursă, forță, cuplu, presiune sau parametru de proces) într-un lanț de măsurare complet: principiu de detecție, domeniu, rezoluție și incertitudine, montaj, protecție față de perturbații și interfață cu controlerul. Viziunea industrială și IO-Link sunt tratate ca subsisteme de măsurare cu cerințe proprii de integrare.

La final, cititorul trebuie să poată alege principiul de măsurare adecvat unei cerințe date, să verifice compatibilitatea dintre caracteristicile senzorului și toleranța de proces și să specifice montajul și interfața senzorului în ansamblul mașinii.

Standarde și referințe normative aplicabile

IEC 60947-5-2:2019, dispozitive și comutatoare de proximitate industriale.

IEC 60947-5-7:2024, dispozitive de proximitate cu ieșire analogică și/sau valoare digitală.

IEC 61131-9:2022, Single-drop digital communication interface (SDCI), baza standardizată IO-Link.

IEC 60751:2022, termorezistențe industriale din platină (PT100/PT1000).

IEC 61298-2:2026, evaluarea performanței instrumentației de proces în condiții de referință.

IEC 60529:1989+A1:1999+A2:2013, grade de protecție asigurate de carcase (cod IP).

ISO 13849-1:2023, proiectarea părților sistemelor de comandă cu rol de siguranță (SRP/CS).

ISO 376:2011, calibrarea instrumentelor de măsurare a forței utilizate la verificarea statică a mașinilor de încercare uniaxiale; se aplică atunci când această trasabilitate metrologică este relevantă.

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să transforme o cerință mecanică într-un lanț de măsurare complet, cu domeniu, rezoluție și incertitudine justificate;
- să aleagă senzorii pentru detecția discretă a prezenței și poziției, ținând cont de material, distanță și mediu;
- să selecteze traductoarele pentru poziție continuă, forță, cuplu, presiune și parametri de proces;
- să specifice un sistem de viziune industrială ca subsistem de măsurare;
- să integreze senzorii în arhitectura mașinii prin IO-Link și să întocmească bilanțul senzorial al unui echipament.

Cunoștințe prealabile

Se presupun cunoscute subsistemele mecanic, electric și pneumatic din Capitolele 3–5, precum și noțiunile de bază de electrotehnică și metrologie: mărime măsurată, eroare, incertitudine și calibrare.

Glosar de termeni și acronime

Acronimele și termenii tehnici utilizați pe parcursul capitolului sunt definiți la prima apariție și recapitulați în tabelul de mai jos pentru consultare rapidă.

Termen	Definiție
Sn	Distanța de acțiune nominală (Sensing distance): distanța la care un senzor de proximitate detectează țintă de referință în condiții standard.
PNP / NPN	Tipuri de ieșire tranzistorizată. PNP (sourcing) comută potențialul pozitiv către sarcină; NPN (sinking) comută către 0 V. Alegerea se face după arhitectura intrărilor I/O și convențiile proiectului, nu după o regulă geografică normativă.
NC / NO	Normally Closed / Normally Open, starea contactului senzorului în absența semnalului de detecție.
IP	engl.: Ingress Protection, cod IEC 60529 pentru protecția carcasei împotriva accesului, corpurilor străine și apei. Se selectează în funcție de mediul real; pentru spălare la presiune se verifică explicit gradul și standardul aplicabil.
IO-Link	Interfață digitală punct-la-punct standardizată prin IEC 61131-9 pentru senzori și actuatoare compatibile, cu schimb bidirecțional de date, parametri și diagnostic.
IODD	engl.: IO Device Description, set de fișiere asociat dispozitivului IO-Link, furnizat de producător, care descrie parametrii, datele de proces și diagnosticul; nu trebuie confundat cu memoria internă a senzorului.
FS / FSO	engl.: Full Scale / Full Scale Output, scala completă / ieșirea la capăt de scală. O specificație de tip ±0,1 % FS se raportează la domeniul nominal complet, nu la valoarea instantanee măsurată.
BGS	Background Suppression, capabilitate a senzorilor optici difuzi de a ignora reflexiile din spatele țintei.
LVDT	Linear Variable Differential Transformer, traductor inductiv liniar pentru deplasări de precizie.
GMR	Giant Magneto-Resistance, efect fizic utilizat în senzorii magnetici moderni de poziție pe cilindri.

Termen	Definiție
PLC	Programmable Logic Controller, calculatorul industrial al echipamentului care preia datele senzorilor.
EMC	Electromagnetic Compatibility, capabilitatea unui echipament de a funcționa corect în prezența perturbațiilor electromagnetice.
VFD	Variable Frequency Drive, convertizor de frecvență pentru motoare; sursă puternică de perturbații EMC.
ToF	Time-of-Flight, măsurare de distanța prin timpul de zbor al unui semnal (acustic, luminos, mecanic).
HMI	Human-Machine Interface, interfața om-mașină (panou tactil, ecran de operare).
MES	Manufacturing Execution System, software de coordonare a producției între nivelul ERP și controlul automat.
OEE	Overall Equipment Effectiveness, indicator de performanță globală (disponibilitate × performanță × calitate).
21 CFR Part 11	Reglementare FDA privind înregistrările electronice și semnăturile electronice; nu este un standard pentru tehnologia DataMatrix propriu-zisă.

Harta capitolului

Capitolul urmărește fluxul de proiectare al funcției de măsurare: definirea cerinței și a lanțului de măsurare (§6.1), detecția discretă (§6.2), măsurarea poziției continue (§6.3), măsurarea forței/cuplului/presiunii (§6.4), parametrii de proces (§6.5), viziunea industrială (§6.6) și integrarea senzorială, inclusiv IO-Link (§6.7). §6.8 încheie capitolul cu recapitularea conceptelor-cheie și întrebări de reflecție.

6.1 De la cerința mecanică la sistemul de măsurare

În proiectarea unui echipament, senzorul nu se alege pornind de la catalog, ci de la funcția tehnologică ce trebuie confirmată sau măsurată. Proiectantul definește mărimea fizică, domeniul și toleranța, viteza fenomenului, mediul, geometria de montaj și consecința unei măsurări greșite. Abia apoi se selectează principiul fizic, interfața și componenta. Această abordare leagă direct senzorica de proiectarea mecanică, de control și de validarea procesului [98], [99], [100].

6.1.1 Lanțul de măsurare și fluxul de proiectare

Orice funcție de măsurare are două perspective complementare. Prima este fluxul de proiectare: funcție tehnologică → mărime fizică → domeniu și toleranță → dinamică și mediu → principiu de detecție → montaj și interfață → validare. A doua este lanțul efectiv de măsurare: mărime fizică → element sensibil → condiționare → conversie/interfață → controler → decizie. Figura 6.1 le reunește, pentru a sublinia că performanța finală aparține sistemului complet, nu numai senzorului.

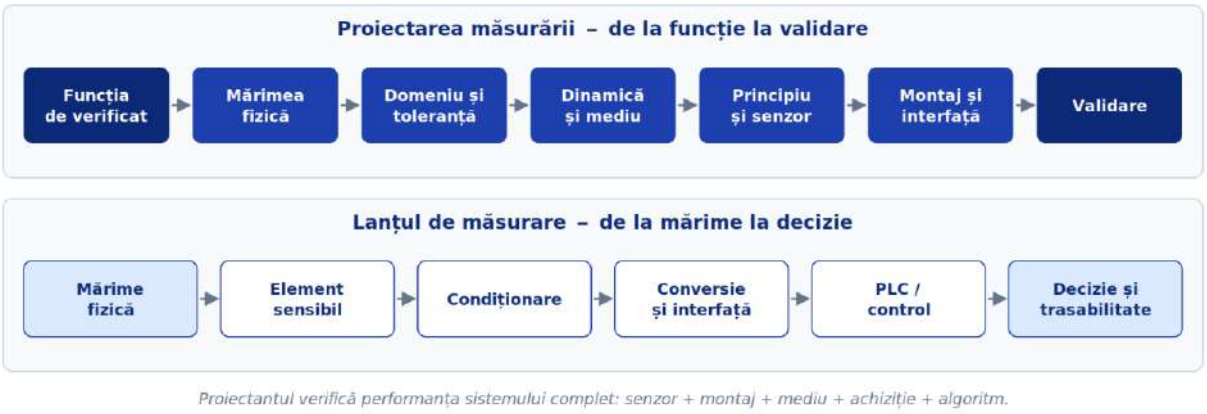


Figura 6.1. Fluxul de proiectare al funcției de măsurare și lanțul informațional de la mărimea fizică la decizia de control.

Cele cinci etape ale lanțului de măsurare au fiecare un rol funcțional precis și introduc surse specifice de eroare care contribuie la incertitudinea și eroarea totală a sistemului de măsurare:

Mărimea fizică măsurată (distanță, deplasare, forță, presiune, temperatură, debit sau vibrații) este fenomenul relevant pentru proces. Ea se caracterizează prin domeniu de variație, dinamică și condiții de mediu. Un domeniu ales necorespunzător poate reduce rezoluția utilă sau poate conduce la saturarea ori suprasolicitarea senzorului.

Senzorul (traductorul propriu-zis): elementul care convertește mărimea fizică într-un semnal electric sau digital utilizabil. Principiul fizic selectat determină compatibilitatea cu obiectul măsurat, sensibilitatea, dinamica și robustețea față de mediul aplicației.

Condiționarea semnalului: amplifică, filtrează, liniarizează și, unde este necesar, compensează semnalul senzorului. Pentru traductoarele analogice sunt frecvente interfețe precum 0–10 V sau 4–20 mA, iar în numeroase dispozitive moderne condiționarea și conversia sunt integrate în carcasa senzorului.

Conversia A/D (ADC): transformă semnalul analogic într-o reprezentare digitală. Rezoluția, rata de eșantionare, liniaritatea, zgomotul și filtrarea trebuie alese din banda și dinamica fenomenului măsurat; nu există o rată de eșantionare universală pentru o anumită clasă de senzori.

Controlerul / PLC: recepționează valoarea digitalizată, o interpretează în contextul programului de control și poate transmite date relevante către sisteme de trasabilitate, SCADA/MES sau servicii de analiză, conform arhitecturii proiectului.

O tendință importantă este integrarea elementului sensibil, condiționării și conversiei într-un dispozitiv cu interfață digitală, de exemplu IO-Link. Această abordare poate reduce lungimea și sensibilitatea lanțurilor analogice și poate adăuga identificare, parametrizare și diagnostic, dar nu elimină automat toate sursele de eroare sau toate cerințele de cablare [96], [101].

6.1.2 Taxonomia senzorilor industriali

Pentru orientare sistematică, senzorii industriali pot fi clasificați pe trei axe complementare: mărimea fizică măsurată, principiul fizic de funcționare și tipul interfeței electrice sau de comunicație (Figura 6.2).

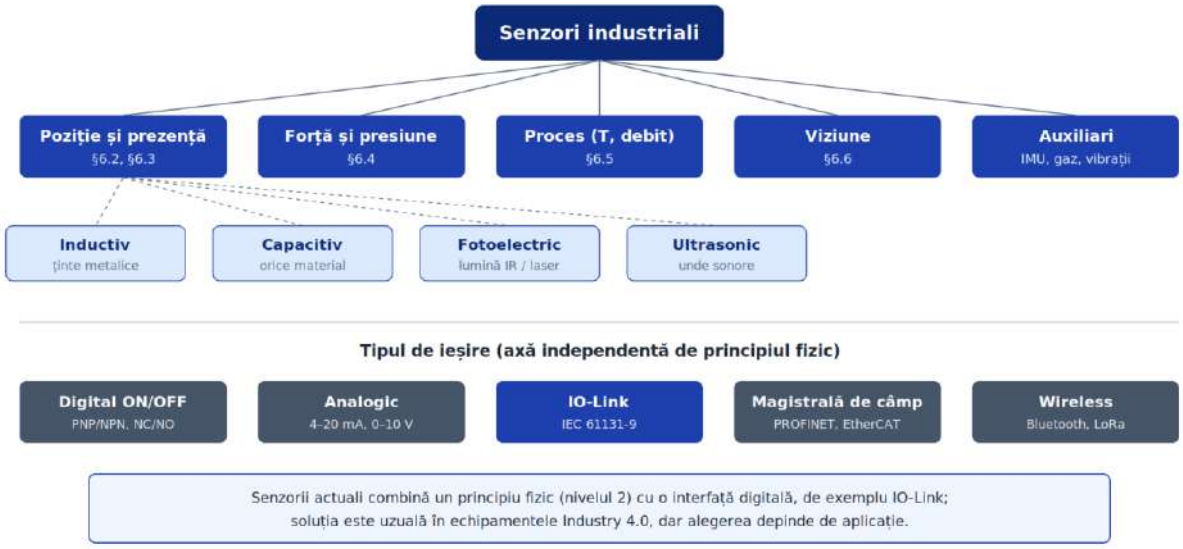


Figura 6.2. Taxonomia funcțională a senzorilor utilizați în echipamentele de fabricație.

Pe axa principală a mărimii măsurate, capitolul este structurat pe cinci familii relevante pentru echipamentele de fabricație:

- Senzori de poziție și prezență: detectarea poziției sau a prezenței pieselor, opritoarelor, actuatoarelor și capetelor de cursă (§6.2 și §6.3).
- Senzori de forță, presiune și cuplu: monitorizarea forțelor în operații de presare, asamblare, testare (§6.4).
- Senzori de proces: temperatura, debit, umiditate, vâscozitate (§6.5).
- Sisteme de viziune artificială: camere industriale, optică, iluminare și procesare de imagine pentru inspecția și ghidarea proceselor (§6.6).
- Senzori auxiliari (de exemplu IMU, gaz, vibrații sau acustici) utilizați selectiv în aplicații specifice.

Din perspectiva interfeței, se disting senzori cu ieșiri discrete sau analogice și senzori cu interfețe digitale/seriale, precum IO-Link ori alte tehnologii de comunicație. Alegerea se face după funcția de măsurare, diagnostic, cablare, integrare și cerințele ecosistemului de automatizare; IO-Link este o opțiune standardizată pentru dispozitive de câmp simple, nu o interfață obligatorie pentru orice senzor [96], [101].

6.1.3 Parametri statici și dinamici

Selecția inginerească a unui senzor se bazează pe parametri statici, care descriu performanța în regim staționar, și parametri dinamici, care descriu răspunsul la variații temporale ale mărimii măsurate.

Parametri statici

Exactitatea (engl.: accuracy): apropierea dintre rezultatul măsurării și valoarea de referință. În fișele tehnice, performanța este exprimată prin limite de eroare și prin contribuții precum neliniaritatea, histerezisul, deriva și influențele de mediu; acestea nu trebuie confundate cu rezoluția [98], [99], [100].

Repetabilitatea (engl.: repeatability): variația rezultatelor obținute prin măsurări repetate în aceleași condiții. Pentru controlul unui proces repetitiv poate fi mai importantă decât eroarea absolută, dar raportul dintre repetabilitate și exactitate nu este o constantă universală; se verifică în funcție de toleranța procesului și de metodă de calibrare.

Histerezisul: diferența dintre răspunsul obținut la creșterea și la descreșterea mărimii de intrare. Valoarea și modul de exprimare depind de tipul senzorului și trebuie preluate din fișa tehnică pentru condițiile relevante.

Liniaritatea: abaterea caracteristicii reale față de modelul de transfer ales, de regulă raportată la scala completă. Compensarea digitală poate reduce această contribuție, dar nu o elimină universal și nu corectează erorile provenite din montaj sau mediu.

Rezoluția: cea mai mică variație a mărimii care poate fi distinsă de lanțul de măsurare. La un sistem digital este influențată de cuantizare și de zgomot; la un semnal analogic nu există o treaptă de cuantizare înainte de ADC, însă rezoluția utilizabilă este limitată de zgomot, deriva și banda de măsurare.

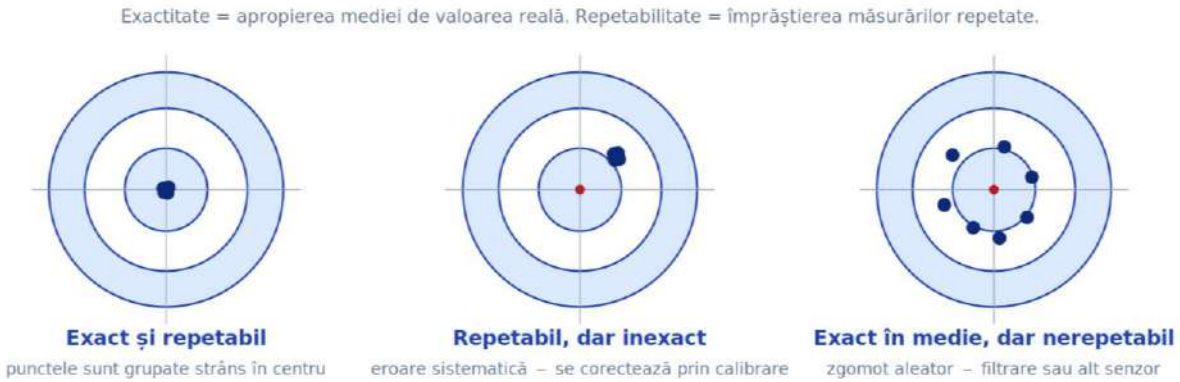


Figura 6.3. Diferența conceptuală dintre exactitate și repetabilitate în măsurări repetate.

Figura 6.3 evidențiază faptul că exactitatea și repetabilitatea descriu proprietăți diferite ale măsurării. O eroare sistematică poate fi uneori redusă prin calibrare, iar variabilitatea aleatoare poate fi redusă prin proiectarea lanțului de măsurare, filtrare sau alegerea unui senzor adecvat. Niciuna dintre cele două situații nu este în mod universal „preferabilă”; criteriul este dacă incertitudinea sistemului rămâne compatibilă cu toleranța procesului.

Parametri dinamici

Banda de frecvențe (frequency response): domeniul în care răspunsul senzorului satisface specificațiile declarate. Pentru fenomene dinamice, banda necesară se derivă din spectrul semnalului și din eroarea admisă, apoi se verifică în documentația dispozitivului.

Timpul de răspuns: intervalul dintre modificarea mărimii de intrare și atingerea răspunsului specificat. El trebuie corelat cu dinamica procesului și cu întregul lanț de achiziție; valorile variază considerabil între principii și produse.

Frecvența de comutare: pentru senzorii cu ieșire discretă, rata maximă de comutare declarată în condițiile de test ale producătorului. În aplicațiile rapide se verifică împreună cu timpul de răspuns, durata impulsurilor și perioada de scanare/comunicație.

Parametri de mediu

Spre deosebire de instrumentația de laborator, senzorii industriali funcționează în condiții ostile: temperatura variabilă, umiditate, lichide de prelucrare, perturbații electromagnetice de la motoare și VFD-uri, vibrații mecanice. Trei parametri caracterizează robustețea unui senzor în mediul industrial:

- Codul IP conform IEC 60529 se selectează din expunerea reală la praf, apă și acces. Nu există un grad IP minim universal pentru toate echipamentele de fabricație; pentru spălare la presiune, temperaturi ridicate sau cerințe sectoriale se verifică explicit standardul și produsul aplicabil [30].
- Compatibilitatea electromagnetică: montajul, ecranarea, împământarea, separarea traseelor și filtrarea se stabilesc din mediul EMC, tipul interfeței și cerințele echipamentului. Măsurile concrete se verifică prin proiectare și, după caz, prin testare.
- Domeniul de temperatură: se verifică pentru senzor, cablu, conector și elementele de montaj în condițiile reale ale aplicației. Variantele standard și extinse diferă între familii și producători, astfel încât limitele nu trebuie generalizate.

> **Criteriu de selecție pentru proiectantul mecanic**
> 1. Definește funcția: detectare, măsurare continuă, verificare proces sau diagnostic.
> 2. Derivă domeniul și toleranța din desenul piesei, cinematica mecanismului și fereastra procesului.
> 3. Verifică dinamica: viteză, timp de răspuns, frecvență de eșantionare și latență admisă.
> 4. Verifică mediul și montajul: materialul țintei, distanța reală, vibrații, temperatură, contaminare, IP și EMC.
> 5. Estimează bugetul de eroare al sistemului complet și păstrează o rezervă justificată față de toleranța procesului.
> 6. Alege interfața (ON/OFF, 4–20 mA, 0–10 V, SSI, IO-Link, Ethernet etc.) după dinamica și arhitectura de control.
> 7. Validează prin probă pe piesa reală și documentează criteriul de acceptare.

6.1.4 Bugetul de eroare al sistemului de măsurare

Fișa de catalog descrie numai o parte din eroarea totală. Într-o mașină reală se adaugă efectele montajului, toleranțele geometrice ale țintei, deriva termică, zgomotul, conversia A/D și variația procesului. Pentru o estimare preliminară, contribuțiile independente pot fi combinate prin rădăcina sumei pătratelor:

$$u_c \approx \sqrt{u_{\text{senzor}}^2 + u_{\text{montaj}}^2 + u_{\text{termic}}^2 + u_{\text{achiziție}}^2 + u_{\text{repetabilitate}}^2} \tag{6.1}$$

Relația nu înlocuiește o analiză metrologică formală, dar obligă proiectantul să verifice sistemul complet.

Exemplu: un traductor cu eroare de catalog ±0,02 mm montat pe un suport care se poate deplasa ±0,04 mm nu formează un sistem de ±0,02 mm. În proiectarea echipamentului, rigiditatea suportului, poziționarea țintei și stabilitatea termică pot domina performanța senzorului.

6.2 Detectarea prezenței și poziției discrete

Senzorii de proximitate sunt utilizați pentru confirmarea prezenței unei piese, a poziției unui opritor, a stării unui dispozitiv de fixare sau a capătului de cursă. Pentru proiectantul mecanic, criteriul decisiv este compatibilitatea dintre principiul de detecție și ținta reală: material, geometrie, distanță, orientare, toleranțe, contaminare și acces pentru reglaj sau înlocuire.

6.2.1 Privire de ansamblu și domenii de aplicabilitate

Cele patru familii principale de senzori de proximitate fără contact se diferențiază prin principiul fizic de detecție și, în consecință, prin tipul de țintă și condițiile de utilizare. Tabelul 6.1 sintetizează compromisurile principale; cerințele și metodele de încercare pentru mai multe dintre aceste familii sunt tratate în IEC 60947-5-2 [102].

Tabelul 6.1. Compararea familiilor principale de senzori de proximitate fără contact; valorile sunt orientative și se verifică pentru seria selectată.

Criteriu	Inductiv	Capacitiv	Fotoelectric	Ultrasonic
Ținta	Metale	Metale și nemetalice; sensibil la permitivitate	Obiecte detectabile optic; depinde de contrast/configurație	Majoritatea materialelor; depinde de geometrie și reflectivitate acustică
Distanță uzuală	mm–zeci de mm	mm–zeci de mm	cm–zeci de m	cm–câțiva m
Dinamică	Ridicată	Medie	Ridicată	Mai redusă
Sensibilitate la mediu	Foarte robust la murdărire uzuală	Sensibil la depuneri și umiditate	Sensibil la praf, reflexii și lumină parazită	Sensibil la temperatură, unghi și curenți de aer

Nu există o distribuție universală a tehnologiilor pe toate industriile. În echipamentele mecanice cu piese metalice, senzorii inductivi sunt frecvenți datorită robusteții și montajului compact; senzorii fotoelectrici devin preferabili la distanțe mai mari sau pentru ținte nemetalice. Selecția trebuie făcută pe aplicație, nu pe cote de piață.

6.2.2 Senzori inductivi

Senzorul inductiv utilizează un oscilator și un câmp electromagnetic alternativ la fața activă. Apropierea unei ținte metalice generează curenți turbionari și modifică starea oscilatorului; electronica internă transformă această modificare într-un semnal de comutare sau, la dispozitive adecvate, într-o valoare proporțională cu mărimea detectată [102], [103], [99].

Principiul de funcționare al senzorului inductiv de proximitate și un exemplu orientativ de factori de corecție sunt prezentate în Figura 6.4.

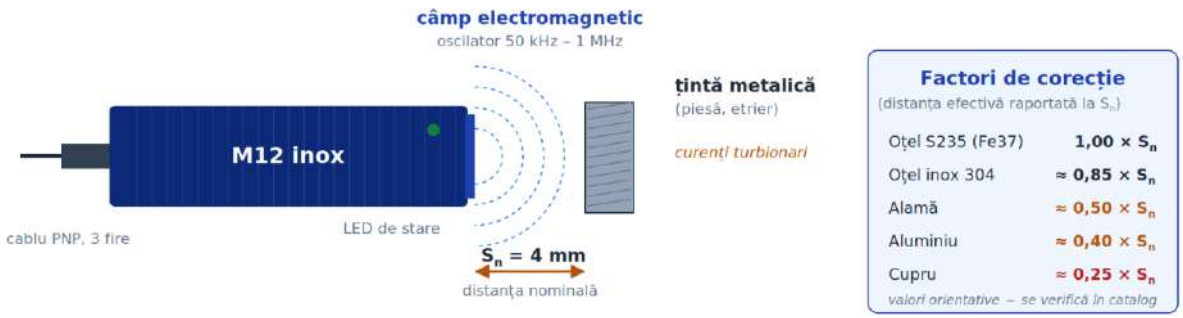


Figura 6.4. Senzor inductiv de proximitate: principiu de funcționare și exemplu orientativ de factori de corecție; valorile exacte se verifică în catalog.

Distanța de acțiune nominală (Sn)

Parametrul de bază este distanța nominală de acționare Sn, definită în condiții de încercare standardizate. Distanța utilizabilă pe mașină depinde de țintă, montaj, temperatură și toleranțele dispozitivului; valorile pentru materiale diferite se preiau din documentația seriei selectate [102].

Pentru alte metale decât ținta de referință, unele familii de senzori utilizează factori de corecție ai distanței de detecție, iar altele sunt proiectate ca variante cu factor apropiat de 1. Factorii din Figura 6.4 au rol ilustrativ și nu trebuie transferați între serii sau producători; distanța de lucru se verifică pe materialul și geometria reale ale țintei [102].

Forma constructivă și montaj

Senzorii inductivi sunt disponibili în două familii constructive principale:

- Senzorii cilindrici cu filet metric sunt disponibili în mai multe tipodimensiuni uzuale, inclusiv M8, M12, M18 și M30. Distanța nominală de acționare, lungimea carcasei și materialul carcasei sunt caracteristici de produs; alegerea tipodimensiunii rezultă din spațiul de montaj, ținta și distanța de lucru, nu dintr-o regulă universală [102].
- Senzorii paralelipipedici sunt utilizați atunci când geometria suportului sau a spațiului disponibil favorizează o carcasă rectangulară. Domeniul de detecție și condițiile de montaj se verifică în documentația dispozitivului [102].

Distincția tehnică importantă este între montajul flush („în nivel”, fața activă la nivelul piesei în care e montat) și non-flush (cu fața activă proeminentă):

Flush (shielded, încastrabil): Senzorul poate fi montat cu fața activă la același nivel cu piesa metalică în care este înșurubat (de ex. fixtura de prelucrare). Detectează doar în față, nu lateral. Permite economie de spațiu, dar are Sn redusă.

La variantele neîngropabile (non-flush/unshielded), zona liberă față de metal și distanța dintre senzori sunt specificate de producător. Nerespectarea acestor condiții poate modifica distanța de acționare sau poate produce interferențe; nu se aplică un multiplicator geometric unic tuturor seriilor [102].

Factori de selecție adiționali

Pe lângă distanța și tipul materialului, alți parametri importanți în alegerea unui senzor inductiv:

- Histerezisul este diferența dintre punctul de acționare și cel de revenire. Valoarea admisă și metoda de determinare sunt dependente de dispozitiv și de standardul aplicabil; pentru proiect se utilizează datele garantate ale seriei selectate [102].
- Frecvența de comutare se alege din timpul minim în care ținta traversează zona de detecție și din dinamica intrării de control. Limita este specifică produsului și condițiilor de încercare, de aceea nu se transferă generic între tipodimensiuni [102].
- Tipul ieșirii (PNP sau NPN) se alege după arhitectura intrărilor I/O și convențiile electrice ale proiectului. Nu este o proprietate care poate fi dedusă în mod sigur din regiunea geografică sau marca PLC-ului.
- Conectorul sau cablul fix se alege după cerințele de mentenanță, etanșare, mobilitate și compatibilitate cu infrastructura mașinii. M8/M12 sunt familii de conectori frecvente, dar pinout-ul, materialul cablului și gradul de protecție se verifică pentru dispozitivul concret.
- Gradul de protecție IP se selectează din mediul real și din modul de curățare; marcajele IP67/IP69 trebuie interpretate conform standardului aplicabil și documentației produsului [30].

Selecția finală între familii comerciale se face din distanța garantată, frecvența de comutare, materialul țintei, montaj, EMC, gradul de protecție, diagnostic și disponibilitatea pieselor de schimb. Durata de viață sau numărul de cicluri nu se presupun generic pentru o clasă de senzori.

> **Bune practici la senzori inductivi**
>
> - Pentru montaj în fixturi metalice de prelucrare, preferă variantele flush: economie de spațiu și protecție mecanică naturală.
> - Aplică întotdeauna factorul de corecție material: nu presupune „detecție metalică” ca un singur Sn pentru toate metalele.
> - Verifică zona liberă în jurul senzorilor non-flush. Doi senzori non-flush prea apropiați (sub 3 × Sn) interferează prin cuplaj magnetic.
> - La frecvențe mari de comutare, consideră VFD-urile și motoarele apropiate ca surse de perturbații. Cabluri ecranate, separare de cablurile de forță minimum 30 cm.

6.2.3 Senzori capacitivi

Senzorul capacitiv detectează variația capacității unui condensator format între fața activă a senzorului și obiectul țintă (sau între fața activă și masa locală dacă obiectul nu este conductor). Spre deosebire de senzorul inductiv care reacționează doar la metale, senzorul capacitiv este sensibil la orice material: metal, plastic, sticlă, lichid, granule, pudră, lemn (Figura 6.5). Această versatilitate îl face ideal pentru aplicații unde ținta nu este conductoare.

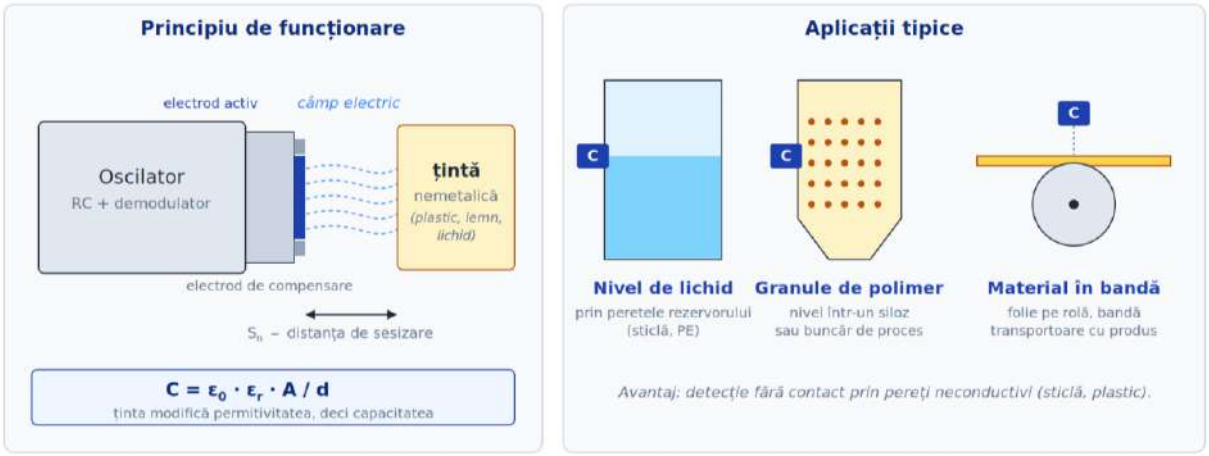


Figura 6.5. Senzor capacitiv: principiu de funcționare și aplicații tipice pentru materiale nemetalice.

Caracteristici tehnice

Variația capacității depinde de geometria câmpului electric, distanță și permitivitatea efectivă a țintei și a mediului. În consecință, distanța de acționare se schimbă cu materialul, grosimea, umiditatea și depunerile. Pentru proiectare se folosește curba sau factorul de corecție din catalogul seriei selectate și se confirmă prin teach-in pe piesa reală.

- Distanța de detecție a unui senzor capacitiv depinde puternic de permitivitatea, geometria și grosimea țintei, precum și de mediul din jur. Materialele cu permitivitate relativă mai mare pot produce un răspuns mai puternic, dar raportul dintre distanțele de detecție nu este universal și se verifică pe produs și pe ținta reală [102], [99].

- Senzorii capacitivi moderni au, de regulă, reglaj de prag: un potențiometru sau un buton de teach-in care permite ajustarea sensibilității pentru materialul specific aplicației.
- Domeniul util al senzorilor capacitivi este specific seriei și aplicației. Pentru distanțe mai mari sau ținte cu proprietăți instabile se compară și alte principii de detecție, în locul adoptării unui prag universal de distanță [102].

Aplicații tipice

Domeniul natural al senzorilor capacitivi acoperă aplicații unde senzorii inductivi nu sunt utilizabili (Ținte non-metalice) și unde fotoelectricele nu sunt practice (medii cu praf, lichide):

- Detecția nivelului de granule sau pulberi în buncăre și silozuri (industria alimentară, farmaceutică, polimeri).
- În aplicații farmaceutice sau de ambalare, senzorii capacitivi pot fi utilizați pentru detectarea produselor nemetalice prin pereți sau ambalaje, dacă materialele, igienizarea și cerințele de mediu sunt compatibile cu dispozitivul selectat.
- Detecția etichetelor transparente pe ambalaje, invizibile pentru senzori fotoelectrici clasici.
- Măsurarea nivelului de lichid în rezervoare non-metalice (tancuri inox cu pereți groși, vase de plastic).
- Detecția prezenței pieselor de plastic sau cauciuc în fixtura de asamblare.

Limitarea principală a senzorilor capacitivi este sensibilitatea la depuneri pe fața activă (picături de apă, ulei, praf) care pot genera detecții false. Aplicațiile în medii curate sau cu fața senzorului orientată în jos (gravitație ajută la auto-curățare) sunt preferate.

6.2.4 Senzori fotoelectrici

Senzorii fotoelectrici utilizează o sursă optică și un receptor pentru a detecta modificarea fasciculului sau a luminii reflectate. Domeniul util poate fi mult mai mare decât la senzorii inductivi/capacitivi, dar depinde de configurația through-beam, retroreflexivă sau difuză, de optică, țintă și mediu [102], [99].

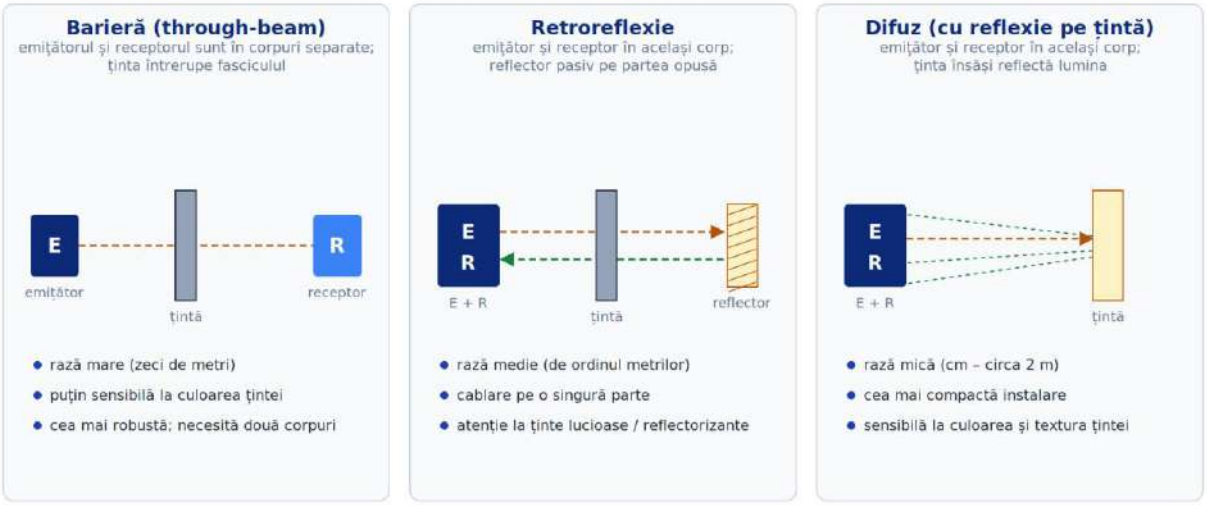


Figura 6.6. Configurații uzuale ale senzorilor fotoelectrici de proces: barieră, retroreflexie și difuz.

Cele trei configurații uzuale prezentate în figura 6.6 acoperă majoritatea aplicațiilor industriale, cu compromisuri specifice între cost de instalare, fiabilitate și distanța:

Barieră fotoelectrică de proces (through-beam): emițător și receptor separați, montați față în față. Este foarte robustă pentru detectarea obiectelor deoarece măsurarea se bazează pe întreruperea fasciculului. Nu trebuie confundată cu o perdea/barieră electro-sensibilă de protecție a operatorului, care este un dispozitiv de siguranță certificat și se tratează în arhitectura SRP/CS.

Retroreflexia utilizează emițătorul și receptorul în aceeași carcasă și un reflector pe partea opusă. Avantajul principal este cablarea pe o singură parte; distanța maximă și comportamentul față de obiecte lucioase/transparente se verifică în catalogul seriei selectate [102].

Configurația difuză utilizează reflexia directă de pe obiect și, prin urmare, este influențată de culoare, textură, unghi și distanță. Variantele cu suprimarea fundalului (BGS) reduc influența reflexiilor din spatele țintei, dar domeniul și eroarea sunt specifice produsului [102].

Iluminare și Ținte dificile

Selecția sursei optice (lumină vizibilă, infraroșu sau laser) se face după geometria spotului, materialul țintei, distanță, siguranța optică și condițiile de iluminare ambientală.

- Lumina IR: penetrare bună prin praf și abur, alegerea standard pentru medii industriale.
- Lumina roșie vizibilă: utilitatea alinierii (operatorul vede unde „țintește” senzorul).
- Laser punctiform: pentru obiecte mici sau pentru detectarea precisă a poziției unei muchii.
- Lumina UV (mai rară): pentru detecția substanțelor fluorescente, utile în liniile farma cu marcaje invizibile.

Țintele dificile cer atenție specială. Suprafețele lucioase metalice oglindesc fasciculul și pot produce detecții false (la senzorii difuzi) sau ratări (la barierele în care reflexia parazită pe alt obiect saturează receptorul). Suprafețele negre absorb lumina și reduc drastic distanța efectivă. Țintele transparente (sticlă, folie) sunt practic invizibile pentru senzorii difuzi obișnuiți; soluția este senzor cu polarizator în retro-reflexie sau barieră dedicată pentru sticlă.

6.2.5 Senzori ultrasonici

Senzorul ultrasonic emite un impuls acustic și măsoară timpul de zbor (Time-of-Flight, ToF) până la recepționarea ecoului reflectat de obiect. Frecvența de lucru și algoritmul de evaluare sunt caracteristici de produs [102], [99].

$$d = \frac{v_{\text{sunet}} \cdot t_{\text{zbor}}}{2} \tag{6.2}$$

În aer uscat, viteza sunetului este de aproximativ 343 m/s la 20 °C și variază cu temperatura și compoziția mediului. De aceea, compensarea și condițiile de mediu trebuie luate în calcul în măsurarea ToF; domeniul util de măsurare este specific senzorului [99].

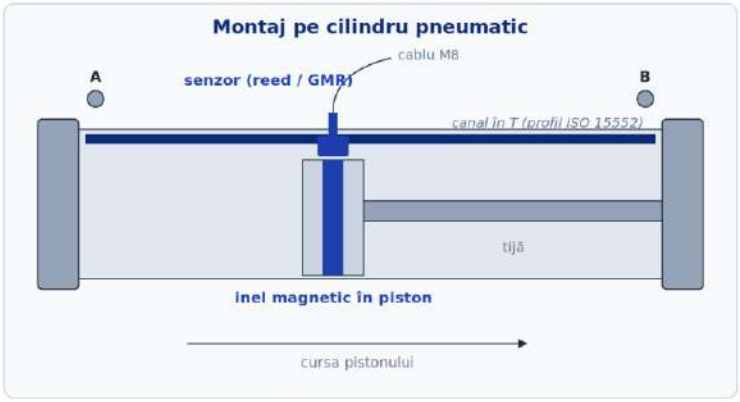
Avantajul major al senzorilor ultrasonici este dependența redusă de culoarea și transparența optică a țintei. Totuși, geometria, unghiul de incidență, materialele fonoabsorbante, temperatura și curenții de aer pot modifica amplitudinea ecoului și domeniul util de măsurare.

- Măsurarea nivelului de lichide în rezervoare, independent de culoarea și transparența lichidului; unele serii au compensare automată de temperatură.
- Detectarea benzilor de folie sau hârtie pe liniile de ambalare (industria FMCG, ambalaje farma).
- Detecția granulelor sau pudrelor în extrudere (KraussMaffei): când fereastra senzorului se contaminează, ultrasonicul rămâne funcțional.
- Măsurări de distanța peste 1 m în aplicații unde laser-ul nu este economic (cabane, depozite).

Limitările principale includ zona moartă din apropierea feței active, timpul de răspuns, sensibilitatea la temperatură și curenți de aer, geometria țintei și interferența dintre senzori apropiați. Toate aceste limite se verifică din fișa tehnică și prin probă în aplicația reală [102].

6.2.6 Senzori magnetici pe cilindri

În subsistemele pneumatice și în alte actuatoare prevăzute cu magnet pe piston, senzorii magnetici montați în canalele corpului permit confirmarea poziției fără contact mecanic cu pistonul (Figura 6.7). Numărul și poziția senzorilor se stabilesc din secvența de control și din cerințele de diagnostic; nu există regula că orice cilindru ISO 15552 trebuie echipat cu exact doi senzori.



Reed sau magnetorezistiv (GMR)

	Reed	GMR
Principiu	contact mecanic	magnetorezistiv
Contacte	cu vibrații (bounce)	fără vibrații
Uzură	contact mecanic	fără uzură mecanică
Câmp necesar	mai mare	redus
Ieșire	contact, 2 fire	PNP/NPN, 3 fire
Utilizare	aplicații simple	cicluri rapide

Parametrii exacți se preiau din fișa tehnică a senzorului.

Figura 6.7. Senzor magnetic montat pe cilindru pneumatic pentru detectarea poziției pistonului.

Principiul și tipurile constructive

Pistonul cilindrului are încorporat un magnet permanent inelar. Când pistonul ajunge în dreptul senzorului (montat în canalul T al corpului exterior), câmpul magnetic acționează un element sensibil din interiorul senzorului care comută ieșirea. Două tehnologii constructive sunt uzuale:

Reed switch: soluție cu contact mecanic etanșat, simplă și cu consum redus în stare pasivă. Durata de viață, frecvența de comutare, bouncing-ul și sensibilitatea la vibrații depind de model și de sarcina electrică; valorile se verifică în documentația produsului.

Senzorii magnetorezistivi (de exemplu GMR/AMR, în funcție de produs) sunt soluții fără contact mecanic, cu comutare electronică și posibilități extinse de diagnostic. Precizia punctului de comutare și imunitatea la câmpuri externe sunt caracteristici de produs și nu se generalizează printr-o singură valoare.

Configurație tipică și montaj

Configurația standard pe un cilindru cu dublă acțiune (doi senzori magnetici plasați la cele două capete de cursă) confirmă succesul fiecărei comutări de direcție a cilindrului. Montajul este foarte simplu: senzorul alunecă în canalul T al corpului cilindrului, este poziționat la capătul cursei dorite cu ajutorul unei chei hexagonale și se fixează printr-un singur șurub de bloca.

Aplicație tipică în PLC: senzorii cap retras (a) și cap extins (b) sunt citiți ca intrări digitale standard. Logica de control verifică:

- La activarea distribuitorului spre extindere, confirmarea poziției trebuie să apară într-un timeout derivat din timpul de cursă, variația presiunii, sarcină și marja de diagnostic. Lipsa confirmării generează o reacție de fault definită în specificația de control.
- În funcție de geometria actuatorului și de logica de control, combinațiile imposibile sau incoerente ale semnalelor de poziție pot fi utilizate pentru diagnosticarea montajului, cablării ori a secvenței.
- Tendința timpului de cursă poate fi monitorizată pentru condition monitoring, însă pragurile de avertizare se stabilesc din datele proprii ale mașinii și din variația normală a procesului, nu dintr-un procent universal.

Exemplul rezolvat 6.1. Senzorizarea unei stații de presare

Cerință. Stația fixează o piesă, execută o presare controlată și verifică etanșeitatea. Ciclul nominal este 1,5 s. Pentru fiecare funcție se definește mai întâi ce trebuie confirmat, nu marca senzorului.

Selecție funcțională

- Prezență piesă metalică în dispozitiv: senzor inductiv M12, montaj flush, distanță de lucru stabilită sub domeniul garantat al senzorului.
- Poziție cilindri pneumatici: câte doi senzori magnetici de capăt de cursă, conectați ca intrări digitale sau printr-un hub IO-Link.
- Cursa axei de presare: traductor liniar absolut (magnetostrictiv/LVDT/encoder liniar) ales după cursă și dinamica presării.
- Forță: celulă de forță cu domeniu astfel încât forța nominală să fie în zona utilă a scalei, cu rezervă la suprasarcină.
- Presiune pentru testul de etanșeitate: traductor ales după interval, rezoluție, stabilitate termică și timp de răspuns.
- Verificare finală: cameră numai dacă funcția nu poate fi confirmată mai simplu prin senzori discreți.

Verificare dinamică. Fiecare senzor trebuie să livreze semnalul în fereastra de timp disponibilă. Frecvența de comutare a unui senzor discret nu se deduce doar din cadența în piese/oră; se verifică viteza reală cu care ținta traversează zona de detecție și timpul minim de prezență.

Bilanț. Rezultatul este un BOM senzorial cu tipul, domeniul, montajul, interfața și criteriul de acceptare pentru fiecare funcție. Dispozitivele cu IO-Link pot fi grupate în mastere cu rezervă de porturi, dar traductoarele cu interfețe dedicate de mare viteză rămân pe interfața corespunzătoare.

În practică · celulă de caroserie cu senzori de proximitate

Într-o celulă de sudare și fixare, senzorii inductivi sunt aleși pentru robustețe la ținte metalice, dar montajul trebuie protejat față de stropi, impact și cabluri mobile. Pentru mentenanță predictivă se pot utiliza, atunci când dispozitivul le furnizează, contoare de comutări, marginea de semnal și temperatura internă; pragurile se stabilesc din istoricul propriu al mașinii.

6.2.7 Montajul mecanic al senzorilor de poziție și prezență

Pentru inginerul mecanic, montajul este parte din funcția de măsurare: poziția suportului, rigiditatea, posibilitatea de reglaj, protecția la impact și accesul la service pot influența mai mult fiabilitatea decât diferențele dintre două familii de senzori. Valorile de cuplu, distanțele de montaj și razele de lucru din cataloage sunt specifice produsului și se verifică înainte de înghețarea desenului de ansamblu.

Senzori inductivi și capacitivi cu filet

Senzorii cilindrici cu filet metric se integrează prin piulițe, bucșe sau suporturi dedicate. Filetul, cuplul de strângere, distanța față de țintă și condițiile flush/non-flush sunt specifice seriei și trebuie

preluate din documentația produsului. Reglajul se face astfel încât distanța de lucru să rămână în domeniul garantat inclusiv la toleranțele mecanice și termice [102].

Senzori fotoelectrici și ultrasonici

Senzorii fotoelectrici și ultrasonici se montează pe suporturi care permit alinierea și protecția la impact. Unghiul față de țintă, zona moartă, conul acustic/optic, cuplurile șuruburilor și distanțele minime sunt date de produs; proiectantul trebuie să asigure reglajul, rigiditatea și accesul pentru service, fără a transfera valori între familii diferite [102].

Senzori magnetici pe cilindri pneumatici

Senzorii magnetici pentru cilindri se montează în geometria de canal prevăzută de producătorul cilindrului și senzorului (Tabelul 6.2). T-slot, C-slot și alte profile sunt soluții comerciale uzuale, dar geometria lor nu este definită universal de ISO 15552 sau ISO 21287. Cuplul șurubului de fixare și distanța dintre senzori se verifică în catalogul combinației utilizate.

Tabelul 6.2. Interfețe mecanice uzuale pentru montajul senzorilor de poziție și prezență; cuplurile și distanțele finale se preiau din documentația produsului.

Familie senzor	Interfață mecanică uzuală	Referință de proiectare	Regulă critică
Inductiv / capacitiv M8-M30	Filet metric exterior + piuliță	Documentația senzorului; IEC 60947-5-2 pentru cerințe generale	Cuplul, distanța de lucru și zona liberă sunt specifice produsului
Fotoelectric (TB, RR, difuz)	Suport/bracket reglabil	Suport și instrucțiuni ale producătorului	Rigiditate, aliniere și acces pentru reglaj/service
Ultrasonic	Bracket și/sau filet al carcasei	Documentația senzorului; IEC 60947-5-2	Respectarea zonei moarte, conului acustic și orientării țintei
Magnetic pe cilindru (T-slot)	Canal longitudinal + șurub de fixare	Catalog cilindru + senzor; geometria canalului nu este impusă universal de ISO 15552/21287	Cuplul și poziția se verifică pentru combinația concretă
Magnetic pe cilindru (C-slot)	Canal/clip lateral	Catalog cilindru + senzor; geometria canalului nu este impusă universal de ISO 15552/21287	Compatibilitatea mecanică și domeniul de comutare se validează pe actuator

6.3 Măsurarea deplasării și poziției continue

Spre deosebire de senzorii de proximitate care detectează doar prezența unui obiect (semnal binar), senzorii de deplasare furnizează informație continuă despre poziția unei axe sau a unui actuator. Această capabilitate este condiția necesară a oricărui sistem de poziționare de precizie: mașini-unelte CNC, roboți industriali, prese servoelectrice, axe sincronizate în liniile de asamblare. Această secțiune

tratează cele patru familii principale de senzori de deplasare utilizate în echipamentele moderne de fabricație: encoderi rotativi incrementali și absoluți, traductoare LVDT și senzori magnetostrictivi.

6.3.1 Encodere incrementale rotative

Encoderul incremental este o soluție uzuală pentru feedback de poziție și viteză pe axe rotative (Figura 6.8). Din perspectiva proiectantului mecanic, informația este de regulă indirectă: encoderul măsoară rotația arborelui, iar poziția utilă a saniei rezultă prin transmisie. Jocul, elasticitatea, eroarea de pas și deformația termică pot face ca rezoluția encoderului să fie mult mai bună decât exactitatea reală a axei.

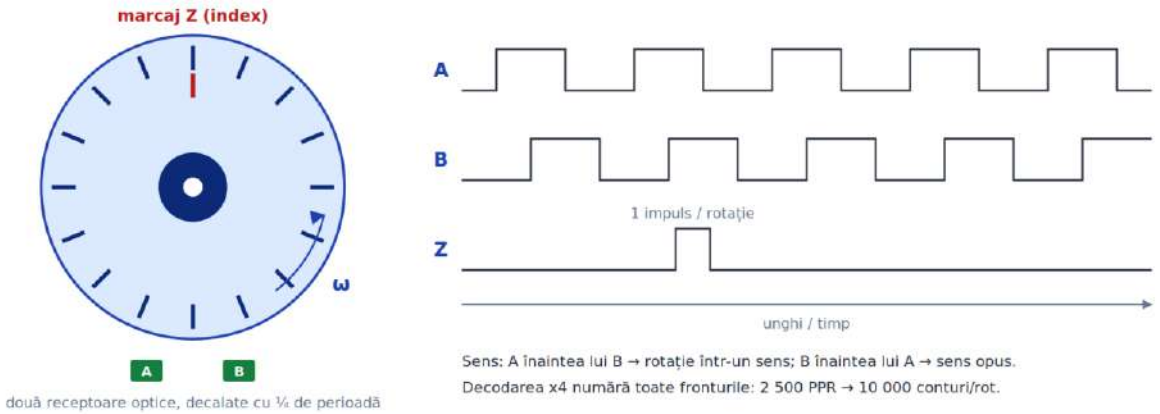


Figura 6.8. Encoder incremental rotativ: disc de codare și semnale A, B și Z.

Semnalele A, B, Z și cuadratura

Encoderul incremental furnizează trei semnale digitale:

- Canalele A și B sunt două trenuri de impulsuri în cuadratură. Numărul de impulsuri sau perioade pe rotație este o caracteristică a encoderului; denumirile PPR/CPR pot fi utilizate diferit de producători, de aceea calculul rezoluției trebuie făcut din definiția exactă a fișei tehnice [104].
- Canalul Z (index, marker): un puls scurt o singură data pe rotație. Folosit pentru sincronizarea poziției la un punct de referință cunoscut („homing”) la pornirea sistemului.

Defazajul de aproximativ 90° electric dintre A și B permite determinarea sensului de rotație și, dacă receptorul numără toate fronturile, o decodare x4 față de numărul de perioade pe canal. Convenția semnului direcției depinde de montaj și de parametrizarea controlerului [104].

$$\text{Rezoluție efectivă} = 4 \cdot \text{PPR} \quad [\text{conturi/rotație}] \tag{6.3}$$

De exemplu, un encoder de 1000 PPR poate produce 4000 conturi/rotație prin decodare x4, adică o discretizare unghiulară de 0,09°/cont. Aceasta este rezoluția de numărare, nu exactitatea mecanică a axei și nici eroarea absolută a encoderului.

Limitarea fundamentală: poziționare relativă

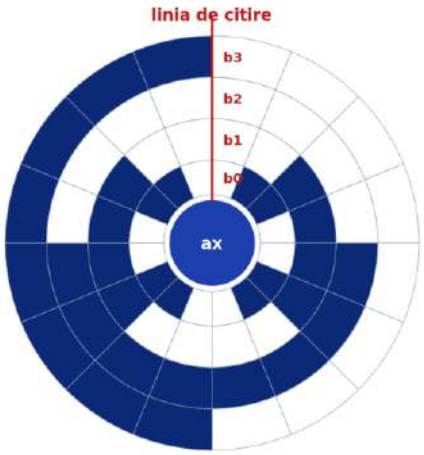
Encoderul incremental, prin natura sa, măsoară doar variația poziției (numărul de impulsuri între două momente), nu poziția absolută. La pornirea sistemului, controlerul nu cunoaște unde se află axa; trebuie executată o procedură de homing (rotire până la detectarea unui senzor de referință exterior) pentru a stabili originea sistemului de coordonate. Această limitare are consecințe practice:

- Durata procedurii de homing depinde de poziția inițială, viteza permisă, strategia de căutare și numărul de axe; nu există un interval universal aplicabil tuturor mașinilor.
- Necesar de senzor extern de referință: uzual un comutator de capăt de cursă sau un senzor inductiv pe poziția 0.
- Vulnerabilitate la pierdere de poziție: orice întrerupere de alimentare necesită re-homing.

Encoderii incrementali rămân o soluție larg utilizată datorită simplității și compatibilității cu numeroase drive-uri. Costul, rezoluția și robustețea diferă puternic între familii; selecția se face din cerința de poziție/viteză și arhitectura de control [104].

6.3.2 Encodere absolute rotative

Encoderul absolut elimină limitarea fundamentală a celui incremental: la fiecare moment, fiecare poziție unghiulară are un cod binar unic (Figura 6.9). Citirea este imediată la pornire, fără nici un homing, iar pierderea de alimentare nu compromite cunoașterea poziției.



Cod Gray pe 4 biți (16 poziții)

Între două poziții vecine se schimbă un singur bit, deci nu apar citiri ambigue la tranziție

Poz.	Binar	Gray	Poz.	Gray
0	0000	**0000**	8	**1100**
1	0001	**0001**	9	**1101**
2	0010	**0011**	10	**1111**
3	0011	**0010**	11	**1110**
4	0100	**0110**	12	**1010**
5	0101	**0111**	13	**1011**
6	0110	**0101**	14	**1001**
7	0111	**0100**	15	**1000**

Encoderele absolute industriale au uzual 12-22 biți pe o rotație
și interfețe SSI, BiSS, EnDat sau IO-Link; varianta multi-turn numără și rotațiile.

Figura 6.9. Encoder absolut rotativ: principiu de codare multi-pistă cu cod Gray.

Codul Gray și numărul de biți

Un encoder absolut atribuie fiecărei poziții din domeniul său o valoare digitală. De exemplu, 12 biți permit 4096 stări distincte într-o rotație, dar numărul de biți exprimă rezoluția de codare, nu exactitatea unghiulară. Rezoluția și protocolul se verifică în documentația encoderului [104].

Codul Gray este utilizat în unele arhitecturi pentru a limita la un singur bit schimbarea dintre stări adiacente și pentru a reduce ambiguitățile la tranziții. Encoderele moderne pot utiliza și alte scheme interne și protocoale seriale; principiul concret se verifică în documentația dispozitivului [104].

Encoderi single-turn vs multi-turn

Encoderii absoluți se subdivid în două familii principale:

Single-turn: furnizează poziția absolută într-o rotație. Rezoluția, precizia și interfața diferă între produse; este adecvat atunci când informația multi-turn nu este necesară [104].

Multi-turn: furnizează, pe lângă poziția în rotația curentă, informația despre numărul de rotații într-un domeniu definit. Realizarea poate fi mecanică, electronică sau energy-harvesting, în funcție de produs; domeniul multi-turn și comportamentul la pierderea alimentării se verifică în fișa tehnică [104].

Interfețe de comunicație

Encoderii absoluți folosesc magistrale digitale dedicate, nu doar semnale paralele (care ar necesita 12+ fire). Cele uzuale:

- SSI este o interfață serială sincronă utilizată pentru encodere absolute; topologia electrică și temporizarea se verifică împreună cu receptorul.
- BiSS este o familie de interfețe seriale sincrone utilizată pentru feedback de poziție și funcții suplimentare, în funcție de implementare.
- EnDat este o interfață digitală dezvoltată de HEIDENHAIN pentru sisteme de măsurare a poziției; versiunea și compatibilitatea trebuie verificate între encoder și drive [104].
- Unele sisteme de feedback sunt integrate direct prin rețele industriale sau prin module de interfață, dacă performanța și profilul de comunicație sunt compatibile cu bucla de control.
- IO-Link este potrivit pentru dispozitive de câmp compatibile cu cerințele sale de timp și volum de date; nu trebuie prezentat drept înlocuitor generic pentru interfețele dedicate feedbackului rapid de servo [96], [101].

Interfața encoderului se alege împreună cu drive-ul și arhitectura de control. SSI, BiSS și EnDat sunt utilizate direct pentru feedback de poziție, iar unele encodere sunt integrate prin rețele industriale. Profilurile de mișcare ale drive-urilor (de exemplu CiA 402) nu trebuie confundate cu interfața fizică internă a encoderului.

6.3.3 LVDT: traductor diferențial liniar variabil

LVDT-ul este un traductor inductiv robust pentru măsurarea directă a deplasărilor liniare, utilizat atunci când se urmăresc curse moderate, repetabilitate bună și funcționare fără contact între miez și bobine. Domeniul, liniaritatea și temperatura admisă diferă semnificativ între familiile constructive și trebuie verificate în fișa tehnică.

Figura 6.10 prezintă construcția unui LVDT: o bobină primară, două bobine secundare și un miez feromagnetic mobil.

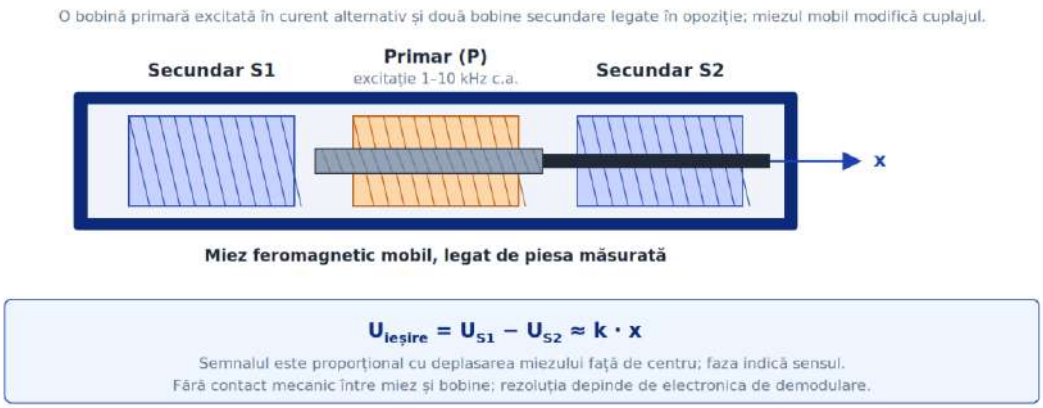


Figura 6.10. LVDT: bobină primară, două bobine secundare și miez feromagnetic mobil.

Principiul de funcționare

Construcția LVDT-ului utilizează o bobină primară și două secundare conectate diferențial, împreună cu un miez feromagnetic mobil. Frecvența de excitație, cursa și condiționarea sunt caracteristici de produs și ale electronicii asociate [99], [100].

Când miezul este în poziția centrală (echilibru), cuplajul magnetic către S1 și S2 este identic, iar diferența S1−S2 = 0. Dacă miezul se deplasează spre stânga, cuplajul către S1 crește și cel către S2 scade: apare o tensiune diferențială proporțională cu deplasarea. Sensul deplasării este determinat de faza tensiunii față de cea a primarei.

$$V_{\text{out}} = k \cdot x \quad (\text{proporțional cu deplasarea; semnul indică direcția}) \tag{6.4}$$

Avantaje și caracteristici

LVDT-ul are un set de avantaje care îl fac de neînlocuit în aplicații de înaltă precizie:

- Fără contact mecanic între miez și ansamblul de bobine în configurația corectă, LVDT-ul evită uzura de frecare în elementul de măsurare; durata de viață a ansamblului rămâne dependentă de ghidare, cablare și mediul aplicației [99].
- Rezoluția utilizabilă este determinată de zgomot, electronică, condiționare și mecanica montajului; nu se presupune generic o rezoluție submicrometrică pentru orice LVDT [99], [100].
- Liniaritatea este declarată pentru un domeniu și condiții de utilizare specificate; valorile trebuie preluate din fișa tehnică a traductorului și incluse în bugetul de eroare [99], [100].
- Domeniul de temperatură, rezistența la vibrații și gradul IP depind de construcția senzorului și de electronică; variantele pentru medii dificile se selectează din cerințele aplicației.
- Două variante constructive: AC LVDT (necesită oscilator și demodulator extern) și DC LVDT (cu electronică integrată și alimentare 24 VDC, plug-and-play).

Aplicații în echipamente de fabricație

Domeniul natural al LVDT-ului acoperă aplicații cu cerințe de precizie ridicată și curse moderate:

- Feedbackul direct cu LVDT poate fi utilizat pe curse moderate atunci când robustețea și măsurarea liniară directă sunt avantajoase; exactitatea finală se verifică la nivelul lanțului complet, nu printr-o valoare generică a tehnologiei.
- Măsurători dimensionale inline: verificarea grosimii pieselor, a deformărilor sub sarcină, a poziționării sculelor.
- Monitorizarea cursei dispozitivelor de fixare în operații critice: detectarea pieselor lipsă sau deformate prin comparație cu o curbă de referință.
- Diagnoza axei în mașini-unelte: măsurarea deformației termice a structurii pe parcursul ciclului de producție.

Pentru selecție se compară cursa, liniaritatea, temperatura, condiționarea semnalului, montajul și costul ofertat pentru proiect; nu se utilizează un interval de preț universal.

6.3.4 Traductoare magnetostrictive (Time-of-Flight)

Traductoarele magnetostrictive sunt utilizate pentru măsurarea liniară absolută, inclusiv la curse mari și în integrarea cu cilindri hidraulici (Figura 6.11). Cursa maximă, rezoluția și mediul admis sunt specifice seriei [105].



Figura 6.11. Traductor magnetostrictiv: măsurarea poziției prin timpul de propagare al undei de torsiune.

Principiul Time-of-Flight

Construcția senzorului conține un fir magnetostrictiv (aliaj Fe-Ni) montat în interiorul unui tub de inox. Pe partea mobilă a sistemului măsurat se montează un magnet permanent inelar care înconjoară tubul, fără a-l atinge. Funcționarea urmează patru pași succesivi:

- Electronica senzorului trimite un puls scurt de curent („interogare”) prin firul magnetostrictiv.
- Pulsul de curent generează un câmp magnetic circular în jurul firului.
- La interacțiunea impulsului de curent cu câmpul magnetului de poziție se generează o undă de torsiune care se propagă în ghidul de undă. Viteza de propagare este o proprietate a construcției și este compensată/calibrată de sistem; nu se tratează ca o constantă universală transferabilă între produse [105].
- Unda ajunge la electronică și este detectată. Timpul total între pulsul inițial și recepționarea undei este proporțional cu distanța de la magnet la electronică.

Poziția se determină din timpul de propagare măsurat și calibrarea internă a traductorului. Rezoluția, repetabilitatea și cursa maximă se preiau din fișa tehnică a seriei [105].

Avantaje critice

Senzorul magnetostrictiv este deosebit de util la curse mari și la integrarea în cilindri hidraulici deoarece oferă poziție absolută fără contact mecanic între magnet și ghidul de undă. Rezoluția, liniaritatea, cursa maximă și gradul IP sunt caracteristici de produs; nu se transferă generic de la o serie la alta.

- Poziție absolută: fără homing, citire imediată la pornire.
- Sunt disponibile curse de la domenii scurte până la mai mulți metri, în funcție de familie și construcție [105].
- Măsurarea fără contact mecanic între magnet și ghidul de undă elimină uzura de contact în elementul de măsurare; durata de viață a ansamblului rămâne dependentă de integrarea mecanică și mediu [105].
- Integrarea în cilindri hidraulici este o aplicație consacrată, dar necesită un cilindru și un traductor proiectate cu interfețe compatibile; nu orice cilindru standard poate fi transformat într-o servoaxă prin simpla adăugare a senzorului [105].
- Rezoluția și liniaritatea diferă între seriile magnetostrictive și trebuie verificate pentru cursa și interfața selectate [105].

- Gradul IP, șocul, vibrația și temperatura admisă sunt caracteristici de produs; se verifică pentru mediul aplicației [105].
- Interfețele disponibile pot include semnale analogice și protocoale digitale, în funcție de familie. Compatibilitatea cu PLC-ul sau drive-ul se verifică la nivel de produs [105].

Temposonics este unul dintre furnizorii consacrați ai acestei tehnologii; în proiectarea didactică se utilizează documentația de produs ca sursă pentru cursă, rezoluție, liniaritate și interfață [105].

6.3.5 Comparație și criterii de selecție

Tabelul 6.3 sintetizează compromisurile principale dintre cele patru tehnologii prezentate și trebuie utilizat ca ghid de orientare, nu ca substitut pentru verificarea catalogului și a bugetului de eroare.

Criteriu	Encoder incremental	Encoder absolut	LVDT	Magnetostriction
Tipul măsurării	Poziție relativă	Poziție absolută	Poziție liniară absolută	Poziție liniară absolută
Necesită homing	De regulă da	De regulă nu	Nu	Nu
Domeniul tipic	Rotativ; mecanica axei definește domeniul util	Rotativ single-/multi-turn	Cursă scurtă–medie, specifică produsului	De la curse scurte la mai mulți metri, în funcție de serie
Rezoluție	Definită prin PPR/CPR și decodare	Definită în biți/poziții; nu echivalează cu exactitatea	Determinată de senzor + condiționare + zgomot	Definită de electronică și serie
Exactitate / liniaritate	Depinde de encoder și transmisie	Depinde de encoder și transmisie	Liniaritatea este dată de produs	Liniaritatea/repetabilitatea sunt date de produs
Cost relativ	De regulă redus–mediu	De regulă mediu–ridicat	Dependent de cursă și condiționare	Dependent de cursă și interfață
Aplicație tipică	Servoaxe, viteză/poziție relativă	Servoaxe cu poziție disponibilă la pornire	Măsurare liniară directă, curse moderate	Cilindri hidraulici și curse mari

Tabelul 6.3. Comparație între soluții de măsurare a poziției continue: encoder incremental, encoder absolut, LVDT și traductor magnetostrictiv.

Exemplul rezolvat 6.2. Alegerea feedbackului pentru o axă servoelectrică liniară

Cerință. Axa are cursă 600 mm, viteză maximă 2 m/s, pas al șurubului 10 mm/rotație, toleranță de poziționare ±0,10 mm și repetabilitate cerută ±0,05 mm.

1. Encoder incremental pe motor. La 5000 PPR și decodare x4 rezultă 20 000 conturi/rotație, adică 10/20 000 = 0,0005 mm/cont. Valoarea arată că rezoluția electronică nu este limitativă. Nu dovedește însă exactitatea axei: eroarea de pas a șurubului, jocul, rigiditatea și termica pot fi cu două ordine de mărime mai mari.

2. Encoder absolut multi-turn pe motor. Păstrează poziția rotațională după întreruperea alimentării și poate elimina o parte din secvența de homing. Avantajul este operațional; erorile transmisiei mecanice rămân.

3. Măsurare liniară directă pe sanie. O riglă optică/magnetică sau un traductor liniar absolut măsoară poziția utilă după transmisie și poate observa jocul și eroarea de pas. Este justificată când toleranța axei nu poate fi demonstrată numai din encoderul motorului și compensările controlului.

Decizie. Pentru ±0,10 mm, encoderul absolut de pe motor poate fi suficient numai după verificarea bugetului de eroare mecanic și a repetabilității pe cursă. Pentru cerințe mai stricte sau variații termice semnificative se preferă feedbackul liniar direct.

În practică · encoder absolut pe servoaxă

Un encoder absolut elimină necesitatea unei referențieri complete după fiecare întrerupere de alimentare, dar avantajul trebuie evaluat la nivelul mașinii. Pe o axă liniară, exactitatea finală depinde și de pasul șurubului, joc, rigiditate și temperatură; encoderul de pe motor nu măsoară direct toate aceste erori.

6.3.6 Interfața mecanică a encoderelor: aliniere, cuplaje și braț anti-rotație

Montajul encoderului trebuie tratat ca o interfață mecanică de precizie. Configurația arborelui, tipul de cuplaj, dezalinierea radială/axială, brațul anti-rotație și vibrațiile pot limita durata de viață și calitatea semnalului. Valorile admise sunt specifice encoderului și cuplajului; tabelul următor trebuie citit ca ghid de alegere, nu ca toleranță universală.

Configurația shaft-mounted și hollow-shaft

Encoderele cu arbore și cele cu arbore tubular reprezintă două configurații mecanice frecvente. Diametrele, ajustajele, clemele și brațele anti-rotație sunt specifice produsului; avantajele și solicitările asupra rulmenților se analizează împreună cu documentația encoderului și a cuplajului [104].

Cuplaje recomandate pentru encoderi shaft-mounted

Pentru encoderele cu arbore, cuplajul trebuie să transmită rotația fără a depăși dezalinierea admisă de encoder și cuplaj. Cuplajele cu burduf, Oldham sau elastomerice au compromisuri diferite între rigiditate torsională, compensarea dezalinierii și damping; valorile admise se preiau din catalog. Cuplajul rigid se utilizează numai dacă producătorii componentelor admit explicit geometria și alinierea rezultate [104].

Toleranța de aliniere și vibrație

După montaj, bătăile radiale/axiale, dezalinierea și solicitarea brațului anti-rotație trebuie să rămână în limitele declarate de producător. Rezistența la vibrație și șoc se verifică pe baza încercărilor și claselor

declarate pentru encoder; nu se presupun valori universale de accelerație sau durată de viață (Tabelul 6.4) [104].

Tabelul 6.4. Interfețe mecanice uzuale ale encoderelor; toleranțele admise se verifică pentru encoderul și cuplajul selectate.

Configurație	Element de cuplare	Toleranța TIR admisă	Aplicație tipică
Shaft-mounted, precizie	Cuplaj cu burduf metalic	Valoare declarată de producător	Encoderi de precizie / servoaxe
Shaft-mounted, uz general	Cuplaj Oldham	Conform limitelor cuplajului și encoderului	Encoderi incrementali industriali
Shaft-mounted, amortizare	Cuplaj elastomeric	Conform limitelor de dezaliniere și backlash	Transportoare și axe cu cerințe moderate
Hollow-shaft + tether	Clemare pe ax + braț anti-rotație	Conform axului și encoderului	Montaj direct pe arbore
Encoder liniar extern	Rigla + cap de citire	Gap și paralelism conform producătorului	Feedback liniar direct

6.4 Măsurarea forței, cuplului și presiunii

Măsurarea forței și presiunii reprezintă a doua mare familie de senzori în echipamentele de fabricație, în special în cele cu operații de presare, asamblare cu forțe, testare la solicitări sau strângere controlată. Erorile în acest domeniu au consecințe directe pe linia de producție: forțele insuficiente lasă piese cu defecte ascunse care apar în service ca eșecuri ale clientului, forțele excesive deformează sau rup piesa, iar forțele instabile generează variabilitate care compromite calitatea statistică. Această secțiune tratează cele patru familii principale: celule de forță cu extensiometre, senzori piezoelectrici, curba forță–cursă și traductoare de presiune.

6.4.1 Celule de forță cu extensiometre

Celula de forță cu extensiometre combină un corp elastic proiectat să se deformeze controlat cu extensiometre rezistive, de regulă conectate într-o punte Wheatstone (Figura 6.12). Performanța metrologică aparține ansamblului mecanic–senzor–condiționare și trebuie validată pentru modul de încărcare [99], [100], [106].

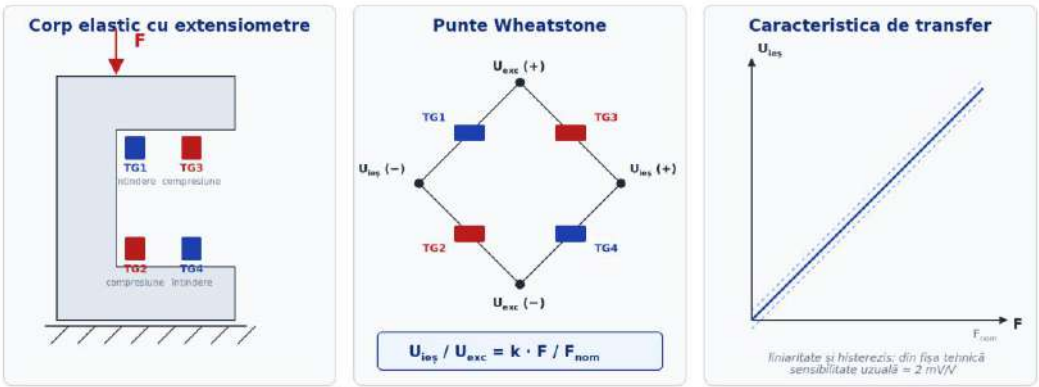


Figura 6.12. Celulă de forță cu extensiometre: corp elastic, punte Wheatstone și caracteristică de transfer.

Principiul de funcționare

Extensiometrul rezistiv este o folie metalica fina (gri-mestecala în zigzag) lipita pe corpul elastic cu un adeziv special. Când piesa se deformează sub sarcină, extensiometrul se deformează identic, iar rezistența lui electrica variază proporțional cu deformația ε:

$$\frac{\Delta R}{R} = \mathrm{GF} \cdot \varepsilon \tag{6.5}$$

Factorul de marcă (gauge factor) și domeniul de deformație depind de materialul și configurația extensiometrului. Pentru calcule se utilizează datele producătorului și ale lanțului de măsurare; valorile orientative din manualele de instrumentație nu trebuie tratate ca specificații ale celulei selectate [99], [100].

Puntea Wheatstone

Conectarea extensiometrelor într-o punte Wheatstone permite obținerea unui semnal diferențial sensibil la deformație și, printr-o dispunere corespunzătoare, compensarea parțială a efectelor comune de temperatură. Sensibilitatea și compensarea depind de configurația sfert/semipunte/punte completă și de geometria corpului elastic; puntea nu elimină automat toate erorile termice.

- O punte completă poate crește sensibilitatea și poate compensa unele efecte comune, în funcție de orientarea extensiometrelor și geometria corpului elastic [106].
- Compensarea termică nu este perfectă sau automată în orice montaj. Efectele temperaturii asupra zero-ului, sensibilității, corpului elastic și cablării trebuie evaluate din specificația senzorului și, dacă este critic, prin calibrare [106].

Sensibilitatea unei celule extensometrice este frecvent exprimată în mV/V la sarcină nominală. Valoarea exactă, tensiunea de excitație și amplificarea necesară se preiau din fișa tehnică a celulei și a condiționatorului; ieșirea nu trebuie generalizată pentru o întreagă familie [106].

Tipuri constructive

Celulele de forță moderne acoperă o gamă largă de domenii și configurații mecanice:

Celulele de compresie sunt utilizate atunci când sarcina este predominant axială de compresiune; domeniul și interfața mecanică se aleg din forța maximă, suprasarcină și geometria montajului [106].

Celulele de tip S pot măsura tracțiune și compresiune, dacă sunt montate cu accesorii care limitează momentele parazite; domeniul este specific modelului [106].

Celulele tip pancake/low-profile oferă o înălțime redusă și pot acoperi domenii mari de forță; montajul și distribuția șuruburilor sunt critice pentru eroarea de măsurare [106].

Celulele miniaturale sunt utilizate în spații restrânse, dar compromisurile privind suprasarcina, rigiditatea, cablarea și sensibilitatea trebuie evaluate pentru produsul concret [106].

Senzorii multi-axiali pot măsura simultan mai multe componente de forță și moment. Domeniile, cross-talk-ul și matricea de calibrare sunt specifice modelului și aplicației.

În practică · servopresă cu măsurare forță–cursă

Într-o servopresă, celula de forță și traductorul de poziție formează împreună sistemul de verificare a procesului. Calibrarea, rigiditatea montajului și sincronizarea celor două canale sunt la fel de importante ca precizia fiecărui senzor. Frecvența de eșantionare și fereastra OK/NOK se validează experimental pe piese reprezentative.

6.4.2 Senzori piezoelectrici

Senzorul piezoelectric utilizează un cristal, cuarț natural sau ceramică artificială (PZT), care, la aplicarea unei forțe, generează o sarcină electrică proporțională cu forța:

$$Q = d \cdot F \tag{6.6}$$

Coeficientul piezoelectric depinde de material, orientare și condițiile de utilizare. Lanțul de măsurare are impedanță mare și necesită electronică adecvată, de exemplu un amplificator de sarcină, conform arhitecturii senzorului (Figura 6.13) [99], [107].



Figura 6.13. Principiul unui lanț de măsurare piezoelectric a forței: element sensibil, amplificator de sarcină și interfață de achiziție.

Caracteristici și avantaje

Senzorul piezoelectric ocupă o nișă specifică complementară celulei de forță clasice:

- Senzorii piezoelectrici pot oferi bandă dinamică ridicată și rigiditate mare, ceea ce îi face potriviți pentru forțe variabile rapid, impact și vibrații. Banda utilă este însă determinată de senzor, montaj și amplificator și nu se generalizează printr-o singură valoare [107].
- Rigiditatea mecanică ridicată reduce deplasarea proprie a senzorului, dar forțele parazite, preload-ul și montajul rămân surse de eroare care trebuie controlate [107].
- Domeniul dinamic și raportul dintre semnalul minim și maxim măsurabil depind de senzor și de electronica de condiționare; nu se presupune un raport universal pentru tehnologia piezoelectrică [107].
- Robustețe în medii dificile: fără componente electronice în capul senzorului propriu-zis, doar cristal și carcasa, rezistă la temperaturi înalte și vibrații.

Limitarea principală: măsurarea statică pe termen lung

Senzorul piezoelectric generează sarcină electrică, iar lanțul de măsurare are o constantă de timp finită determinată de izolație și de amplificator. De aceea este excelent pentru forțe dinamice și poate

măsura regimuri cvasi-statice pe intervale limitate, însă nu este alegerea naturală pentru menținerea indefinită a unei forțe constante. Durata utilă de observare se verifică din specificația sistemului senzor–amplificator.

În practică, piezoelectricul se alege pentru impact, vibrații și variații rapide ale forței; pentru măsurări statice sau menținute se preferă frecvent o celulă extensometrică. Cele două tehnologii pot coexista atunci când procesul are simultan o fază dinamică rapidă și o fază de menținere.

> **În practică · alegerea între extensometric și piezoelectric**
> Pentru măsurări statice sau menținute, celula extensometrică este de regulă mai potrivită. Pentru impacturi, vibrații și forțe cu variație rapidă, senzorul piezoelectric oferă rigiditate și bandă dinamică mare. Alegerea se face din spectrul fenomenului și timpul de menținere, nu doar din forța maximă.

6.4.3 Curba forță–cursă: semnătura procesului de presare

Pentru SAP de referință, măsurarea sincronizată a forței de presare F și a deplasării axei Z permite construirea unei curbe F–z, utilă pentru monitorizarea procesului [108] și pentru investigarea îmbinării tub–carcasă prin ajustaj cu strângere. Domeniul și suprasarcina traductorului de forță trebuie să acopere ipoteza preliminară de 8 kN; un traductor cu domeniul maxim de 5 kN nu este adecvat măsurării unei forțe de 8 kN. Curba singură nu demonstrează calitatea produsului: fereastra de acceptare și eventualele verificări geometrice se definesc prin calcule, eșantioane și validarea procesului (Figura 6.14).

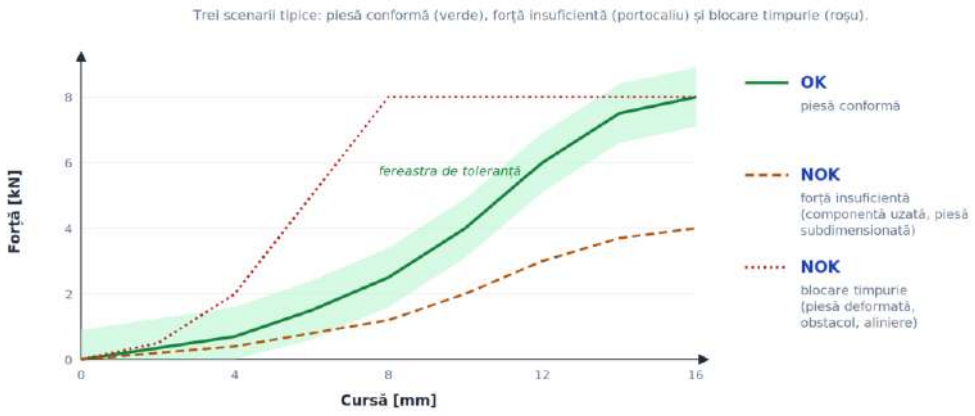


Figura 6.14. Curba forță–cursă utilizată la verificarea unei operații de presare: traseu nominal, ferestre de toleranță și abateri de proces.

Interpretarea celor trei scenarii

Curba nominală se construiește dintr-un lot de referință validat. Ferestrele de toleranță nu se aleg generic la ±5–10%; ele se stabilesc din cerința funcțională, dispersia procesului, capabilitatea măsurării și riscul asociat defectului. O curbă sub fereastră poate indica joc, piesă subdimensionată sau forță insuficientă, iar o creștere abruptă la cursă mică poate indica blocaj, contaminare sau geometrie incorectă.

Curba inferioară de tip NOK poate indica, în funcție de produs, joc excesiv, toleranțe nepotrivite, poziționare defectuoasă ori aplicarea unei forțe insuficiente. Pentru axa Z electrică a SAP nu se atribuie o asemenea abatere scurgerii unui cilindru pneumatic principal, deoarece acesta nu aparține

configurației de bază. Regula de respingere se stabilește pe baza unor ferestre de proces validate și a incertitudinii măsurării; o abatere grafică nu identifică singură cauza-rădăcină.

Curba superioară de tip NOK poate semnala o rezistență anormală la avans, de exemplu prin nealiniere, contaminare, geometrie necorespunzătoare sau blocaj. Monitorizarea F, z și a evoluției lor poate declanșa o oprire de proces sau o reacție de protejare a echipamentului, în condițiile proiectate. Această logică obișnuită a PLC nu devine automat funcție de siguranță: reducerea riscului de strivire și reacția safety se stabilesc și se validează separat, pe baza evaluării riscului.

Exemplul rezolvat 6.3. Monitorizarea forță–cursă pe stația-pilot SAP

Cerință. Forță nominală 8 kN, cursă 30 mm, fază de presare 200 ms. Sistemul trebuie să păstreze curba F(s) pentru fiecare ciclu și să furnizeze decizia OK/NOK înainte de transferul piesei.

Lanț de măsurare

- Celulă de forță: domeniu selectat astfel încât 8 kN să fie în zona utilă a scalei și cu rezervă la suprasarcină.
- Poziție: traductor liniar absolut montat cât mai aproape de mărimea mecanică de interes.
- Achiziție: canalele de forță și poziție se eșantionează sincron sau cu decalaj cunoscut.

Frecvența de eșantionare. La 1 kHz și o fază de presare de 200 ms se obțin aproximativ 200 de eșantioane pe cursă, nu 1000. Dacă forma curbei conține fenomene mai rapide, frecvența se stabilește din banda semnalului și din filtrarea antialiasing, nu dintr-un număr arbitrar de puncte.

Fereastra de acceptare. Se colectează un lot de piese confirmate metrologic și funcțional, se construiește curba de referință și se definesc indicatori validați: forță maximă, cursa la un prag de forță, pantă dF/ds, energie/arie și zone interzise. Pragurile trebuie corelate cu defecte fizice cunoscute și cu capabilitatea sistemului de măsurare.

Decizie. PLC-ul sau controlerul de proces poate calcula indicatorii în timp real sau imediat după presare. Pentru trasabilitate se stochează numai rezoluția temporală necesară demonstrării procesului, împreună cu identificatorul piesei și versiunea rețetei.

6.4.4 Traductoare de presiune

Traductoarele de presiune convertesc presiunea unui fluid într-un semnal electric. Principiile piezorezistiv, capacitiv, ceramic/metal-film și alte arhitecturi sunt utilizate în funcție de domeniu, mediu și performanța cerută; parametrii se compară conform fișelor tehnice și metodelor de evaluare relevante [98], [99], [100].

Traductoarele piezorezistive utilizează deformarea unei diafragme și variația rezistivă a elementului sensibil. Domeniul, exactitatea, banda și compatibilitatea cu fluidul sunt caracteristici de produs și trebuie verificate pentru aplicație [98], [99].

Traductoarele capacitive detectează modificarea capacității asociate deformării unei membrane. Pot oferi sensibilitate ridicată în anumite domenii, dar exactitatea și limita de presiune nu sunt proprietăți universale ale principiului [98], [99].

Traductoarele industriale integrate combină elementul sensibil cu condiționarea, compensarea și interfața electrică. Gradul IP, rezistența la vibrații și eroarea totală se evaluează la nivelul produsului [98].

Selecția tipului depinde puternic de aplicație:

- În pneumatica industrială se aleg frecvent traductoare în domeniul presiunii de lucru al instalației, cu ieșire analogică, discretă sau IO-Link. Modelul concret se selectează din domeniu, supra-presiune admisă, racord, fluid, temperatură și diagnostic.
- În hidraulică, traductorul se dimensionează din presiunea nominală și vârfurile tranzitorii, compatibilitatea cu fluidul, pulsații și racordul mecanic; pentru circuite dinamice se verifică și banda de frecvență.
- În aplicații igienice se utilizează racorduri și membrane compatibile cu procesul și cu regimul de curățare; certificările necesare se stabilesc din sector și specificația instalației.
- În testarea etanșeității, alegerea între presiune absolută, relativă sau diferențială se face din metoda de test, volumul, timpul disponibil, nivelul de scurgere și bugetul de incertitudine; rezoluția nu se deduce generic din denumirea tehnologiei.

6.4.5 Montajul și interfață de proces pentru senzori de forță, cuplu și presiune

Senzorii tratați în §6.4 transduc mărimi mecanice în semnale electrice, iar calitatea măsurării depinde atât de calibrarea senzorului și electronicii, cât și de interfața mecanică prin care mărimea este aplicată. Excentricitatea, momentele parazite, rigiditatea, racordurile și pulsațiile pot introduce erori comparabile sau mai mari decât eroarea de catalog; de aceea montajul face parte din bugetul de eroare [98], [109], [106], [107].

Aliniere și preload pentru celulele de forță

O celulă de forță trebuie încărcată conform geometriei pentru care a fost proiectată. Excentricitatea, înclinarea și momentele parazite pot produce erori mai mari decât clasa electrică a senzorului. Limitele admise se preiau din documentația celulei și a accesoriilor de montaj. ISO 376:2011 definește calibrarea instrumentelor de măsurare a forței utilizate la verificarea statică a mașinilor de încercare uniaxiale și rămâne ediția curentă, reconfirmată în 2026 [110]; nu este o obligație generică pentru orice celulă de forță dintr-o mașină de producție. Trasabilitatea și intervalul de recalibrare se stabilesc în sistemul metrologic al aplicației [109].

Izolarea momentelor parazite la senzori de cuplu

Senzorii de cuplu rotativi pot fi configurați reactiv sau in-line. Pentru configurația in-line se verifică dezalinierea, cuplajele, sarcinile parazite, turația maximă și comportamentul torsional al ansamblului. Clasa de echilibrare, dacă este relevantă, se stabilește din rotorul și viteza concrete, nu prin praguri universale de turație. Selecția configurației rezultă din arhitectura mecanică și performanța de măsurare cerută.

Interfață de proces pentru traductoarele de presiune

Traductoarele de presiune se conectează la sistemul fluidic prin racorduri definite de produs și de standardele de filet/etanșare aplicabile (Tabelul 6.5). G1/4, G1/2, filetele NPT și filetele metrice sunt exemple uzuale, dar cuplul, etanșarea și materialele se preiau din documentația racordului și a traductorului. Pentru pulsații se pot utiliza snubbere sau manifolduri, dacă răspunsul dinamic rămâne compatibil cu măsurarea. Intervalul de recalibrare nu este universal anual; se stabilește din stabilitatea senzorului, criticitatea măsurării, istoricul derivației și sistemul metrologic [109].

Tabelul 6.5. Interfețe mecanice și de proces pentru senzori de forță, cuplu și presiune; valorile de montaj sunt orientative.

Senzor	Interfața mecanică	Standard	Cuplu / regulă critică
Celulă de forță axială	Adaptor/elemente de centrare conform producătorului	ISO 376 numai când domeniul său metrologic este relevant	Aliniere, suprafețe de reazem și preload conform fișei tehnice
Celulă de forță bolt-down	Flanșă/șuruburi conform desenului senzorului	Documentația producătorului	Secvență și cuplu de strângere specificate de producător
Senzor cuplu in-line	Două cuplaje și arbori compatibili	ISO 21940-11 dacă echilibrarea rotorului este relevantă	Controlul dezalinierii și sarcinilor parazite
Senzor cuplu reactiv	Flanșă la structură + element de reacție	Documentația producătorului	Rigiditate și evitarea momentelor parazite
Traductor presiune	Racord de proces conform produsului	Standardul filetului/racordului aplicabil	Cuplu, etanșare și compatibilitate cu fluidul conform fișei tehnice
Manifold / snubber	Racorduri de proces compatibile	Documentația producătorului	Nu compromite banda necesară și permite izolarea/calibrarea când este cerută
Manifold izolare 3-cale	Două robinete + port de calibrare	Standard producător	Permite re-etalonare in-situ fără oprire proces

6.5 Măsurarea parametrilor de proces

Senzorii de proces (pentru temperatura, debit, umiditate și alte mărimi fizice ale fluidelor de lucru) formează a treia mare familie de senzori în echipamentele de fabricație. Aplicațiile uzuale acoperă monitorizarea uleiului hidraulic, a apei de răcire, a aerului comprimat în rețea, a fluidelor de prelucrare în mașini-unelte, a temperaturilor în cuptoare și camere de uscare. Această secțiune prezintă cele trei familii dominante: senzori de temperatura, debit și umiditate.

6.5.1 Senzori de temperatură

Măsurarea temperaturii este una dintre funcțiile uzuale ale instrumentației industriale (Figura 6.15). În echipamente, temperatura poate fi monitorizată în uleiuri și fluide de proces, în tablouri electrice, la lagăre/motoare sau în operații termice. Pragurile de alarmă și domeniul de măsurare se stabilesc din proprietățile fluidului/materialului, limitele componentelor și cerințele procesului; nu se transferă generic între instalații.

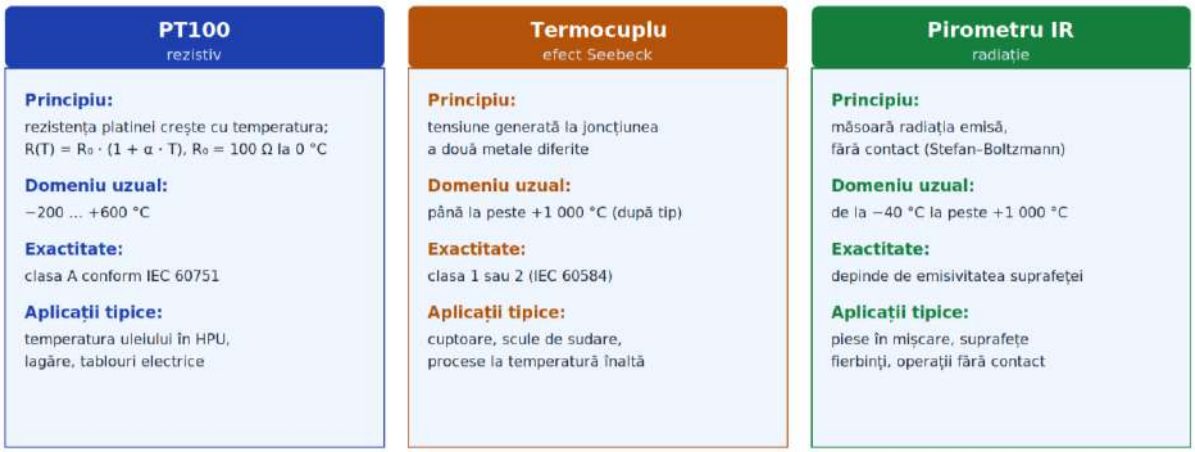


Figura 6.15. Comparație funcțională între PT100, termocuplu și pirometru în infraroșu.

PT100 - termorezistorul de platina

PT100 este un senzor rezistiv din platină cu $R_0 = 100\ \Omega$ la 0 °C. Caracteristica rezistență–temperatură, coeficienții și clasele de toleranță sunt definite de IEC 60751:2022 [111]. Pentru calcul riguros se utilizează relațiile standardului, nu o aproximare liniară pe întregul domeniu.

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T), \quad \alpha \approx 3{,}85 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1} \tag{6.7}$$

În jurul temperaturii de 0 °C, sensibilitatea nominală este aproximativ 0,385 Ω/°C pentru coeficientul $\alpha = 0{,}00385\ \mathrm{K}^{-1}$. Toleranța clasei A este dependentă de temperatură conform IEC 60751; nu se exprimă printr-o singură precizie fixă pentru întregul domeniu [111].

PT100 se conectează în 2, 3 sau 4 fire. Configurațiile cu 3 și 4 fire reduc influența rezistenței conductoarelor și se aleg în funcție de exactitatea cerută, lungimea cablului și modulul de achiziție; nu există un prag universal de lungime de la care compensarea devine obligatorie.

Termocuplul

Termocuplul exploatează efectul Seebeck; tensiunea termo-electrică depinde de tipul perechii de materiale și de diferența de temperatură față de joncțiunea de referință. Funcțiile de referință și toleranțele tipurilor literate sunt definite în IEC 60584-1 [112].

Tipurile uzuale, identificate prin litere, acoperă domenii diferite:

- Tip K este utilizat într-un domeniu larg de temperatură; funcția EMF și toleranțele se preiau din IEC 60584-1 și din construcția concretă a sondei. Limitele de utilizare recomandate depind de diametrul firului, atmosferă și teacă [112].
- Tip J are un domeniu și o compatibilitate de mediu diferite de tip K; selecția se face conform funcției de referință și condițiilor aplicației [112].
- Tip T este utilizat frecvent la temperaturi joase și moderate, cu domeniul și toleranțele definite în IEC 60584-1 [112].
- Tipurile R și S sunt termocupluri pe bază de platină utilizate pentru temperaturi ridicate; domeniul practic depinde de construcția și mediul sondei [112].

Alegerea dintre PT100 și termocuplu nu se face printr-un prag universal de 600 °C. Se compară domeniul de temperatură, exactitatea, timpul de răspuns, robustețea, mediul și cerințele de calibrare [111], [112].

Pirometre IR (non-contact)

Pirometrele cu infraroșii măsoară temperatura unui obiect prin radiația infraroșie pe care acesta o emite, fără contact mecanic. Principiul fizic, legea Stefan-Boltzmann, leagă radiația totală emisă de un corp negru de temperatura sa absolută:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{(puterea totală radiată pe metru pătrat)} \tag{6.8}$$

unde ε este emisivitatea suprafeței, σ = 5,670374419 × 10^{-8} W·m^{-2}·K^{-4} este constanta Stefan–Boltzmann, iar T este temperatura absolută. Într-un pirometru industrial, banda spectrală, emisivitatea, reflexiile și geometria spotului sunt esențiale; detectorul se alege în funcție de domeniul spectral și de temperatură.

Avantajul pirometrului este măsurarea fără contact a unui obiect în mișcare sau greu accesibil. Exactitatea depinde de banda spectrală, emisivitate, reflexii, spot și temperatură; valorile de eroare se verifică pentru modelul și suprafața măsurată [99], [100].

6.5.2 Senzori de debit

Măsurarea debitului poate utiliza numeroase principii: de exemplu turbină, vortex, diferență de presiune, ultrasonic, electromagnetic sau Coriolis. Selecția rezultă din fluid, domeniu, precizie, pierdere de presiune, igienă, diametru și cost; cele trei exemple de mai jos nu epuizează tehnologiile industriale [99], [100].

Debitmetrul cu turbina

Debitmetrul cu turbină măsoară viteza de rotație a unui rotor antrenat de fluid și o corelează cu debitul volumetric. Precizia, turndown-ul, pierderea de presiune și sensibilitatea la vâscozitate/contaminare sunt specifice produsului și calibrării; costul nu se tratează ca interval universal [99], [100].

Debitmetrul vortex

Debitmetrul vortex utilizează frecvența desprinderii vortexurilor din avalul unui corp de separare pentru a estima viteza/debitul. Performanța depinde de Reynolds, condiționarea curgerii, geometria instalației și produs; avantajul principal este lipsa pieselor mobile în calea fluidului [99], [100].

Debitmetrul Coriolis

Figura 6.16 ilustrează principiul debitmetrului Coriolis, care măsoară direct debitul masic.

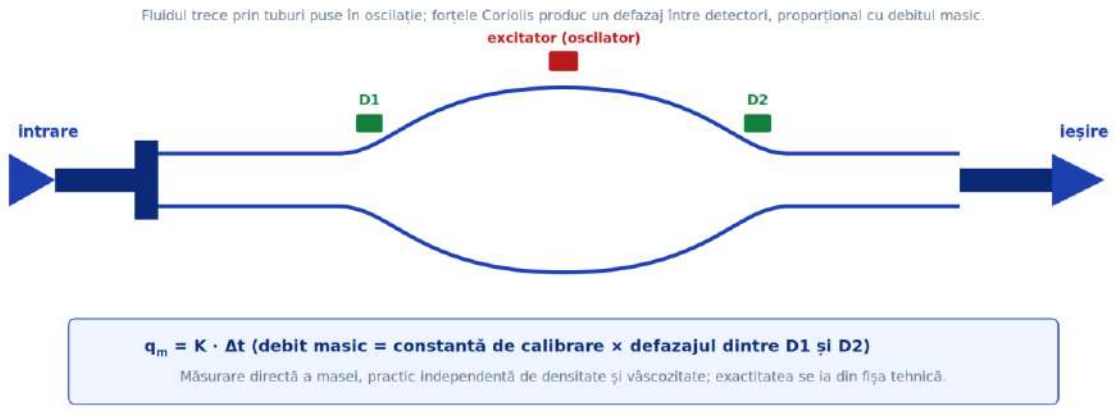


Figura 6.16. Debitmetru Coriolis: principiu de măsurare directă a debitului masic.

Senzorul Coriolis folosește un set de tuburi paralele în formă de U sau de buclă, forțate să oscileze la frecvența lor de rezonanță de un driver electromagnetic. Când fluidul curge prin tuburi, masa fluidului în mișcare interacționează cu oscilația mecanică și produce un cuplu Coriolis care defazează ușor partea de intrare față de partea de ieșire. Senzorii de poziție (D1 și D2 în figura 6.16) detectează acest defazaj, proporțional cu debitul masic.

Avantajele tehnice fac din Coriolis tehnologia premium pentru aplicații cu cerințe ridicate:

- Coriolis măsoară direct debitul masic prin efectul dinamic asupra tubului oscilant. Performanța rămâne dependentă de model, montaj, regimul multifazic și condițiile de proces; afirmația nu trebuie formulată ca independență absolută față de toate proprietățile fluidului [99], [100].
- Exactitatea debitmetrului Coriolis se exprimă prin specificația produsului și condițiile de calibrare. Pentru aplicații critice se utilizează calibrare trasabilă și un buget de incertitudine, nu o valoare generică de ±0,1 % pentru întreaga tehnologie [109]–[100].
- Capabilitatea de a măsura simultan debitul masic, densitatea și temperatura fluidului, utilă în caracterizarea proprietăților fluidului.
- Aplicabilitatea la gaze, lichide sau regimuri cu faze multiple depinde de produs și de fracția de gaz/lichid; regimurile multifazice pot degrada semnificativ măsurarea și necesită modele sau funcții dedicate.

Limitările Coriolis includ costul, masa și gabaritul, pierderea de presiune și sensibilitatea la anumite condiții de instalare/proces. Justificarea se face prin cerința de măsurare și costul ciclului de viață, nu printr-un raport fix de preț față de alte tehnologii.

6.5.3 Senzori de umiditate, vâscozitate și conductivitate

În afara temperaturii și debitului, alte mărimi de proces sunt monitorizate selectiv în funcție de aplicație:

Umiditate: pentru aerul ambiental se utilizează frecvent umiditatea relativă (RH). Pentru aerul comprimat și clasificarea calității conform ISO 8573-1 este mai relevant punctul de rouă sub presiune (PDP), nu un prag generic de RH. În tablouri electrice, riscul de condens se evaluează din temperatură, umiditate și punctul de rouă local.

Vâscozitate (cinematic): Senzori bazați pe oscilația unui element cu frecvența proprie ce variază cu vâscozitatea fluidului în care este imersat. Aplicații nișe: monitorizarea uleiului hidraulic (vâscozitate excesivă = ulei contaminat sau îmbătrânit), control reologic în producția de polimeri și vopsele. Producători: Anton Paar și alți producători de instrumentație de proces.

Conductivitate electrică: electrozii sau celulele inductive pot măsura conductivitatea fluidului ca indicator al concentrației ionice. Pragurile de acceptare sunt specifice procesului și calității apei/soluției; nu se utilizează o valoare generică precum 50 µS/cm pentru a declara apa „contaminată”.

6.6 Viziune industrială ca subsistem de măsurare

Viziunea industrială trebuie proiectată ca un lanț metrologic și mecanic: obiectul și toleranța definesc câmpul vizual și rezoluția necesară; acestea determină camera și optica; montajul stabilește distanța de lucru și rigiditatea; iluminarea controlează contrastul; calibrarea leagă pixelul de coordonata

fizică. Un algoritm performant nu poate compensa un suport flexibil, o perspectivă necontrolată sau o iluminare instabilă.

6.6.1 Componentele unui sistem de viziune

Un sistem de viziune industrială complet integrează patru componente fundamentale, fiecare cu rol distinct în obținerea unei măsurători robuste și repetabile (Figura 6.17).

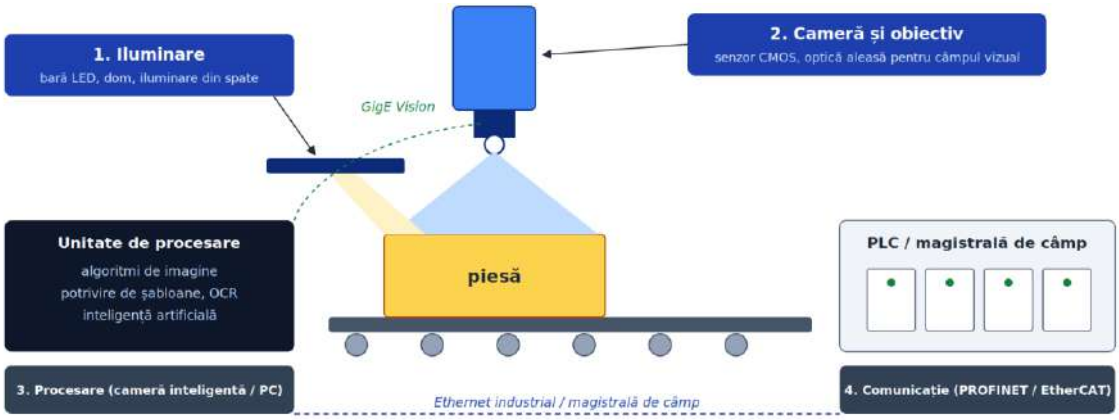


Figura 6.17. Arhitectura unui sistem de viziune industrială: iluminare, cameră și optică, procesare și comunicație.

Componenta 1 - Camera

Senzorul propriu-zis al sistemului. Două mari familii constructive:

- Camerele area-scan achiziționează imagini bidimensionale într-o expunere. Rezoluția și frame rate-ul variază foarte larg între produse și trebuie selectate din câmpul vizual, mărimea defectului, timpul de expunere și interfața de date [113], [114].
- Camerele line-scan achiziționează linii succesive și reconstruiesc imaginea prin mișcarea relativă a obiectului. Numărul de pixeli și frecvența de linie sunt caracteristici ale camerei și trebuie corelate cu viteza benzii și rezoluția spațială cerută [113], [114].

Caracteristicile critice ale camerei sunt rezoluția, dimensiunea pixelului, rata de cadre/linie, timpul de expunere, domeniul dinamic, tipul shutter-ului și interfața. În sistemele moderne predomină senzorii CMOS; alegerea concretă se face din dinamica obiectului și nivelul de lumină, nu din opoziția simplificată CCD versus CMOS.

Componenta 2 - Optica

Lentila care formează imaginea pe senzorul camerei. Caracteristicile critice:

- Distanța focală și formatul senzorului determină câmpul vizual la o distanță de lucru dată. Nu există un interval universal de focale pentru toate aplicațiile industriale; selecția se face prin geometria optică și rezoluția necesară [113].
- Adâncimea de câmp (DOF - Depth of Field): intervalul de distanțe în care obiectul rămâne focalizat. Critic în aplicații cu obiecte de înălțime variabilă.
- Tipul lentilei: standard, telecentrică (pentru metrologie de înaltă precizie - magnificația constantă indiferent de distanța), macro (pentru obiecte mici), zoom (rare în industrie).
- Montura: C-mount (cea mai uzuală) sau CS-mount.

Lentila telecentrică este justificată atunci când variația distanței obiectului ar produce o eroare de perspectivă comparabilă cu toleranța măsurată. Nu există un prag universal de 0,1 mm; alegerea rezultă din câmpul vizual, adâncimea obiectului, rezoluția geometrică și bugetul de eroare.

Dimensionarea geometrică pentru proiectantul mecanic: înainte de alegerea camerei se fixează câmpul vizual (FOV), cea mai mică caracteristică ce trebuie discriminată și distanța de lucru. O estimare preliminară a scării imaginii este $r \approx FOV/N_{pix}$ [mm/pixel]. Caracteristica minimă trebuie să ocupe suficienți pixeli pentru algoritmul și incertitudinea cerute; numărul necesar se validează experimental. Rigiditatea suportului camerei și variația poziției piesei intră în același buget de eroare.

Componenta 3 - Iluminarea

Iluminarea este una dintre componentele decisive ale robusteții unei aplicații de viziune, deoarece determină contrastul caracteristicii căutate și sensibilitatea la variații de suprafață sau lumină ambientală. În locul unei „reguli de 80%", proiectarea trebuie să urmărească reproducibilitatea imaginii: aceeași piesă, în condițiile admise, trebuie să producă aceeași caracteristică vizuală pentru algoritm.

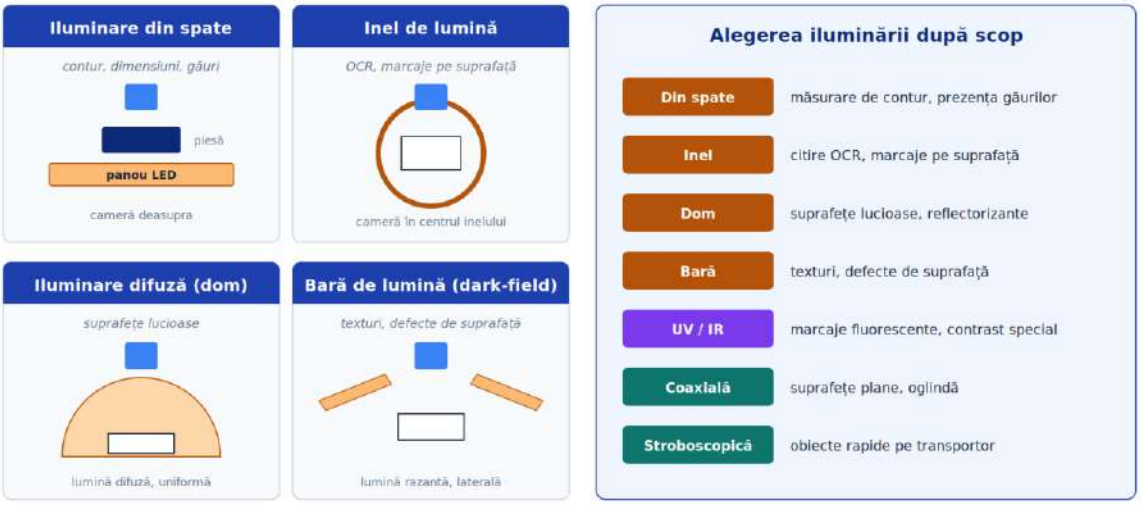


Figura 6.18. Tehnici uzuale de iluminare în viziunea industrială și alegerea lor în funcție de caracteristica urmărită.

Cele patru tehnici fundamentale prezentate în figura 6.18 acoperă majoritatea aplicațiilor industriale:

Backlight: Sursa de lumină plasată în spatele obiectului (pe partea opusă camerei sau în spatele obiectului transparent). Generează silueta neagră a obiectului pe fundal alb strălucitor, ideal pentru măsurări de contur, detecția găurilor, verificarea formei.

Ring light (lumină circulară): Inel de LED-uri montat în jurul lentilei camerei. Iluminare directă pe suprafața obiectului, accentuează textura și caracteristicile suprafeței. Aplicații: citire OCR, citire Data-Matrix, verificare marcaje pe suprafață.

Dome (cupolă): Cupola hemisferică cu LED-uri pe suprafața interioară, iluminând obiectul prin difuzie multiplă. Generează iluminare uniformă fără reflexii direcționale, esențial pentru obiecte lucioase, oglindite (suprafețe metalice cromate, lentile, oglinzi).

Bar light (iluminare laterală): Bare de LED-uri plasate la unghi mic față de suprafață, generând umbre lungi care evidențiază texturile și defectele de suprafață. Tehnica numită dark-field: defectele apar luminoase pe fundal întunecat.

Pe lângă tehnicile de bază există iluminare coaxială, dark-field, UV, IR și stroboscopică. Lungimea de undă, geometria și durata impulsului se aleg din contrastul caracteristicii, viteza obiectului, optică și siguranța aplicației; valorile de timp nu se generalizează [113].

Componenta 4 - Procesarea imaginii

Imaginea poate fi procesată într-o smart camera sau într-un sistem PC/edge cu cameră industrială și software specializat. Arhitectura se alege după complexitatea algoritmului, timpii de ciclu, integrare, mentenabilitate și validare [113], [114].

- Pattern matching: verificarea prezenței sau orientării unui obiect prin comparație cu un model de referință (template). Cea mai uzuală aplicație.
- Blob analysis: detecția și caracterizarea regiunilor conexate de pixeli cu proprietăți similare. Aplicații: numărare obiecte, măsurare arie, centrul de greutate.
- Edge detection și măsurători dimensionale pot utiliza localizare subpixel, dar exactitatea metrologică finală depinde de calibrare, optică, rezoluție geometrică, stabilitatea montajului și incertitudinea sistemului. O valoare universală de ordinul micrometrilor nu este justificată fără configurația concretă [113].
- OCR și citire codbar: recunoașterea automată a caracterelor (Optical Character Recognition) și a codurilor 1D și 2D (DataMatrix, QR, GS1). Esențial în trasabilitate.
- Metodele de machine learning/deep learning pot fi utilizate pentru clasificarea sau segmentarea unor defecte dificil de descris prin reguli. Performanța trebuie demonstrată pe date reprezentative și monitorizată pentru distribuția reală a produsului; maturitatea comercială a instrumentelor nu înlocuiește validarea aplicației [113].

6.6.2 Aplicații în echipamentele de fabricație

Sistemele de viziune sunt utilizate în echipamentele moderne pentru șase mari categorii de aplicații, fiecare cu producători și soluții consacrate:

Tabelul 6.6. Aplicații uzuale ale viziunii industriale în echipamentele de fabricație.

Aplicație	Soluție tipică	Exemplu industrial
Verificare prezență + orientare piese	Smart camera / pattern matching	Stație de asamblare: confirmarea prezenței și orientării mai multor componente
Control dimensional inline	Cameră + optică adecvată + calibrare	Măsurarea cotelor cu trasabilitate și verificarea incertitudinii sistemului
Detecție defecte de suprafață	Cameră + iluminare controlată; algoritm clasic sau ML	Inspecția zgârieturilor, petelor sau defectelor de textură pe suprafețe
Citire DataMatrix / OCR	Smart camera / cititor dedicat	Identificare și trasabilitate în producție, cu validarea ratei de citire
Ghidare robot / bin picking	Senzor 3D (ToF, structured light, stereo etc.)	Localizarea pieselor și estimarea poziției pentru preluare robotizată

Aplicație	Soluție tipică	Exemplu industrial
Inspecție profil / cordon	Profilometru sau cameră 3D	Verificarea geometriei unui cordon ori a unei suprafețe profilate

6.6.3 Selecția sistemului: cameră inteligentă, PC + cameră sau senzor 3D

Decizia inginerească privind tipul de sistem de viziune se bazează pe trei criterii principale: complexitatea aplicației, bugetul și flexibilitatea ulterioară. Tabelul de mai jos sintetizează compromisurile:

Tabelul 6.7. Selecția arhitecturii de viziune în funcție de complexitatea aplicației, flexibilitate și integrare.

Criteriu	Smart camera (cameră de viziune industrială)	PC + camera (Basler + HALCON)	Senzor 3D (de exemplu Sick și alți producători de senzori industriali)
Complexitate setup	Scăzută–medie	Medie–ridicată	Medie
Cost relativ	Scăzut–mediu	Mediu–ridicat, dependent de platformă	Mediu–ridicat, dependent de tehnologie
Flexibilitate	Limitată la funcțiile platformei	Ridicată; software și hardware configurabile	Medie; puternic dependentă de tehnologia 3D
Machine learning	Disponibil pe unele platforme	Disponibil prin biblioteci/framework-uri	Disponibil pe unele platforme
Integrare PLC	Ethernet industrial / I/O / protocoale specifice	Ethernet + gateway/protocol industrial	Ethernet industrial / interfețe specifice produsului
Aplicație tipică	Prezență, OCR, inspecții standardizate	Metrologie și inspecții complexe	Poziție/profil 3D, bin picking

În practică · trasabilitate în producție reglementată

Citirea automată a codurilor 2D este frecvent utilizată pentru identificare și trasabilitate. În industria farmaceutică, cerințele de serializare și cele privind înregistrările electronice trebuie tratate separat: 21 CFR Part 11 se referă la controlul înregistrărilor și semnăturilor electronice, nu la alegerea tehnologiei DataMatrix. Sistemul de viziune se validează pe contrast, geometrie, rată de citire și integrarea cu sistemul de date.

6.7 Integrarea senzorială și IO-Link

Ultima secțiune tratează integrarea dispozitivelor de câmp și rolul IO-Link ca interfață digitală punct-la-punct pentru senzori și actuatoare compatibile. IO-Link extinde interfețele discrete clasice cu schimb bidirecțional de date, parametri, identificare și diagnostic, fără a deveni el însuși o rețea multi-drop de nivel superior [96], [101].

6.7.1 Arhitectura IO-Link

IO-Link este tehnologia punct-la-punct standardizată prin IEC 61131-9:2022 pentru conectarea dispozitivelor simple de câmp la un master (Figura 6.19). Nu este un fieldbus; masterul face legătura dintre porturile IO-Link și rețeaua de nivel superior. Pentru proiectant, valoarea principală este cablarea standardizată, parametrizarea și diagnosticul la nivel de dispozitiv [96], [101].

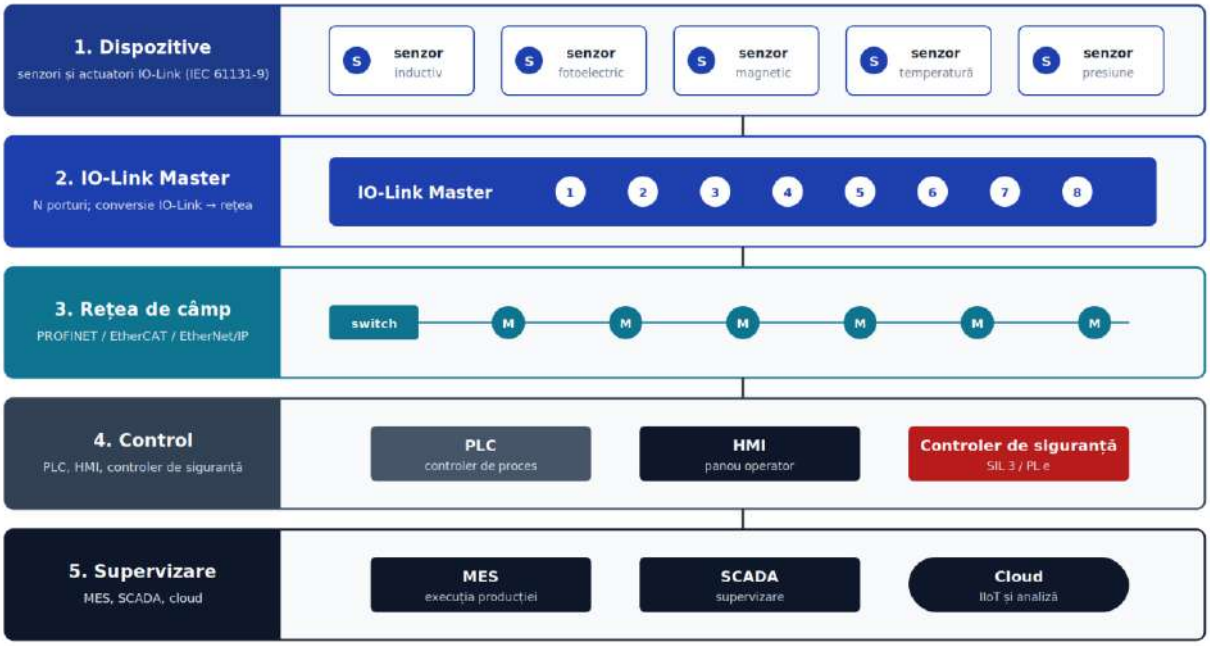


Figura 6.19. Integrarea IO-Link în arhitectura mașinii: dispozitiv, master, rețea, control și supraveghere.

Cele trei niveluri ale arhitecturii

Sistemul IO-Link poate fi descris didactic pe trei niveluri: dispozitiv, master și integrare în rețeaua/controlul mașinii. Aceste niveluri nu reprezintă o ierarhie normativă de tip ISA-95, ci o schemă de integrare utilizată aici [96], [101].

Nivelul dispozitiv. Un IO-Link Device comunică punct-la-punct cu portul masterului prin cablarea prevăzută de IEC 61131-9. Conectorul fizic și clasa portului depind de dispozitiv; cablul neecranat cu trei conductoare este configurația de bază pentru multe dispozitive Class A [96], [101].

Nivelul master. Masterul agregă mai multe porturi IO-Link și le integrează în controler sau în rețeaua mașinii. Numărul de porturi, curentul disponibil și protocolul de nivel superior sunt caracteristici de produs, nu proprietăți fixe ale standardului IO-Link [101].

Nivelul rețea/control/supraveghere: masterele IO-Link comunică prin rețeaua de mașină către PLC. Datele de proces sunt utilizate ciclic în control, iar datele de parametrizare și diagnostic sunt propagate, după nevoie, către HMI/SCADA/MES prin serviciile arhitecturii de automatizare. Figura 6.19 separă aceste niveluri pentru a evita impresia că IO-Link însuși este o rețea până la cloud.

Vitezele IO-Link sunt definite prin trei rate de comunicație COM1, COM2 și COM3 [101].

Standardul definește trei viteze de comunicație:

- COM1: 4,8 kbit/s.
- COM2: 38,4 kbit/s.
- COM3: 230,4 kbit/s [101].

Aceste rate sunt adecvate pentru date de proces și parametrizare ale dispozitivelor de câmp pentru care IO-Link a fost proiectat. Lungimea legăturii și tipul cablului se verifică în specificația IO-Link și în documentația dispozitivului/masterului; nu se compară direct cu throughput-ul brut al unei rețele Ethernet fără a ține cont de arhitectură [96], [101].

6.7.2 Funcții utile ale IO-Link pentru proiectarea echipamentului

1. Parametrizare la distanță

Fiecărui dispozitiv IO-Link îi este asociat un IODD (IO Device Description) care descrie identificarea, parametrii, datele de proces, diagnosticul și caracteristicile de comunicație. IODD-ul este utilizat de instrumentele de configurare și integrare și nu trebuie confundat cu memoria internă a senzorului [101].

2. Diagnostic avansat

Un dispozitiv IO-Link poate furniza, pe lângă datele de proces, parametri și evenimente de diagnostic definite de profilul său și de producător. Nu toate dispozitivele expun aceleași informații; temperatura internă, contoarele, calitatea semnalului sau alte valori trebuie tratate ca exemple posibile [96], [101].

- Temperatura internă: exemplu de valoare suplimentară disponibilă la unele dispozitive; interpretarea sa pentru condition monitoring necesită un model și praguri validate.
- Contor de comutări: disponibil la unele dispozitive și util pentru statistici de utilizare; nu reprezintă singur un predictor universal al duratei de viață.
- Evenimente/erori de comunicație: pot sprijini diagnosticarea cablării și a conectivității, în funcție de informațiile expuse de dispozitiv și master.
- Valori brute sau indicatori de calitate ai semnalului: disponibili la unele dispozitive și utili pentru monitorizarea marjei de detecție, dacă producătorul definește semnificația lor.
- Informațiile de stare disponibile sunt definite prin IODD, profil și implementarea producătorului; nu se presupune existența unei variabile pentru starea LED-ului la toate dispozitivele.

Datele de diagnostic pot alimenta strategii condition-based/predictive atunci când există o relație demonstrată între indicator și modul de degradare. IO-Link furnizează acces la date; nu garantează prin el însuși predicția defectării cu un anumit număr de zile sau săptămâni [101].

3. Înlocuire automată (auto-replacement)

Mecanismul Data Storage al IO-Link poate permite restaurarea parametrilor la înlocuirea unui dispozitiv compatibil, în condițiile definite de master, Device ID, configurație și politica de backup. Înlocuirea fizică, verificarea montajului și validarea funcției rămân activități necesare; avantajul este reducerea parametrizării manuale [101].

4. Valori multiple simultane

Un dispozitiv IO-Link poate furniza mai multe date de proces, parametri și diagnostice prin aceeași legătură, dacă profilul și implementarea produsului le definesște. Tipul și numărul valorilor nu sunt caracteristici universale ale oricărui senzor IO-Link [101].

6.7.3 Aplicare pe SAP și bilanțul senzorial integrat

Pentru a integra exemplele de senzori prezentate în acest capitol în studiul de caz SAP, Figura 6.20 sintetizează arhitectura senzorială conceptuală pentru produsul tub–carcasă. Sunt reprezentate funcțiile de detectare a prezenței componentelor, confirmare a fixării CL1/CL2 și măsurare a forței și deplasării pe axa Z. Selecția senzorilor, amplasarea, parametrii și verificarea lanțului metrologic rămân de stabilit prin proiectare.

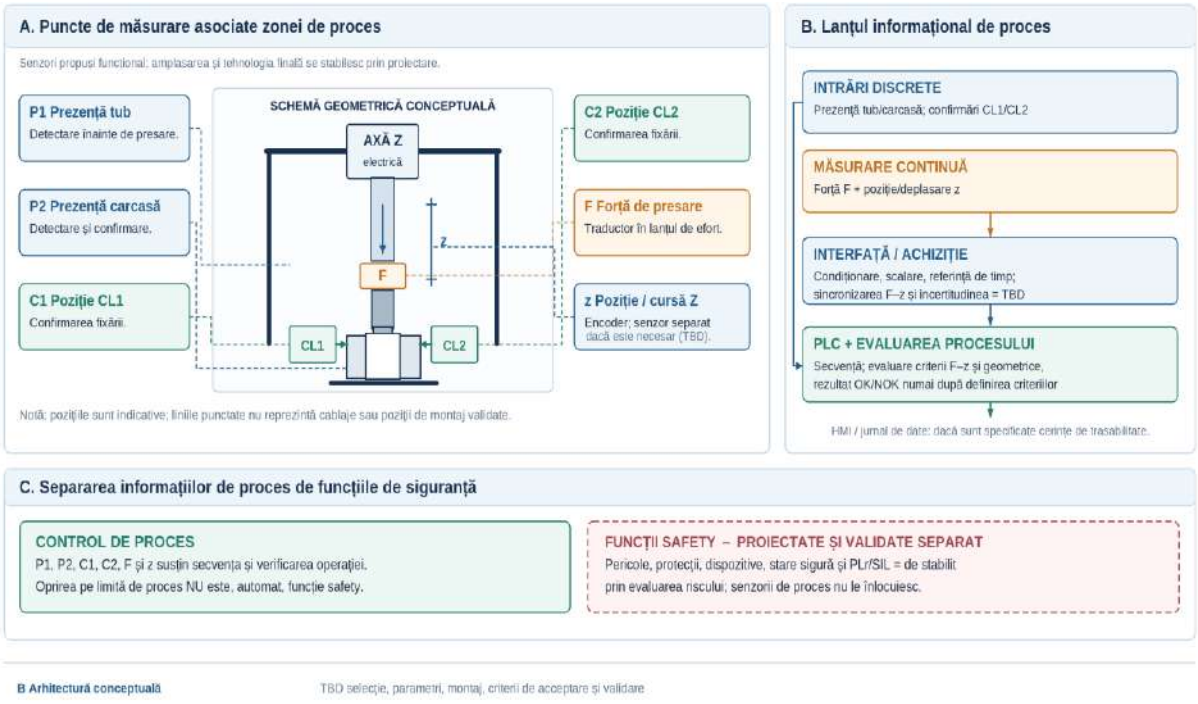


Figura 6.20. Arhitectura senzorială conceptuală a stației SAP: funcții de măsurare și traseul datelor de proces pentru ansamblarea tub–carcasă; funcțiile de siguranță sunt proiectate și validate separat.

P1/P2 indică detectarea prezenței tubului și carcasei, C1/C2 confirmă pozițiile de fixare CL1/CL2, iar F și z desemnează măsurarea forței și a poziției/deplasării axei de presare. Acestea sunt funcții de proces și nu constituie, prin simpla lor existență, funcții de siguranță. Viziunea, măsurarea presiunii, temperaturii și vibrațiilor rămân exemple generale discutate în capitol, nu componente obligatorii ale configurației SAP v1. Criteriile de acceptare F–z și performanțele metrologice necesită determinare și validare.

Pentru trasabilitatea fiecărui ansamblu, datele furnizate de aceste funcții (forța maximă atinsă, cursa la forța maximă și verdictul OK/NOK derivat din curba F–z (§6.4.3)) se înregistrează pe piesă și se transmit sistemului de control, conform arhitecturii din Capitolul 7. Funcțiile de siguranță ale stației folosesc dispozitive proprii, alese și validate conform Capitolului 9, chiar și atunci când măsoară aceeași mărime fizică.

Exemplul rezolvat 6.4. Bilanț senzorial pentru o linie cu 12 stații

Cerință. Linia conține 12 stații similare. Pentru fiecare funcție senzorială se stabilește numărul de dispozitive, interfața și porturile de rezervă.

Inventar. Dacă o stație are 8 funcții senzoriale, rezultă 96 funcții locale. Se adaugă senzorii de transfer dintre stații și câteva măsurări comune la nivel de linie. Inventarul final se construiește din schema funcțională și din layout, nu prin aplicarea unui procent generic de „senzori per stație”.

Dimensionarea IO-Link. Se numără numai dispozitivele efectiv IO-Link. Masterele se dimensionează cu porturi de rezervă și cu verificarea curentului disponibil pe port/cluster, a topologiei Ethernet și a timpului de ciclu. Camerele, feedbackurile rapide de servo și dispozitivele de siguranță pot utiliza alte interfețe.

BOM și validare. BOM-ul senzorial trebuie să conțină: funcție, tip, domeniu, montaj, conector, cablu, interfață, port master/I/O, criteriu de diagnostic și piesă de schimb. Costul se calculează din oferta curentă a proiectului; nu este transferabil între industrii sau ani.

Indicatori de succes. După punerea în funcțiune se urmăresc MTTR pentru defecte senzoriale, rata de false detections, stabilitatea măsurărilor și numărul de înlocuiri. Aceste date validează sau infirmă beneficiul arhitecturii digitale mult mai riguros decât procentele generale de piață.

6.8 Concepte cheie și întrebări de reflecție

6.8.1 Recapitulare: conceptele de bază

Capitolul 6 a tratat senzorica drept subsistem de măsurare al echipamentului: de la definirea cerinței, prin alegerea principiului și montajului, până la achiziție, diagnostic și validarea procesului. Ideea centrală este că performanța se demonstrează la nivelul lanțului complet senzor–mecanică–mediu–control, nu printr-un singur parametru de catalog.

Cele cinci concluzii operative-cheie pe care studenții ar trebui să le rețină:

- Fiecare familie de senzori are un domeniu optim de aplicabilitate; nu există „senzor universal”. Selecția se face din mărimea măsurată, toleranță, dinamică, mediu, montaj, interfață și consecința unei erori de detecție; criteriile trebuie validate pe aplicația reală.
- IO-Link standardizează conexiunea punct-la-punct și poate simplifica parametrizarea, înlocuirea și diagnosticul. Se utilizează atunci când timpul de ciclu și volumul de date sunt compatibile; nu înlocuiește interfețele rapide dedicate feedbackului de servo sau viziunii.
- Curba forță–cursă este un instrument puternic de verificare a procesului de presare. Valoarea ei rezultă din sincronizarea corectă a forței și poziției, din ferestre de toleranță validate și din trasabilitatea rețetei și a piesei.
- În viziunea industrială, geometria optică, rigiditatea montajului, iluminarea și calibrarea fac parte din sistemul de măsurare. Camera sau algoritmul nu pot compensa o imagine instabilă fizic ori o rezoluție geometrică insuficientă.
- Bilanțul senzorial se construiește funcție cu funcție și trebuie corelat cu layout-ul, I/O, rețelele, BOM-ul și mentenanța. Numărul de senzori și ponderea lor în cost diferă puternic între aplicații și nu se tratează ca procente universale.

În capitolul următor (Capitolul 7: Subsistemul de control) sunt tratate componentele care preiau datele senzoriale și le transformă în decizii operaționale: PLC-uri, I/O distribuite, rețele industriale și interfețe HMI.

6.8.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipă. Răspunsurile sintetice apar după fiecare întrebare; pentru exersarea independentă, se recomandă parcurgerea întâi a întrebării fără consultarea răspunsului.

Q1. De ce nu există un „senzor universal” pentru echipamentele de fabricație?
Pentru că selecția depinde de mărimea măsurată, toleranță, dinamică, materialul țintei, mediu, montaj, interfață și consecința unei erori de detecție.
Q2. Ce diferențiază detectarea discretă de măsurarea continuă a poziției?
Detectarea discretă confirmă stări sau poziții definite, în timp ce măsurarea continuă furnizează o valoare pe domeniul de mișcare; alegerea principiului și interfeței depinde de funcția de măsurare.
Q3. De ce curba forță–cursă este relevantă pentru verificarea unei operații de presare?
Pentru că sincronizează informația de forță cu poziția/deplasarea și permite evaluarea procesului în raport cu ferestre de toleranță validate și cu trasabilitatea rețetei/piesei.

Q4. De ce iluminarea și montajul mecanic fac parte din sistemul de viziune industrială?
Pentru că stabilitatea imaginii, geometria optică, rezoluția și calibrarea depind de acestea; algoritmul nu poate compensa în mod general o imagine fizic instabilă sau insuficient rezolvată.
Q5. Ce aduce IO-Link și care este limita sa principală în arhitectura senzorială?
Standardizează conexiunea punct-la-punct și poate simplifica parametrizarea, înlocuirea și diagnosticul, dar trebuie utilizat numai când timpul de ciclu și volumul de date sunt compatibile; nu înlocuiește interfețele rapide dedicate servo-feedbackului sau viziunii.

6.9 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 6.1. Rezoluția unui encoder pe o axă cu șurub cu bile

Enunț. O axă are un șurub cu bile cu pasul de 5 mm/rot și un encoder incremental pe motor cu 2 500 PPR, decodat x4. Repetabilitatea cerută este ±0,01 mm. Determinați rezoluția de numărare și comentați dacă encoderul garantează repetabilitatea.

Răspuns. Rezoluția este 2 500 · 4 = 10 000 conturi/rot, deci 5 mm / 10 000 = 0,5 µm/cont; banda de ±0,01 mm corespunde la ±20 de conturi. Rezoluția electronică este suficientă, dar nu garantează repetabilitatea axei: jocul, rigiditatea transmisiei, eroarea de pas și dilatarea termică acționează după encoder. Repetabilitatea se demonstrează prin măsurare pe sanie, de exemplu cu un comparator sau un interferometru, în condițiile de sarcină reale.

Problema 6.2. Frecvența de eșantionare a curbei forță–cursă

Enunț. Pe stația SAP, faza de presare are cursa de 30 mm și durează 150 ms. Pentru analiza curbei F(s) se cere cel puțin un eșantion la fiecare 0,05 mm de cursă. Determinați frecvența de eșantionare minimă.

Răspuns. Numărul de eșantioane necesar este 30 / 0,05 = 600, obținute în 0,15 s, deci $f_s \geq 600 / 0{,}15 = 4$ kHz. Valoarea presupune o viteză aproximativ constantă; dacă viteza variază, calculul se face pentru viteza maximă din fază. Frecvența aleasă trebuie însoțită de un filtru antialiasing adecvat și de sincronizarea canalelor de forță și poziție.

Problema 6.3. Bugetul de incertitudine al lanțului de măsurare a forței

Enunț. Contribuțiile independente (incertitudini standard, în procente din valoarea citită) sunt: senzor 0,2 %, montaj 0,3 %, efect termic 0,15 %, achiziție 0,1 %, repetabilitate 0,2 %. Determinați incertitudinea compusă și incertitudinea extinsă pentru k = 2 și comparați-le cu cerința P-02 (eroare ≤ 2 % din valoarea indicată).

Răspuns. $u_c = \sqrt{(0{,}2^2 + 0{,}3^2 + 0{,}15^2 + 0{,}1^2 + 0{,}2^2)} = \sqrt{0{,}2025} \approx 0{,}45$ %, iar $U = 2 \cdot u_c \approx 0{,}9$ %; la 8 kN, $U \approx 72$ N. Cerința de 2 % este satisfăcută, dar raportul 2 / 0,9 ≈ 2,2 este sub ținta uzuală de 4:1 pentru decizii de conformitate fără risc mare de clasificare greșită. Contribuția dominantă este montajul; îmbunătățirea alinierii celulei de forță are cel mai mare efect.

7 Subsistemul de control

PLC, rețele industriale, OPC UA și interfețe operator

Despre acest capitol

Capitolul 6 a definit sursele de informație ale mașinii. Capitolul de față tratează subsistemul care le prelucrează și comandă acționările: controlerul programabil, rețelele industriale, interfața operator-mașină și integrarea verticală prin OPC UA.

Perspectiva rămâne cea a proiectantului de echipament: nu programarea propriu-zisă, ci deciziile de arhitectură cu consecințe asupra mașinii: alegerea și dimensionarea controlerului, bugetul temporal al task-urilor, topologia rețelei, asocierea I/O și definirea hardware-ului. Studiul de caz aplică aceste decizii pe arhitectura de control a stației SAP.

La final, cititorul trebuie să poată justifica o arhitectură de control pentru un echipament dat, să estimeze bugetul temporal al ciclului de comandă și să formuleze lista I/O și cerințele de rețea necesare echipei de automatizare.

Standarde și referințe normative aplicabile

IEC 61131-3:2025, limbajele ST, LD și FBD; SFC ca elemente de structurare secvențială.

IEC 61158 / IEC 61784: rețele industriale și profile de comunicație; IEC 61784-3:2021+A1:2024 pentru comunicații de siguranță funcțională, unde este aplicabil.

IEC 62541 series: OPC UA; IEC 62541-1:2025 pentru concepte, IEC 62541-2:2026 pentru modelul de securitate și IEC 62541-3:2025 pentru Address Space.

IEC 62061:2021+A1:2024+A2:2026 și ISO 13849-1:2023, sisteme de comandă legate de siguranță; IEC 61508: cadrul general de siguranță funcțională.

ISO 13850:2015, funcția de oprire de urgență; IEC 60204-1:2016+A1:2021, echipamentul electric al mașinilor.

ISO 9241-110:2020, ISO 9241-112:2025 și ISO 9241-115:2024, principii de interacțiune, prezentarea informației și proiectarea navigării; ISO 9241-410:2008+Amd 1:2012 / ISO 9241-420:2011, dispozitive fizice de intrare.

EEMUA Publication 191, Edition 4 (2024) și IEC 62682:2022, managementul alarmelor, cu adaptarea cerințelor la aplicația concretă.

IEC 62443 series: securitatea sistemelor de automatizare și control industrial, inclusiv principiile de zonare și control al accesului.

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să descrie rolul subsistemului de control și arhitectura pe niveluri ISA-95 a unei aplicații industriale;
- să aleagă și să dimensioneze un controler programabil, ținând cont de task-uri și de bugetul temporal al ciclului;
- să compare rețelele industriale (fieldbus și Industrial Ethernet) și să aleagă topologia potrivită;
- să explice rolul OPC UA în integrarea verticală și să specifice cerințele pentru interfața operator-mașină;
- să întocmească asocierea I/O și definirea hardware-ului pentru un echipament de fabricație.

Cunoștințe prealabile

Capitolul se sprijină pe Capitolele 4–6, din care provin actuatoarele și senzorii pe care controlul îi comandă și îi citește. Sunt utile noțiuni introductive de logică digitală și de rețele de calculatoare: adresare, topologii și protocoale.

Glosar de termeni și acronime

Acronimele și termenii tehnici utilizați pe parcursul capitolului sunt definiți la prima apariție și recapitulați în tabelul de mai jos pentru consultare rapidă.

Termen	Definiție
PLC	engl.: Programmable Logic Controller, controler industrial pentru logică, secvențe, reglare și coordonarea I/O; platformele moderne pot combina task-uri ciclice, periodice, de eveniment, motion și siguranță funcțională.
IPC	engl.: Industrial PC, calculator industrial care poate găzdui HMI, viziune, analiză sau, cu runtime real-time adecvat, chiar funcții de control; alegerea PLC/IPC se face din cerințele aplicației.
HMI	engl.: Human-Machine Interface, interfața operator–mașină pentru stare, comandă, diagnostic, rețete și alarme; funcțiile de siguranță nu se substituie prin controale software obișnuite.
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, sistem de supraveghere și achiziție de date la nivel de linie/fabrică, agregând datele de la multiple PLC-uri.
MES	Manufacturing Execution System, sistem pentru managementul operațiunilor de fabricație; în funcție de implementare poate integra rețete, trasabilitate, stări de producție și indicatori precum OEE.
ERP	Enterprise Resource Planning, sistem pentru procesele de business ale întreprinderii. În modelarea IEC 62264/ISA-95 este asociat nivelului business (Level 4), nu controlului direct al mașinii.

Termen	Definiție
DI / DO	Digital Input / Digital Output, semnale digitale binare 24V DC tipic în industrie.
AI / AO	Analog Input / Analog Output, semnale analogice continue, tipic 0-10 V sau 4-20 mA.
PII / PIQ	engl.: Process Image Input / Output, zone de memorie utilizate de multe PLC-uri pentru imaginea de proces a intrărilor și ieșirilor; accesul direct sau actualizările sincronizate pot exista în funcție de platformă.
CPU	Central Processing Unit, unitatea de procesare a PLC-ului care execută programul utilizator.
F-CPU	engl.: Failsafe CPU, controler sau CPU certificat pentru executarea funcțiilor de siguranță conform arhitecturii producătorului și nivelului cerut; redundanța internă nu este o proprietate universală.
SIL	engl.: Safety Integrity Level, nivel discret de integritate a siguranței definit în IEC 61508. Pentru mașini, cerințele funcției se stabilesc prin standardul aplicabil, de exemplu IEC 62061, pe baza evaluării riscului.
PL	Performance Level, nivelul de performanță (PL a-e) conform ISO 13849-1 pentru funcții de siguranță în mașini.
IEC 61131-3	IEC 61131-3:2025, standard pentru limbajele controlerelor programabile: Structured Text (ST), Ladder Diagram (LD) și Function Block Diagram (FBD); SFC oferă elemente pentru structurarea programelor secvențiale.
IEC 62541	Familia de standarde pentru OPC Unified Architecture (OPC UA); IEC 62541-1:2025 prezintă conceptele, IEC 62541-2:2026 modelul de securitate, iar IEC 62541-3:2025 definește Address Space.
PROFINET	PROFINET, familie Industrial Ethernet standardizată în cadrul IEC 61158/61784, utilizată pentru I/O, diagnostic și, în configurații adecvate, control sincron.
EtherCAT	EtherCAT, tehnologie Industrial Ethernet cu procesare on-the-fly și sincronizare distribuită, utilizată frecvent în aplicații motion și I/O cu cerințe temporale ridicate.
EtherNet/IP	EtherNet/IP, tehnologie Industrial Ethernet bazată pe Common Industrial Protocol (CIP), cu profile pentru I/O, motion și safety în ecosistemul ODVA.
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture, standardul deschis IEC 62541 pentru comunicație semantică Industry 4.0; address space, securitate end-to-end.
NRT / RT / IRT	Termeni utilizați în ecosistemul PROFINET pentru trafic necritic temporal, Real-Time și Isochronous Real-Time; performanța concretă depinde de configurația sistemului.

Termen	Definiție
LD / FBD / ST / SFC	IEC 61131-3:2025: Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD), Structured Text (ST); Sequential Function Chart (SFC) pentru structurarea secvențială. Instruction List (IL) aparține edițiilor anterioare și poate fi întâlnit în sisteme legacy.
Watchdog	Mecanism de supraveghere a timpului de execuție; depășirea limitei configurate declanșează reacția definită de platformă și proiect, de la diagnostic până la oprirea task-ului sau a controlerului.
Jitter	Variația timpului efectiv de actualizare sau execuție față de valoarea nominală. Un jitter redus facilitează bugete temporale mai stricte, dar performanța controlului depinde de întregul lanț senzor–rețea–controler–actuator.
EEMUA 191	EEMUA Publication 191, Edition 4 (2024), ghid de bună practică pentru filosofia, proiectarea, operarea și îmbunătățirea sistemelor de alarmare.
ISO 9241	Familie de standarde pentru ergonomia interacțiunii om–sistem. ISO 9241-110:2020 tratează principiile de interacțiune, ISO 9241-112:2025 prezentarea informației, ISO 9241-115:2024 proiectarea interacțiunii și navigării, iar ISO 9241-410/420 dispozitivele fizice de intrare.
Alarm flooding	Situație în care numărul și dinamica alarmelor depășesc capacitatea operatorului de a le evalua și trata corect; se controlează prin raționalizare, prioritizare și monitorizarea performanței.
Companion Specification	Model de informație OPC UA standardizat pentru un domeniu sau o clasă de echipamente; standardizează tipuri, semantică și relații, fără a impune aceleași NodeId-uri locale tuturor instanțelor.
UMATI	engl.: universal machine technology interface, comunitate și marcă de interoperabilitate pentru promovarea unei implementări coerente a OPC UA în construcția de mașini; nu este ea însăși o specificație OPC UA.
EPLAN	Platformă CAD/CAE pentru proiectarea electrică. Schimbul de date cu mediul PLC poate fi automatizat în anumite configurații și fluxuri de lucru, dar trebuie verificat pentru instrumentele și versiunile concrete.
OEE	Overall Equipment Effectiveness, indicator compus din Disponibilitate × Performanță × Calitate; țintele se stabilesc pentru procesul și organizația concretă.
BOM	Bill of Materials: listă structurată de materiale/componente pentru configurația controlată; conținutul și nivelul de detaliu depind de procesul organizației.
ISA-95	Standardul IEC 62264 pentru ierarhia funcțională a unei fabrici: nivel 0 (câmp) → nivel 4 (ERP).
MRP	engl.: Media Redundancy Protocol, mecanism de redundanță utilizat în anumite topologii PROFINET; timpul de recuperare și compatibilitatea se verifică pentru configurația concretă.

Termen	Definiție
SRP/CS	engl.: Safety-Related Parts of Control Systems, părți ale sistemului de comandă care realizează funcții de siguranță, în sensul ISO 13849.
SIL / maximum SIL	SIL (Safety Integrity Level) exprimă nivelul de integritate cerut/realizat pentru o funcție de siguranță. IEC 62061:2021 a înlocuit terminologia SILCL cu „maximum SIL” pentru capabilitatea unui subsistem; SILCL poate apărea în documentație legacy.
FAT / SAT	engl.: Factory Acceptance Test / Site Acceptance Test, test de acceptanță la furnizor, respectiv la amplasamentul beneficiarului.
OT / IT	engl.: Operațional Technology / Information Technology, domeniul sistemelor de control industrial, respectiv al sistemelor informatice; integrarea lor necesită segmentare și politici de acces.
MOC	engl.: Management of Change, proces controlat pentru evaluarea, aprobarea și documentarea modificărilor tehnice sau funcționale.

Harta capitolului

Parcursul capitolului: §7.1 Rolul subsistemului de control; §7.2 Controlerul programabil (PLC), arhitectură, task-uri și buget temporal; §7.3 Rețele industriale, fieldbus și Industrial Ethernet; §7.4 OPC UA și integrare verticală; §7.5 Interfața operator-mașină (HMI); §7.6 Asocierea I/O și definirea hardware-ului; §7.7 Studiu de caz integrat, arhitectura de control pentru o stație de presare SAP; §7.8 Concepte cheie și aplicații pe proiectul SAP.

7.1 Rolul subsistemului de control

Subsistemul de control reprezintă „creierul” echipamentului de fabricație: el citește semnalele primite de la senzori (subsistemul tratat în Capitolul 6), evaluează logica procesului în funcție de starea curentă și de valorile de referință (setpoint-uri) și comandă actuatoarele electrice (Capitolul 4) și pneumatice/hidraulice (Capitolul 5). Fără controler, toate celelalte subsisteme rămân componente izolate; cu controler, ele formează un echipament coerent care răspunde predictibil la stimulii din proces și la comenzile operatorului.

În proiectarea unui echipament, controlerul nu se selectează după cotă de piață, ci după funcțiile procesului, numărul și tipul semnalelor, cerințele temporale, motion, siguranță funcțională, diagnostic, standardul clientului și mentenabilitate. Alegerea platformei trebuie justificată în raport cu arhitectura mașinii și cu ecosistemul instalației în care aceasta va fi integrată.

Capitolul abordează subsistemul de control din perspectiva proiectantului de echipament: transformarea ciclului mecanic într-o secvență de stări și tranziții; definirea I/O și a interblocărilor; dimensionarea PLC-ului și a arhitecturii hardware; separarea controlului de proces de funcțiile de siguranță; alegerea rețelei; proiectarea HMI și a alarmelor; integrarea datelor prin OPC UA și verificarea prin punere în funcțiune, FAT și SAT (Figura 7.1).

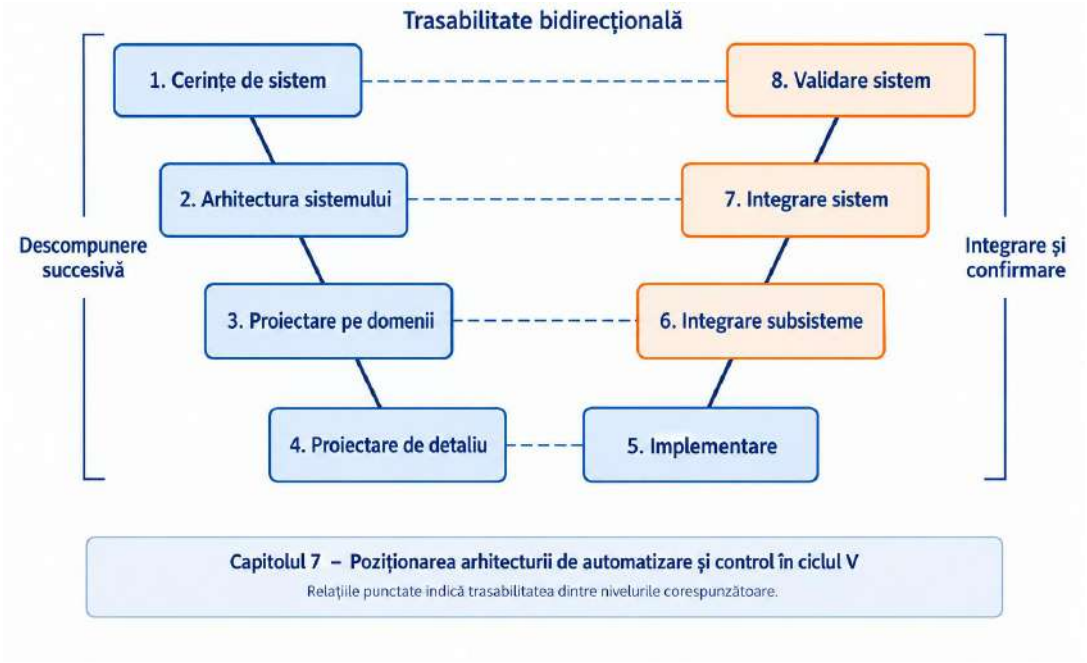


Figura 7.1. Poziționarea subsistemului de control în modelul V al dezvoltării sistemului mecatronic.

Subsistemul de control nu se proiectează izolat. El primește constrângeri de la mecanică, acționări și senzori și, la rândul său, impune cerințe de timp, adresare, diagnostic și interblocare. Proiectarea este concurentă și iterativă: modificarea cursei unui actuator, a timpului de ciclu sau a conceptului de siguranță poate schimba senzorii, I/O-ul, task-urile PLC și HMI-ul.

7.1.1 De la ciclul mecanic la secvența de control

Pentru proiectantul mecanic, primul artefact de control nu este codul PLC, ci descrierea secvenței tehnologice. Fiecare stare a mașinii trebuie asociată cu: acțiunea mecanică, senzorii care confirmă finalizarea, ieșirile comandate, interblocările și reacția la defect. O tranziție este permisă numai când condiția procesului și condițiile de siguranță sunt îndeplinite.

Exemplu pentru o stație de presare: Așteptare → Detectare piesă → Fixare → Confirmare fixare → Apropiere → Presare → Validare forță–cursă → Retragere → Deblocare → Evacuare. Fiecare tranziție trebuie să aibă o condiție explicită, un timeout și o reacție la defect; diagrama devine baza pentru mașină de stări/SFC, lista I/O, interblocări și testele de punere în funcțiune (Figura 7.2).



Figura 7.2. De la ciclul mecanic la mașină de stări; tranzițiile sunt condiționate de confirmări, interblocări și timeout-uri.

Matricea I/O funcțională a stației de presare folosite ca exemplu este prezentată în Tabelul 7.1.

Tabelul 7.1. Matrice I/O funcțională pentru exemplul stației de presare.

Funcție mecanică	Intrare / confirmare	Ieșire / comandă	Interblocare de proces	Reacție la defect
Detectare piesă	senzor piesă	–	stație disponibilă	timeout / piesă absentă
Fixare	senzor(e) poziție fixare	electrovalvă / actuator	piesa prezentă	oprire secvență + diagnostic
Apropiere	poziție axă / cap cursă	comandă axă / cilindru	fixare confirmată	retragere controlată / defect
Presare	forță + cursă / poziție	comandă presă / servo	fixare confirmată + stare permisă	NOK + retragere / defect
Evacuare	poziție mecanism transfer	actuator transfer	presa retrasă + deblocare	oprire evacuare + diagnostic

7.1.2 Arhitectura pe niveluri: ISA-95 și OPC UA

Modelul ISA-95 (IEC 62264) structurează funcțiile fabricii pe niveluri, de la procesul fizic și control până la operațiunile de producție și planificarea întreprinderii. Pentru proiectantul unei mașini, această structură este utilă pentru delimitarea responsabilităților: buclele rapide și interblocările rămân local în controlul mașinii, iar datele agregate și comenzile de producție sunt schimbate controlat cu nivelurile superioare [115].

OPC UA facilitează interoperabilitatea semantică între aceste niveluri prin modele de informație și servicii standardizate (Figura 7.3). Aceasta nu înseamnă acces necontrolat „de la orice nivel la orice nivel”: zonarea OT/IT, segmentarea rețelei, firewall-urile, identitatea aplicațiilor, autentificarea și autorizarea rămân componente ale arhitecturii. Pentru proiectele cu cerințe de cybersecurity, seria IEC 62443 oferă cadrul de sistem bazat pe zone, conduits și cerințe de securitate. Integrarea verticală trebuie să păstreze local buclele și funcțiile critice de control [116]–[117].

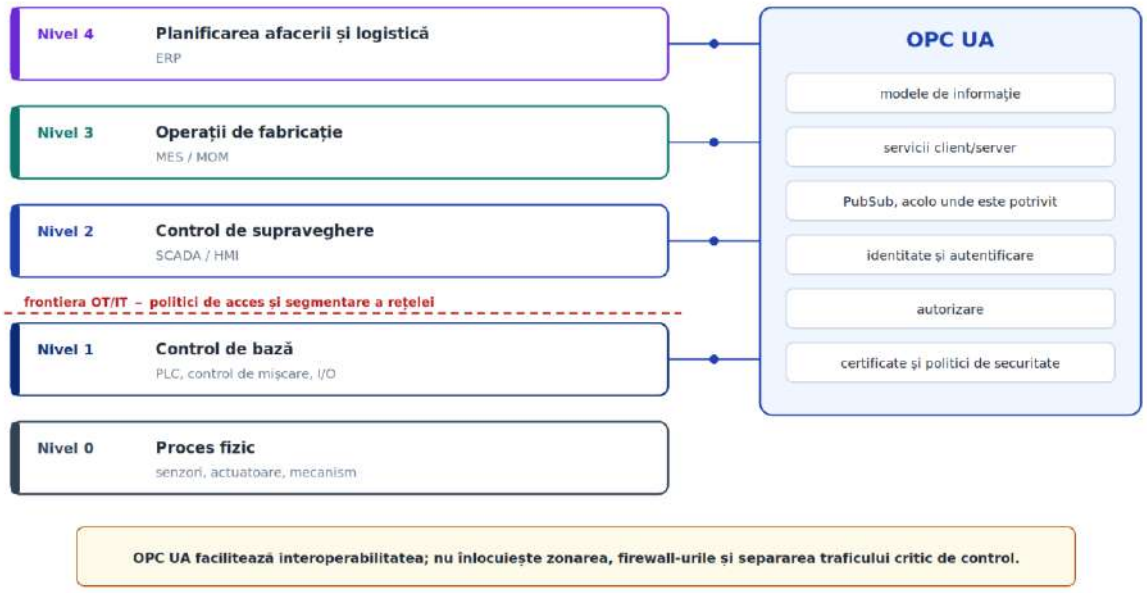


Figura 7.3. ISA-95 și integrarea semantică prin OPC UA; interoperabilitatea nu înlocuiește segmentarea OT/IT și controlul accesului.

Standarde și repere aplicabile capitolului

Pentru proiectarea subsistemului de control sunt relevante, între altele, IEC 61131-3:2025 pentru limbajele controlerelor programabile; IEC 61158/61784 pentru comunicații industriale; familia IEC 62541, inclusiv IEC 62541-1:2025, IEC 62541-2:2026 și IEC 62541-3:2025, pentru OPC UA; IEC 62061:2021+A1:2024+A2:2026 și ISO 13849-1:2023 pentru funcțiile de siguranță ale mașinilor; ISO 13850:2015 pentru oprirea de urgență; familia ISO 9241 pentru interacțiunea om–sistem; EEMUA Publication 191 și IEC 62682:2022 pentru managementul alarmelor; respectiv seria IEC 62443 pentru securitate industrială.

7.2 Controlerul programabil (PLC): arhitectură, task-uri și buget temporal

PLC-ul a evoluat de la înlocuitorul logicii cu relee la o platformă de automatizare care poate integra I/O, motion, funcții de siguranță, comunicații și diagnostic. Pentru proiectantul de echipament, importantă nu este cronologia tehnologiei, ci modul în care task-urile, I/O-ul și rețelele satisfac bugetul temporal al procesului.

7.2.1 Modelul ciclic și execuția task-urilor

Modelul clasic de scan ciclic rămâne util didactic: intrările sunt eșantionate sau actualizate, logica este executată, iar comenzile sunt propagate către ieșiri și servicii. Într-un PLC modern însă, comportamentul temporal rezultă din configurația task-urilor, mecanismelor I/O și comunicațiilor. Pot coexista task-uri ciclice, periodice, declanșate de evenimente, task-uri motion și task-uri de siguranță; predictibilitatea se analizează pentru task-ul care controlează efectiv procesul, nu pentru o presupusă succesiune universală în patru faze [118], [119].

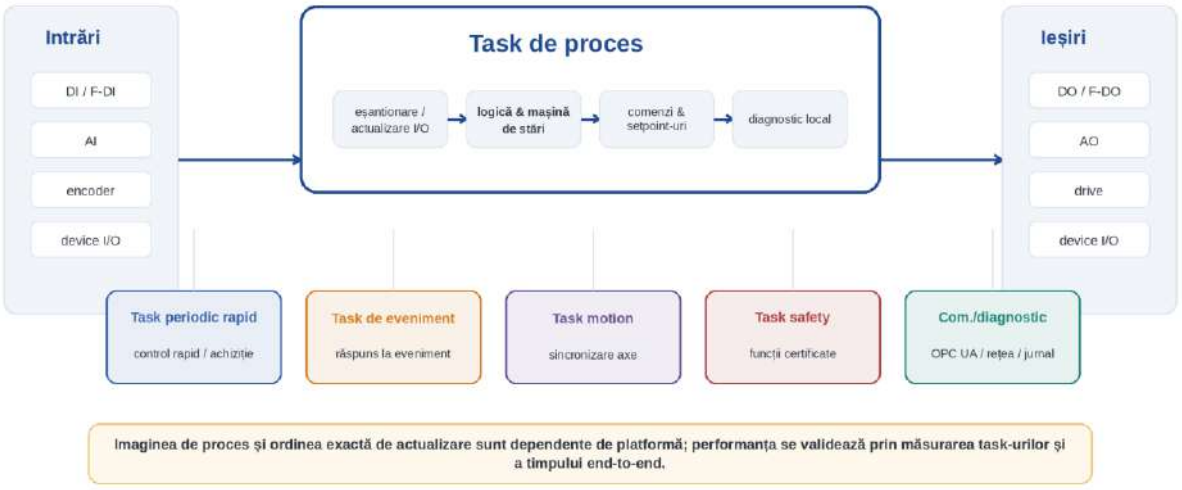


Figura 7.4. Execuția controlului PLC: task de proces, I/O și task-uri specializate; ordinea și mecanismele concrete depind de platformă.

Actualizarea intrărilor poate popula o imagine de proces (Process Image Input) sau poate utiliza mecanisme de acces sincron/direct, în funcție de platformă (Figura 7.4). Imaginea de proces oferă consistență pe durata unei execuții ciclice, dar nu trebuie prezentată ca singurul mecanism posibil. Pentru semnale rapide, encodere sau motion se folosesc frecvent căi dedicate și sincronizate.

Execuția logicii poate cuprinde secvențe, interblocări, funcții tehnologice, reglare și diagnostic. Durata nu se estimează numai din numărul instrucțiunilor booleene. Predimensionarea trebuie să includă toate contribuțiile relevante, iar rezultatul se verifică ulterior prin măsurare online pe configurația reală.

$$t_{\text{task}} = t_{\text{logică}} + t_{\text{I/O}} + t_{\text{com}} + t_{\text{motion}} + t_{\text{safety}} + t_{\text{diagnostic}} + t_{\text{rezervă}} \tag{7.1}$$

Actualizarea ieșirilor și comunicația sunt coordonate de sistemul de execuție al controlerului. Watchdog-ul supraveghează respectarea timpului maxim admis și declanșează reacția definită de platformă și configurație (diagnostic, defect, oprirea task-ului sau a CPU-ului). Valorile de timp se verifică în documentația controlerului și prin măsurare în aplicația reală.

> **Scenariu didactic · buget temporal al unui task**
> Valorile de mai jos sunt exemple de proiect, nu constante de platformă. Pentru o stație secvențială se poate impune, de exemplu, un task de proces de 10 ms dacă timpul end-to-end cerut de mecanism permite această alegere. Pentru o axă servo sincronizată poate fi necesar un task motion de ordinul milisecundei sau submilisecundei. Cerința se derivă din dinamica mecanismului, timpul de reacție admis, actualizarea I/O/rețelei și jitter; validarea finală se face prin măsurare pe echipamentul real.

7.2.2 Tipologie hardware: modular, compact, distribuit

La nivel de arhitectură hardware, PLC-urile industriale se împart în trei categorii principale, ilustrate comparativ în Figura 7.5. Alegerea între ele este una dintre primele decizii de proiectare ale subsistemului de control și ea condiționează atât costul echipamentului, cât și complexitatea cablajului electric, scalabilitatea ulterioară și viteza de diagnostic.

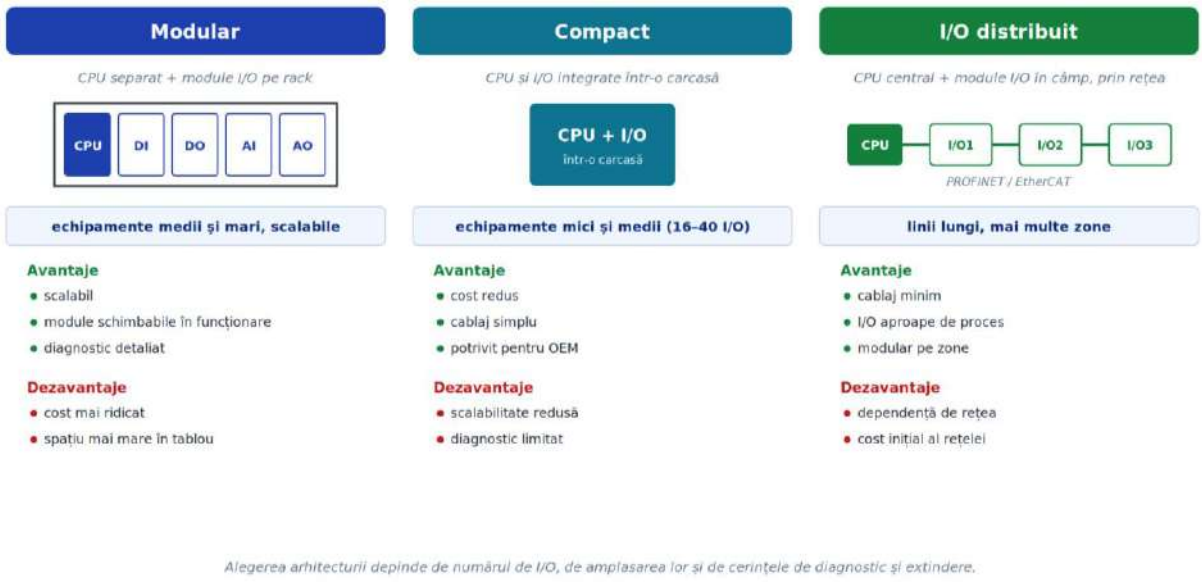


Figura 7.5. Arhitecturi PLC compactă, modulară și cu I/O distribuit; selecția se face din cerințele echipamentului.

PLC-urile modulare separă CPU-ul de modulele I/O și permit configurarea funcțională pe rack sau magistrală internă. Sunt potrivite când proiectul cere extensibilitate, module tehnologice, diagnostic avansat sau segmentare pe zone. Hot-swap, redundanța și limitele de I/O nu sunt proprietăți universale și se verifică pentru familia concretă.

PLC-urile compacte integrează CPU-ul și o parte din I/O într-o carcasă și sunt potrivite pentru echipamente cu funcționalitate stabilă și număr moderat de semnale. Posibilitățile de extensie, motion, safety și diagnostic diferă semnificativ între familii, motiv pentru care selecția se face din cerințe, nu dintr-o categorie de preț sau dimensiune.

I/O-ul distribuit păstrează controlul central, dar mută modulele de achiziție/comandă aproape de senzori și actuatoare. Avantajul principal pentru proiectantul mașinii este reducerea traseelor individuale și o segmentare mai clară pe module/zone. Economia reală de cablaj și timpul de diagnostic se verifică în amplasament și în BOM, fără procente universale.

Tabelul 7.2 sintetizează deciziile tipice de arhitectură în funcție de tipul de echipament.

Tabelul 7.2. Exemple de potrivire a arhitecturii PLC cu scara și funcțiile echipamentului; intervalele numerice nu constituie limite universale.

Tip echipament	Scară I/O orientativă	Arhitectura recomandată	Argumentare
Bancuri de testare / dispozitive simple	mică	PLC compact	simplitate, amprentă redusă
Mașini OEM standardizate	mică–medie	PLC compact + extensii	replicabilitate și cost de integrare
Stații de presare / asamblare	medie	PLC modular	extensibilitate, module tehnologice, diagnostic
Linii multi-stație	medie–mare / pe zone	PLC modular + I/O distribuit	segmentare pe zone și trasee de cablu mai scurte
Echipamente extinse / multizonă	mare	modular + I/O distribuit	scalabilitate și mentenabilitate
Mașini-unelte / mecanisme cu axe sincronizate	I/O + axe	PLC/NC sau motion controller	funcții motion și integrarea drive-urilor
Celule robotizate	I/O + interfețe robot	PLC, controller robot și/sau IPC	coordonare de celulă, handshake și integrare

7.2.3 Criterii de selecție a CPU-ului

Selecția CPU-ului și a I/O-ului pornește de la cerințele funcționale și temporale ale mașinii. Criteriile de mai jos sunt evaluate împreună; ordinea lor depinde de aplicație.

- Inventarul I/O și tipurile de canale: DI/DO, AI/AO, I/O de siguranță, encodere, axe, dispozitive pe rețea și canale de diagnostic. Rezerva pentru extindere este o decizie de proiect documentată; procentul se justifică prin probabilitatea de modificare, modularitatea mașinii și costul unei extinderi ulterioare.
- Bugetul temporal: se stabilește perioada task-ului relevant și se repartizează timpul pentru logică, I/O, comunicații, motion, siguranță funcțională, diagnostic și rezervă. Timpul unei instrucțiuni poate fi un indicator de comparație, dar nu dimensionează singur CPU-ul.
- Suportul pentru funcții de siguranță: necesitatea unei platforme failsafe rezultă din funcțiile de siguranță definite prin evaluarea riscului. Pentru fiecare funcție se stabilește starea sigură și nivelul cerut (PLr conform ISO 13849-1 sau SIL conform IEC 62061, după cadrul ales); capabilitatea subsistemelor din IEC 62061 se exprimă prin maximum SIL. Existența unui buton E-stop nu stabilește singură nivelul de performanță cerut [3], [4].

- Conectivitatea: rețele de I/O și motion, protocoale safety over network, OPC UA și integrarea cu sistemele existente ale clientului. Compatibilitatea trebuie verificată la nivel de dispozitiv, profil și versiune.
- Ecosistemul de inginerie și mentenanță: mediul de configurare/programare, bibliotecile, instrumentele de diagnostic, competențele echipei clientului și disponibilitatea pieselor de schimb. Acest criteriu poate fi decisiv pentru costul ciclului de viață.

În locul unei clasificări după mărci și cote de piață, este mai utilă compararea familiilor de arhitecturi după modul de integrare în mașină (Tabelul 7.3). Tabelul 7.2 sintetizează aceste opțiuni fără a transforma selecția într-o recomandare comercială.

Tabelul 7.3. Familii uzuale de arhitecturi de control industrial și caracteristicile lor distinctive.

Categorie	Arhitectură	Punct forțe	Utilizare tipică
PLC compact	CPU + I/O integrate	simplitate, amprentă mică	mașini standardizate, bancuri
PLC modular	CPU + module pe rack	extensibilitate, diagnostic	stații și linii complexe
PLC + I/O distribuit	control central + I/O în câmp	reducerea cablajului	linii lungi, zone modulare
Technology / motion PLC	PLC cu funcții motion dedicate	sincronizare axe	ambalare, manipulare, axe servo
SoftPLC pe IPC	runtime real-time pe IPC	calcul + integrare software	motion complex, viziune, analytics
Controler integrat	PLC + motion + safety / vision, după platformă	integrare funcțională	mașini mecatronice compacte

7.2.4 Control normal, interblocări și funcții de siguranță

Controlul de proces și controlul de siguranță trebuie separate conceptual încă din proiectare. Logica de proces urmărește productivitatea și calitatea; funcția de siguranță urmărește aducerea sau menținerea mașinii într-o stare sigură atunci când apare un eveniment periculos.

Pentru fiecare funcție de siguranță se documentează: pericolul controlat, evenimentul declanșator, starea sigură, timpul maxim de reacție, nivelul cerut rezultat din evaluarea riscului (PLr sau SIL, după standardul aplicabil), arhitectura și dispozitivele implicate, precum și testele de validare. În IEC 62061:2021, capabilitatea unui subsistem este exprimată prin maximum SIL; termenul SILCL poate fi întâlnit în documentația bazată pe ediții anterioare. Un PLC/CPU failsafe nu conferă singur nivelul de integritate întregii funcții [4], [120].

evaluare risc → funcție de siguranță → PLr / SIL cerut → arhitectură și maximum SIL al subsistemelor → verificare și validare

Interblocările de proces (de exemplu „presa nu coboară dacă fixture-ul nu este confirmat”) pot proteja echipamentul și produsul, dar nu trebuie confundate automat cu funcții de siguranță. Doar funcțiile identificate prin evaluarea riscului intră în SRP/CS și se validează conform standardului aplicabil.

Modurile de funcționare (de exemplu Automat, Manual, Reglaj/Mentenanță) se tratează ca stări controlate ale mașinii. Schimbarea modului trebuie să definească explicit ce comenzi sunt permise, ce

condiții trebuie îndeplinite și ce funcții de siguranță rămân active; un mod de mentenanță nu reprezintă o derogare implicită de la cerințele de siguranță.

7.2.5 Panoul electric: integrarea constructivă

Selecția CPU-ului și a modulelor I/O răspunde la întrebarea ce hardware este necesar. Rămâne însă întrebarea unde și cum se integrează acest hardware în mașină. Panoul electric conține controlerul, sursele de alimentare, protecțiile, aparatajul de comutație, terminalele și, după caz, drive-urile. Din perspectiva proiectantului mecanic, cabinetul este o interfață constructivă ce trebuie corelată cu anvelopa, disiparea termică, accesul pentru mentenanță, traseele de cablu, vibrațiile și mediul de utilizare; dimensionarea electrică detaliată rămâne în responsabilitatea disciplinei de specialitate.

Selecția cabinetului pornește de la volumul componentelor, disiparea termică, accesul pentru mentenanță, mediul de utilizare, intrarea cablurilor și rezerva pentru modificări. Dimensiunile și seriile comerciale sunt date de catalog; pentru proiectantul mecanic contează anvelopa, masa, accesul și modul de fixare în ansamblul mașinii.

Gradul de protecție IP conform IEC 60529 se stabilește din expunerea reală la praf, apă și procedurile de curățare. Nu există un „IP minim” universal pentru toate fabricile. Creșterea etanșeității poate reduce schimbul termic natural și poate impune o soluție de răcire, motiv pentru care IP și managementul termic se proiectează împreună.

Disiparea termică este o interfață directă între proiectarea electrică și mecanică. Puterile disipate ale PLC-ului, surselor și drive-urilor se preiau din documentația componentelor, se însumează pentru scenariul de sarcină și se verifică față de temperatura admisă în cabinet. Convecția naturală, ventilatoarele, schimbătoarele de căldură și climatizarea se dimensionează prin calcul sau software-ul producătorului, nu prin praguri universale.

Montarea cabinetului trebuie să asigure accesul la uși, filtre și borne, intrarea controlată a cablurilor, protecția la vibrații și solicitări accidentale, precum și transportul/ancorarea ansamblului. Masa și metoda de fixare se verifică structural; cerințele se includ în modelul de amplasament mecanic și se validează la FAT/SAT.

7.3 Rețele industriale: fieldbus și Industrial Ethernet

Rețeaua industrială transportă date între PLC, I/O distribuit, drive-uri, HMI și alte controlere. Pentru proiectantul echipamentului, criteriile relevante sunt perioada de actualizare cerută de proces, sincronizarea motion, disponibilitatea profilurilor siguranță funcțională, topologia, diagnosticarea, lungimile și mediul cablurilor, compatibilitatea dispozitivelor și standardul clientului [93], [121].

Arhitecturile actuale combină tehnologii moștenite (legacy) și Industrial Ethernet. Modernizarea nu se face prin înlocuire automată: o rețea se alege și se validează în funcție de cerințele mașinii, iar convergența IT/OT prin TSN sau alte tehnologii nu elimină necesitatea separării traficului critic de control de traficul informațional (Figura 7.6).

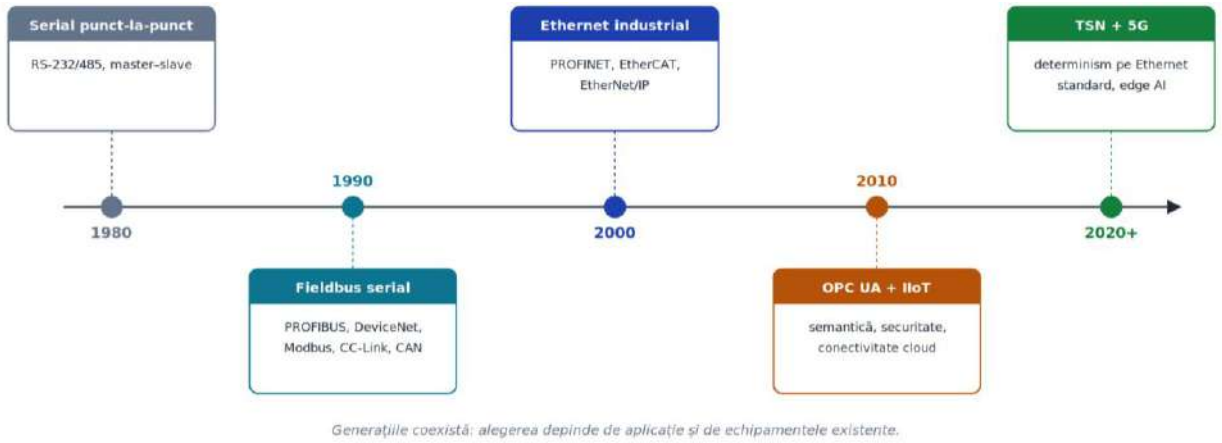


Figura 7.6. Evoluția tehnologiilor de comunicație industrială; generațiile coexistă în funcție de aplicație și ciclul de modernizare.

7.3.1 PROFINET: Industrial Ethernet în ecosistemul PI

PROFINET este o familie Industrial Ethernet menținută de PROFIBUS & PROFINET Internațional și standardizată în cadrul familiilor IEC 61158/61784. Pentru proiectant, întrebarea utilă este ce servicii, profile și timp de actualizare sunt necesare pentru I/O, motion, diagnostic și funcții de siguranță, precum și ce infrastructură și convenții acceptă clientul [93], [94].

PROFINET diferențiază traficul de configurare/diagnostic de traficul Real-Time și de configurațiile izocrone pentru aplicații cu cerințe de sincronizare (Figura 7.7). Performanța concretă depinde de controler, dispozitive, topologie și configurația rețelei; perioada de actualizare și jitter-ul trebuie derivate din cerințele proiectului și validate prin măsurare.

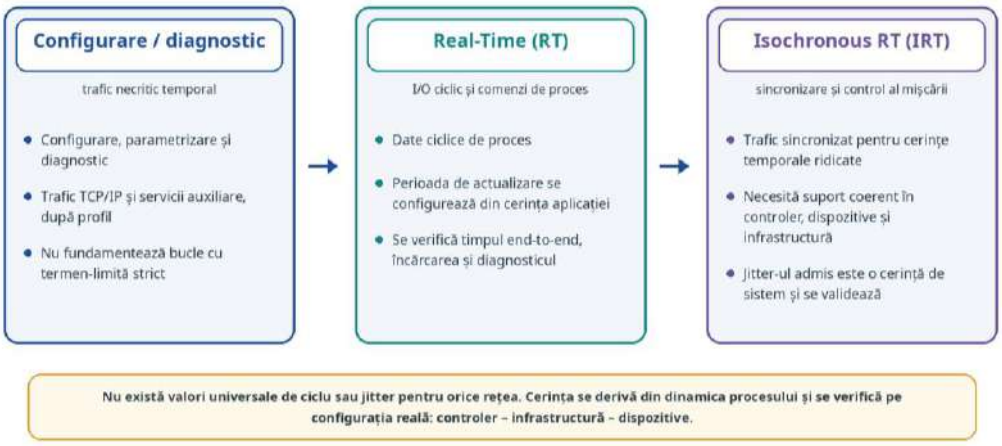


Figura 7.7. Servicii și clase de comunicație PROFINET pentru configurare/diagnostic, Real-Time și aplicații izocrone; performanța se validează pe configurația reală.

Traficul necritic temporal poate utiliza serviciile Ethernet/TCP/IP obișnuite pentru configurare și diagnostic, în timp ce datele ciclice de proces folosesc mecanisme Real-Time. Pentru proiectarea mașinii, este importantă separarea acestor clase de trafic și verificarea timpului de actualizare end-to-end al semnalelor critice.

Pentru motion sincron și aplicații izocrone, rețeaua și dispozitivele trebuie să suporte mecanismele de sincronizare cerute. Alegerea infrastructurii se verifică pe întregul lanț (controler, switch-uri, drive-uri, cabluri și topologie) iar jitter-ul se tratează ca cerință de sistem, nu ca o constantă a protocolului.

> **Scenariu de proiectare · PROFINET într-o celulă de asamblare**
> O arhitectură poate include PLC, I/O distribuit, drive-uri, HMI, cameră de viziune și dispozitive safety pe aceeași familie de rețea, dar cu cerințe temporale diferite. Proiectantul verifică pentru configurația concretă: timpul de actualizare end-to-end, încărcarea rețelei, compatibilitatea dispozitivelor, topologia, mecanismul de redundanță dacă este cerut și diagnosticul disponibil. Timpurile de ciclu, jitter-ul și timpul de recuperare nu se transferă ca valori universale între proiecte.

7.3.2 EtherCAT: controlul motion sincron de înaltă performanță

EtherCAT utilizează procesarea on-the-fly a telegramelor și mecanisme de sincronizare distribuită, ceea ce îl face potrivit pentru I/O și motion cu cerințe temporale ridicate (Figura 7.8). Timpul de ciclu realizabil depinde de cantitatea de date, numărul și tipul nodurilor, master și configurație; nu se deduce dintr-o singură valoare „per slave” [95].

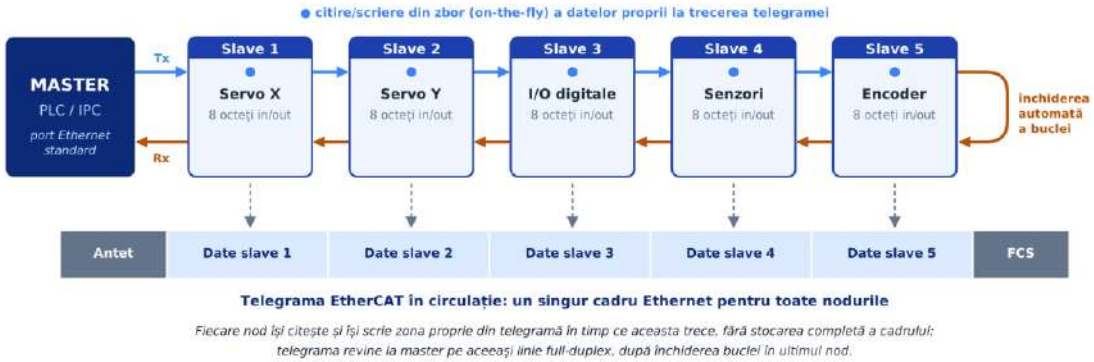


Figura 7.8. Principiul EtherCAT cu procesare on-the-fly a datelor în telegramă.

Consecința practică este că EtherCAT poate oferi cicluri scurte și sincronizare precisă în configurații adecvate. Pentru proiectant, performanța necesară trebuie derivată din dinamica mecanismului și validată pentru rețeaua concretă, evitând comparații generice între protocoale în afara aceluiași scenariu de sarcină.

Limitările și avantajele EtherCAT depind de ecosistemul de dispozitive disponibil, cerințele clientului, topologia mașinii și competențele de mentenanță. Integrarea cu nivelurile superioare se realizează prin controler, gateway (poartă de comunicație) sau servicii software adecvate, fără a presupune un traseu unic.

7.3.3 EtherNet/IP: Industrial Ethernet bazat pe CIP

EtherNet/IP este o tehnologie Industrial Ethernet bazată pe Common Industrial Protocol (CIP) și susținută de ODVA. Include profile pentru I/O, motion și safety. Infrastructura se selectează pentru mediul industrial, topologie, diagnostic, disponibilitate și performanța cerută; utilizarea Ethernet-ului standard nu înseamnă că orice switch sau configurație IT este adecvată controlului industrial [122].

Perioada de actualizare și performanța EtherNet/IP sunt configurabile și dependente de aplicație. Pentru motion se folosesc mecanismele și profilurile corespunzătoare, inclusiv sincronizarea temporală. Alegerea între EtherNet/IP, PROFINET și EtherCAT trebuie făcută pe aceeași bază de cerințe și cu dispozitive efectiv disponibile în proiect.

7.3.4 Comparație și criterii de alegere

Alegerea rețelei industriale principale se face prioritar după standardul clientului și compatibilitatea ecosistemului existent, apoi după cerințele de determinism/motion, safety over network, topologie, diagnostic, disponibilitatea dispozitivelor și competențele de mentenanță. Localizarea geografică poate influența ecosistemul, dar nu este un criteriu tehnic suficient.

Tabelul 7.4 compară funcțional PROFINET, EtherCAT și EtherNet/IP pentru aplicațiile industriale tipice.

Tabelul 7.4. Comparație funcțională PROFINET, EtherCAT și EtherNet/IP pentru aplicații industriale tipice.

Criteriu	PROFINET	EtherCAT	EtherNet/IP
Integrare I/O	foarte bună	foarte bună	foarte bună
Motion sincron	prin profile/configurații adecvate	punct forțe al tehnologiei	prin CIP Motion
Safety over network	PROFIsafe	FSoE, după ecosistem	CIP Safety
Topologii	linie / stea / inel, după infrastructură	linie și variante redundante	stea / linie / inel, după infrastructură
Diagnostic	integrat în ecosistem PI	master + diagnosticul dispozitivelor	CIP + instrumentele ecosistemului
Criteriu decisiv	standard client + integrare	cerințe motion + ecosistem	standard client + ecosistem CIP
Observație	validare ciclu/jitter pe configurație	validare ciclu/jitter pe configurație	validare RPI/ciclu pe configurație
Documentare	profiluri și GSDML	ESI + profile dispozitiv	EDS + profile CIP
Selecție	din cerințele proiectului	din cerințele proiectului	din cerințele proiectului

7.4 OPC UA și integrare verticală

Rețelele de câmp rezolvă în primul rând schimbul ciclic dintre controler și dispozitive. Integrarea cu SCADA, MES, servicii edge sau alte mașini are nevoie suplimentar de modele de informație, mecanisme de acces și securitate. OPC UA este unul dintre principalele cadre utilizate pentru această integrare.

OPC UA, standardizat în familia IEC 62541, oferă modele de informație, servicii și mecanisme de securitate pentru integrarea controlată a datelor. IEC 62541-1:2025 prezintă conceptele generale, iar IEC 62541-3:2025 descrie Address Space. OPC UA nu înlocuiește rețeaua deterministă de control și nu mută automat buclele rapide către nivelurile IT sau cloud [116], [123].

7.4.1 Address Space: modelul semantic de informație

La baza modelării OPC UA se află Address Space, un graf de noduri și relații. Nodurile aparțin unor NodeClasses, cum sunt Object, Variable, Method, ObjectType sau VariableType, și au atribute standardizate. NodeId identifică un nod în namespace-ul serverului; DisplayName, BrowseName, DataType și

drepturile de acces au roluri distincte. Pentru proiectant este importantă modelarea coerentă a datelor expuse, nu memorarea exhaustivă a metamodelului (Figura 7.9).

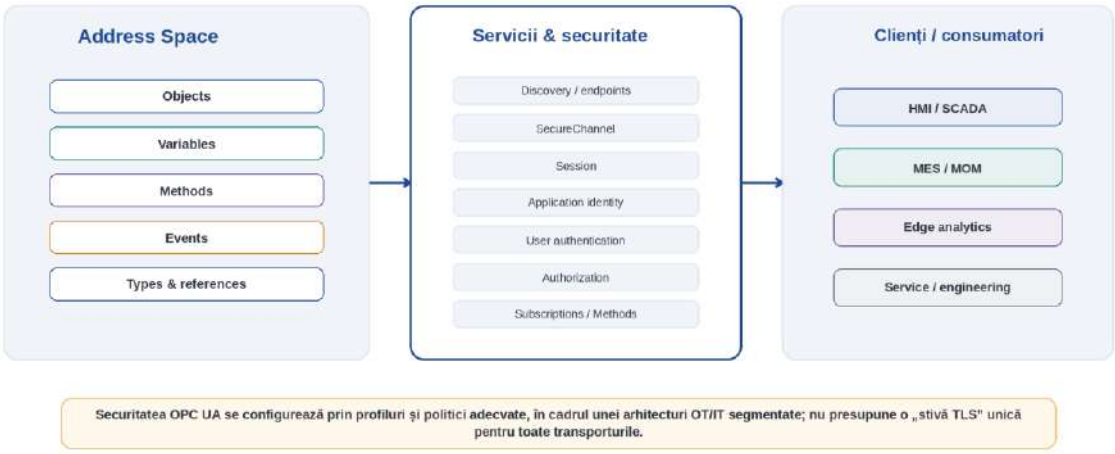


Figura 7.9. OPC UA: model informațional, servicii și mecanisme de securitate pentru integrarea controlată a datelor.

Într-un PLC sau gateway modern, dezvoltatorul selectează datele care trebuie publicate și le structurează în Address Space. Clientul (HMI, SCADA, MES sau edge) poate naviga, citi ori subscrie date în limitele drepturilor acordate. Structura și NodeId-urile instanțelor sunt definite de implementare; Companion Specifications standardizează semantică, tipuri și relații pentru a reduce integrarea particularizată.

7.4.2 Securitate end-to-end

Securitatea OPC UA se construiește prin identitatea aplicațiilor, endpoint-uri și politici de securitate, SecureChannel, sesiuni, autentificarea utilizatorilor și autorizarea accesului. IEC 62541-2:2026 descrie modelul de securitate și amenințările relevante, în timp ce cerințele normative pentru servicii, corespondențe și profiluri sunt distribuite în celelalte părți ale seriei IEC 62541. Mecanismele concrete depind de profilul și transportul utilizat; OPC UA nu trebuie redus la o stivă universală bazată întotdeauna pe TLS [124].

OPC UA oferă mecanisme pentru comunicație securizată, dar acestea trebuie integrate într-o arhitectură OT/IT completă. Seria IEC 62443 este un reper pentru zonare, conduits, controlul accesului, întărirea configurației (hardening) și managementul securității. Expunerea directă a unui PLC către Internet nu este o consecință implicită și, în mod obișnuit, trebuie evitată în favoarea unor arhitecturi segmentate și controlate.

7.4.3 Companion Specifications: modele de informație standardizate

O componentă importantă a ecosistemului OPC UA este reprezentată de Companion Specifications, modele de informație standardizate pentru domenii industriale. Exemple actuale relevante pentru proiectarea echipamentelor sunt OPC 40010-1 pentru robotică, OPC 40100-1 pentru machine vision și OPC 40501-1 pentru mașini-unelte. Inițiativa umati (universal machine technology interface) promovează adoptarea coerentă a acestor modele în construcția de mașini; umati nu este ea însăși o specificație OPC UA [125].

Beneficiul Companion Specifications este reducerea ambiguității semantice: echipamente diferite pot utiliza aceleași tipuri de obiecte, variabile și structuri definite pentru un domeniu. Ele nu impun ca toate instanțele să aibă aceleași NodeId-uri locale; interoperabilitatea se bazează pe model și semantică, nu pe identitatea numerică a tuturor nodurilor.

> **Scenariu didactic · publicarea controlată a datelor prin OPC UA**
> O stație poate expune către MES numai datele necesare (de exemplu starea producției, contori, timp de ciclu, rețeta și evenimente relevante) printr-un server OPC UA al PLC-ului sau al unui gateway. Clientul se autentifică și primește drepturi doar pentru namespace-urile necesare. Politica de securitate, certificatele, trust list-ul, firewall-ul și ruta OT/IT se stabilesc în arhitectura fabricii. Latența acceptabilă se derivă din rolul informațional al datelor și nu se confundă cu timpul buclei locale de control.

7.5 Interfața operator-mașină (HMI)

Interfața operator–mașină, engl.: Human-Machine Interface (HMI), este componenta vizibilă și tangibilă a subsistemului de control: ecranul tactil prin care operatorul vede starea echipamentului, comandă pornirea unui ciclu, citește o alarmă, schimbă o rețetă de produs sau diagnostichează o defecțiune. Spre deosebire de PLC, care este o componentă de fundal vizibilă în principal mentenanței, HMI-ul este interfața zilnică pentru operator, tehnician, supervizor și personalul de mentenanță; calitatea proiectării sale influențează direct timpul de intervenție, diagnosticarea și riscul de eroare umană.

Calitatea HMI influențează direct timpul de intervenție, diagnosticarea și riscul de eroare umană. În locul unor procente generale de „timp petrecut pe HMI” sau pierderi OEE, proiectarea trebuie verificată prin analiza sarcinilor operatorului, testare de utilizabilitate și observații în FAT/SAT.

7.5.1 Categorii de HMI și plasarea lor

HMI-ul se selectează după sarcina operatorului, distanța de vizualizare, cantitatea de informație, mediul, utilizarea mănușilor, accesibilitate și cerințele clientului. Diagonala sau prețul nu determină singure adecvarea; dispozitivele fizice de siguranță se tratează separat de ecranul HMI.

- Panou compact: pentru echipamente simple sau comenzi locale; butoanele fizice pot fi utilizate pentru comenzi frecvente, însă funcțiile de siguranță sunt implementate prin dispozitive și circuite dedicate.
- Panou tactil mediu: potrivit pentru majoritatea stațiilor în care sunt necesare stare, rețete, alarme și diagnostic; dimensiunea se verifică prin lizibilitate la distanța reală de lucru.
- Panou widescreen: util când trebuie afișate simultan scheme, tendințe, diagnostice sau mai multe zone ale mașinii.
- Panou/monitor industrial mare: adecvat posturilor de supervizare și centrelor de comandă; rezoluția și distanța de vizualizare se dimensionează împreună.
- HMI portabil: util pentru reglaj și mentenanță în jurul mașinii; orice funcție de siguranță integrată în dispozitiv trebuie să fie proiectată și validată ca atare, nu presupusă din simpla prezență a unui buton.

Plasarea HMI-ului se proiectează antropometric și ergonomic, utilizând ISO 9241 și principiile ISO 14738 ca repere. Înălțimea, distanța și unghiul se stabilesc pentru populația de utilizatori și contextul de

lucru; montajul reglabil este preferabil când echipamentul deservește utilizatori cu staturi sau posturi diferite [52].

7.5.2 Principii ergonomice ISO 9241

Familia ISO 9241 oferă repere pentru ergonomia interacțiunii om–sistem. Pentru HMI industrial sunt relevante în special ISO 9241-110:2020 (principii de interacțiune), ISO 9241-112:2025 (prezentarea informației), ISO 9241-115:2024 (proiectarea interacțiunii și navigării), ISO 9241-410:2008+Amd 1:2012 (criterii de proiectare pentru dispozitive fizice de intrare, inclusiv ecrane tactile) și ISO 9241-420:2011 (selecția dispozitivelor fizice de intrare). ISO 9241-110:2020 formulează șapte principii de interacțiune; acestea trebuie transpuse în cerințe concrete și testabile pentru sarcina operatorului [126]–[127] [128–130].

- Adecvarea la sarcinile utilizatorului: interfața trebuie să susțină direct activitatea operatorului, cu acțiunile și informațiile relevante disponibile fără pași inutili. Oprirea de urgență nu se implementează ca un control software HMI obișnuit [29], [131].
- Auto-descrierea: starea sistemului, controalele și consecințele acțiunilor trebuie să fie inteligibile în context. Etichetele textuale, răspunsul vizual al interfeței și mesajele de diagnostic trebuie să reducă ambiguitatea.
- Conformitatea cu așteptările utilizatorului: terminologia, ordinea acțiunilor și comportamentul controalelor trebuie să fie consecvente cu convențiile mașinii și cu experiența utilizatorului. Cerințele pentru dispozitive fizice nu se transferă automat ca reguli cromatice universale pentru toate elementele grafice.
- Robustețea la erori de utilizare: HMI-ul trebuie să prevină acțiunile imposibile sau periculoase, să ofere confirmări proporționale cu consecința și să permită recuperarea controlată acolo unde procesul o permite.
- Angajarea utilizatorului: interfața trebuie să susțină atenția, înțelegerea și implicarea adecvată în sarcină, fără a încărca inutil ecranul. Personalizarea poate fi utilă, dar nu reprezintă unul dintre cele șapte principii denumite în ediția 2020.
- Învățabilitatea: structura, terminologia și răspunsul sistemului trebuie să favorizeze formarea unei reprezentări mentale coerente a mașinii și transferul cunoștințelor între ecrane și moduri de lucru.
- Controlabilitatea: utilizatorul trebuie să poată iniția și dirija interacțiunea în limitele rolului său și ale stării mașinii. Tranzițiile între moduri, resetările și comenzile manuale trebuie definite explicit; reversibilitatea nu este o regulă universală pentru orice secvență.

Pentru aplicațiile de mașină este utilă o arhitectură informațională relativ superficială, orientată pe sarcină, de exemplu Home → funcție → detaliu. ISO 9241-115:2024 oferă ghidaj explicit pentru proiectarea interacțiunii, interfeței și navigării, dar nu impune o limită numerică universală a adâncimii meniurilor (Figura 7.10). Reguli precum „maximum trei niveluri” sau „5–7 elemente” rămân euristici de proiect și trebuie validate prin sarcina operatorului, lizibilitate, consistență și testare de utilizabilitate.

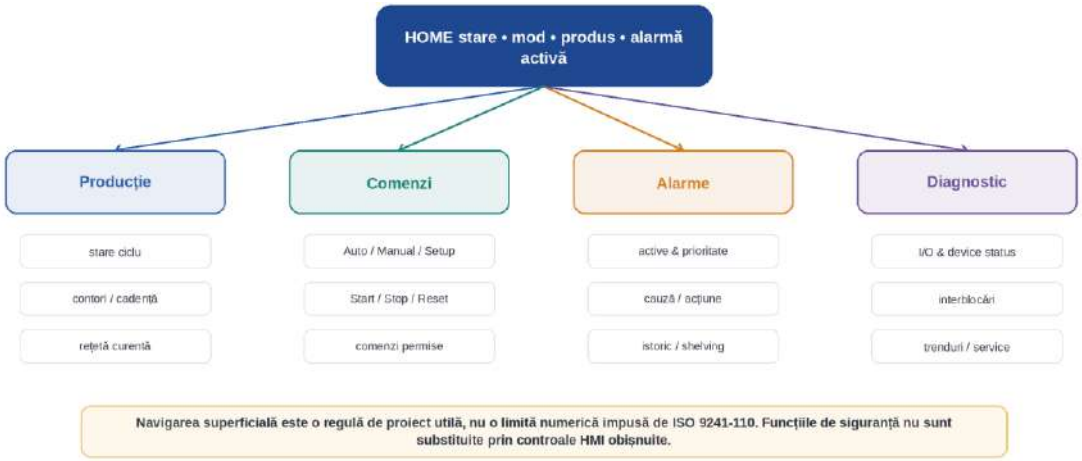


Figura 7.10. Arhitectură HMI orientată pe sarcină și diagnostic; ISO 9241-115:2024 oferă ghidaj pentru navigare, fără a impune o adâncime numerică universală.

Principiile ergonomice trebuie transformate în cerințe mecanice verificabile la montaj: câmp vizual, acces, distanță de citire, reflexii, înălțime și posibilitatea reglării. O aplicație software corectă poate deveni dificil de utilizat dacă suportul HMI este plasat sau orientat necorespunzător.

Înălțimea panoului se dimensionează din postura de lucru și distribuția antropometrică a utilizatorilor, nu dintr-o singură cotă universală. Pentru operatori diferiți ca statură sau pentru posturi mixte șezut/în picioare, un braț reglabil poate fi soluția robustă, cu verificarea coliziunilor, rigidității și traseului cablului.

Unghiul și distanța de vizionare se stabilesc din dimensiunea caracterelor, contrast, reflexii și sarcina operatorului. Proiectantul mecanic verifică linia de vedere și sursele de lumină în modelul de amplasament și, când este posibil, prin machetă (mock-up) sau FAT cu operator reprezentativ.

Butoanele fizice se aleg după frecvența de utilizare, mediul, mănușile, răspunsul tactil și rolul funcțional. Comenzile critice pentru siguranță se proiectează conform standardelor specifice funcției; ecranul tactil rămâne adecvat pentru navigare, setări și diagnostic, nu ca substitut automat pentru dispozitivele de siguranță.

7.5.3 Managementul alarmelor: EEMUA Publication 191

Un sistem de alarmare eficient trebuie să atragă atenția operatorului asupra condițiilor care necesită evaluare sau acțiune. EEMUA Publication 191, Edition 4 (2024) oferă un cadru consacrat pentru filosofia și ciclul de viață al alarmelor, iar IEC 62682:2022 definește principii și procese de management al alarmelor aplicabile proceselor continue, batch și discrete. Pentru echipamentele de fabricație, aceste repere se adaptează arhitecturii, riscului și sarcinilor operatorului, fără a transforma benchmark-urile de performanță în limite normative universale [132], [133].

EEMUA 191 oferă ghidaj și repere de performanță pentru evaluarea sistemului de alarmare, dar acestea nu trebuie transformate în limite normative universale pentru orice mașină. Proiectul stabilește indicatorii relevanți (de exemplu rata alarmelor, vârfurile, alarmele permanente și distribuția priorităților) și îi verifică pe date reale. O alarmă trebuie să fie justificată prin consecința neacțiunii și răspunsul cerut operatorului.

Alarm flood descrie o perioadă în care fluxul de alarme depășește capacitatea operatorului de a le evalua și trata corect. Prevenirea se face prin eliminarea alarmelor fără acțiune, raționalizare,

suprimarea consecințelor secundare, temporizări justificate, suspendare controlată (shelving) și revizuire periodică. Un buton „ACK All” nu este, prin el însuși, o soluție de management al alarmelor (Figura 7.11).

Prioritizarea pornește de la consecința neacțiunii și timpul disponibil pentru răspuns. Fiecare alarmă trebuie să fie justificată, să aibă un mesaj inteligibil și o acțiune de operator definită. Numărul claselor de prioritate și pragurile asociate se stabilesc în filosofia de alarmare a proiectului, documentată și validată.

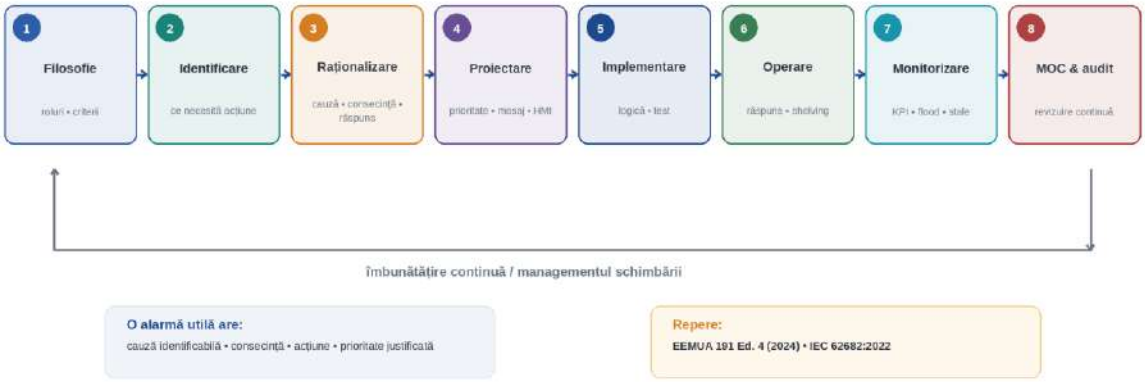


Figura 7.11. Ciclul de management al alarmelor, adaptat după principiile EEMUA Publication 191 și IEC 62682.

7.5.4 Funcții HMI uzuale și cerințe de specificat

Funcțiile HMI se definesc din analiza sarcinilor, specificația clientului și arhitectura mașinii. Pentru o mașină de fabricație sunt frecvente funcțiile de mai jos, dar retenția istoricului, autentificarea, exportul, mecanismele de confirmare și limbile disponibile sunt cerințe de proiect, nu obligații universale.

- Ecran Home cu sinteza stării echipamentului: stare generală (Auto/Manual/Stop/Faulted), produs curent, cadență, contor producție bună/defect, listă alarme active.
- Selectarea sau afișarea modului de funcționare (de exemplu Auto / Manual / Reglaj / Mentenanță), cu drepturi de acces și interblocări adecvate. Dacă selecția modului are rol într-o funcție de siguranță, implementarea trebuie tratată conform arhitecturii de siguranță funcțională, nu doar prin HMI.
- Listă alarme active cu prioritate și stare clară, filtrare după zonă/severitate și mecanism de confirmare conform filosofiei de alarmare; utilizarea ACK individual/în grup se justifică prin risc și operare.
- Istoric de alarme și evenimente cu perioada de retenție, integritatea datelor și exportul stabilite din cerințele aplicației și ale sistemului MES/SCADA.
- Diagnostic per stație/zonă: sub-meniuri cu starea senzorilor și actuatoarelor individuale, util pentru tehnicianul de mentenanță în timpul intervențiilor.
- Selecție și editare rețete de produs: pentru linii cu schimbare format (ambalare, asamblare flexibilă); fiecare rețetă conține setpoint-urile parametrizabile (presiuni, temperaturi, viteze, dimensiuni piese).
- Trasabilitate: afișarea și, când este cerut, înregistrarea lotului/seriei, rețetei și rezultatului procesului. Cerințe precum audit trail sau semnături electronice se aplică numai când rezultă din cadrul de reglementare sau din specificația clientului.

- Multilingvism: limbile se stabilesc din piața de destinație, profilul utilizatorilor și cerințele contractuale. Schimbarea limbii trebuie să păstreze consistența terminologică, spațiul disponibil și lizibilitatea mesajelor.

> **În practică · HMI în aplicații reglementate**
> În aplicații farmaceutice sau în alte domenii reglementate, HMI-ul poate avea cerințe suplimentare privind audit trail-ul, controlul accesului, semnăturile electronice, managementul rețetelor și înregistrările electronice. Aceste cerințe se derivă din cadrul de reglementare, evaluarea riscului și politica de validare a organizației; nu se presupun automat pentru orice mașină.

7.6 Asocierea I/O și definirea hardware-ului

Etapa de asociere I/O este puntea concretă între proiectarea electrică (schema de cabluri) și proiectarea software (programul PLC). Ea constă în asocierea fiecărui semnal fizic (o intrare digitală de la un senzor, o ieșire analogică către un drive, un canal de comunicație PROFINET către o stație de I/O distribuit) cu o adresă logică în spațiul de memorie al PLC-ului și cu o variabilă simbolică folosită în program. Calitatea acestei asocieri determină atât claritatea arhitecturală a soluției, cât și viteza de diagnostic în mentenanță.

7.6.1 De la schema electrică la configurația PLC

Schema electrică este realizată într-un mediu CAD electric și conține identificatorii componentelor, bornele, tipurile de semnal și conexiunile. EPLAN Electric P8 este un exemplu de platformă utilizată industrial, nu singura soluție posibilă [134].

Transferul dintre CAD-ul electric și mediul PLC poate fi automatizat prin formate și integrări disponibile în proiect, dar nu este universal. Fluxul de lucru trebuie verificat pentru combinația concretă de EPLAN/alt CAD, platformă PLC și convenții de etichetare; unde importul automat nu este disponibil, lista I/O controlată și verificarea încrucișată rămân obligatorii.

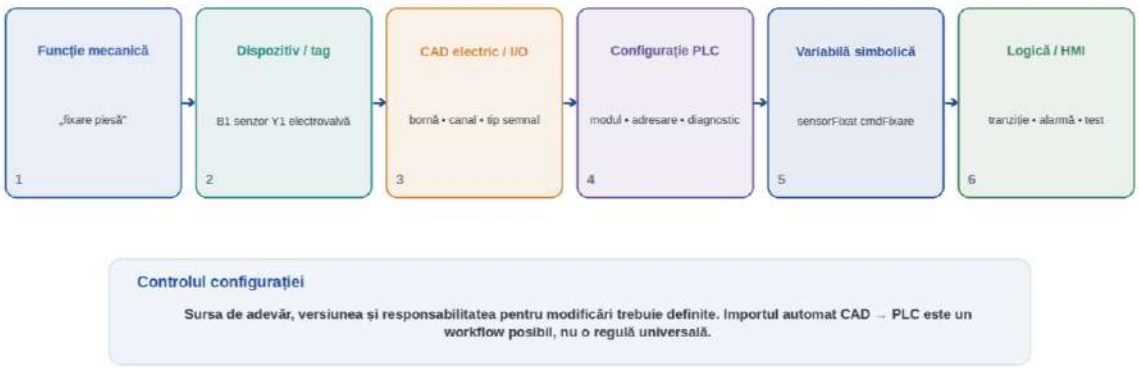


Figura 7.12. Asocierea I/O de la funcția mecanică și tag-ul dispozitivului la configurația PLC, variabila simbolică și logica aplicației.

Automatizarea asocierii reduce transcrierea manuală și poate îmbunătăți consistența dintre schema electrică, configurația hardware și variabilele software (Figura 7.12). Beneficiul real apare numai dacă este definită sursa de adevăr, versiunea documentelor, responsabilitatea pentru modificări și o verificare încrucișată înainte de punerea în funcțiune.

7.6.2 Convenții de denumire pentru variabilele simbolice

Numele variabilelor simbolice influențează mentenabilitatea și diagnosticarea. Convenția de mai jos este un exemplu de regulă de proiect; clientul sau organizația poate utiliza alte convenții, cu condiția să fie consecvente și documentate.

- Senzori: un prefix precum „sensor” poate fi utilizat înaintea unei descrieri funcționale (de exemplu sensorPiesaPrezenta). Alternativ, organizația poate folosi convenții bazate pe tipul semnalului sau pe tag-ul echipamentului. Regula esențială este consecvența și trasabilitatea, nu un prefix anume.
- Actuatoare digitale: un prefix precum „cmd” poate diferenția comenzile de stări sau semnalele de confirmare (de exemplu cmdFixareExtinde). Convenția trebuie documentată și corelată cu schema electrică și diagnosticul HMI.
- Setpoint-uri și valori analogice: numele trebuie să indice mărimea și, când reduce ambiguitatea, unitatea sau scara de inginerie; convenția de prefix/sufix este stabilită la nivel de proiect.
- Variabile de stare internă: prefixe precum „st” sau „flg” pot fi utile, dar nu sunt standarde IEC. Pentru stările mașinii este preferabilă o reprezentare explicită prin enumerații/mașină de stări, acolo unde platforma o permite.
- Constante de configurare: se recomandă o convenție ușor de recunoscut și separarea parametrilor de configurare inginerească de setpoint-urile modificabile de operator. Unitățile și limitele trebuie documentate.
- În logica aplicației se recomandă utilizarea variabilelor simbolice, cu păstrarea adresării absolute în stratul de configurare/asociere acolo unde platforma o cere. Excepțiile trebuie izolate și documentate pentru a evita dependența inutilă a logicii de poziția fizică a modulelor.

7.6.3 Metodologia de proiectare a subsistemului de control: 7 pași

Proiectarea subsistemului de control se realizează iterativ în șapte pași (Figura 7.13). Hardware-ul este doar unul dintre rezultate; secvența, siguranță funcțională, bugetul temporal, HMI-ul și validarea trebuie stabilite împreună.

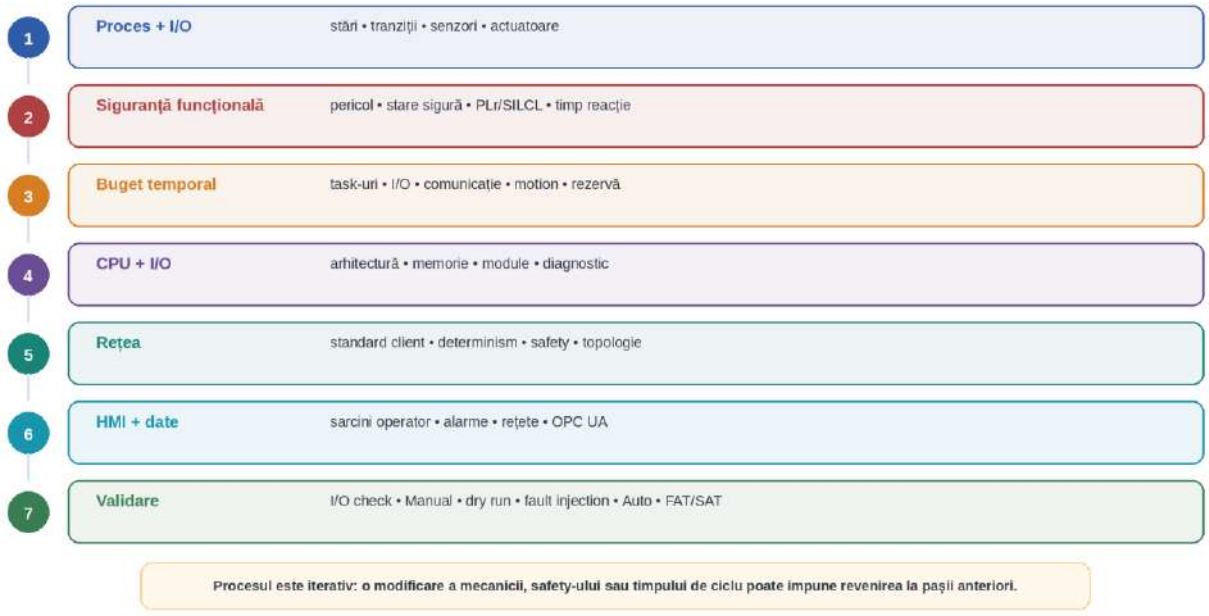


Figura 7.13. Metodologia de proiectare a subsistemului de control în șapte pași, de la proces și siguranță funcțională la validare și punere în funcțiune.

Cei șapte pași ai metodologiei din Figura 7.13 se detaliază astfel:

- Pasul 1. Proces, secvență și inventar I/O: se descriu stările mașinii, condițiile de tranziție, senzorii, actuatoarele și semnalele de date. Rezerva I/O se stabilește ca politică de proiect și se documentează.
- Pasul 2. Funcții de siguranță: din evaluarea riscului se identifică funcțiile, starea sigură, PLr sau SIL cerut și timpul de reacție; acestea stabilesc necesitatea și arhitectura platformei failsafe, inclusiv capabilitatea (maximum SIL) a subsistemelor atunci când se aplică IEC 62061.
- Pasul 3. Buget temporal: se stabilesc perioadele task-urilor, necesarul de sincronizare motion, timpul I/O și comunicație, jitter-ul admis și rezerva de execuție.
- Pasul 4. CPU și I/O: se selectează arhitectura compactă/modulară/distribuită, memoria, modulele speciale, redundanța și rezerva de capacitate pe baza pașilor 1–3.
- Pasul 5. Rețeaua industrială: se selectează în funcție de standardul clientului, cerințele de motion și siguranță funcțională, topologie, diagnostic, mentenanță și dispozitivele disponibile.

  Pasul 6. HMI și date: se definesc interfața operator, alarmele, rețetele, trasabilitatea, drepturile de acces și integrarea datelor prin OPC UA sau alte interfețe necesare.

  Pasul 7. Validare și punere în funcțiune: I/O check, verificarea actuatoarelor și sensurilor, testarea interblocărilor, Manual, rulare la gol, injectare de defecte, Auto, timp de ciclu și FAT/SAT.

La sfârșitul celor șapte pași, configurația de control și documentația sunt suficient de mature pentru integrare: BOM hardware, listă I/O, arhitectură de rețea, concept de siguranță funcțională, HMI, model de date și plan de test. Costul se calculează din oferta curentă și configurația reală; nu este transferabil între proiecte sau ani.

Exemplul rezolvat 7.1. Dimensionarea arhitecturii de control pentru o stație de presare cu trasabilitate

Enunț. Stația are 64 DI, 32 DO, 8 AI și 4 AO; cadența este 6 piese/min, iar task-ul de proces trebuie să aibă perioada de maximum 5 ms. Sunt necesare funcții de siguranță pentru oprire de urgență, interblocarea apărătorilor și confirmarea stării de oprire, plus OPC UA către MES. Pentru acest exemplu, politica de proiect prevede 25 % rezervă de I/O.

Pasul 1. Proces și I/O. Cu rezerva de 25 % rezultă: DI = 80, DO = 40, AI = 10, AO = 5. Lista se completează cu axele, comunicațiile și semnalele de diagnostic. Secvența mașinii stabilește ce semnale sunt critice pentru fiecare tranziție.

Pasul 2. Siguranță funcțională. Evaluarea riscului stabilește nivelul cerut pentru fiecare funcție. Ca ipoteză didactică, se consideră PLr e pentru oprirea de urgență și interblocarea apărătorilor și PLr d pentru confirmarea stării de oprire. Se alege o platformă failsafe capabilă să implementeze și să diagnosticheze aceste funcții; ipoteza trebuie validată separat pentru proiectul real.

Pasul 3. Buget temporal. Pentru task-ul de 5 ms se estimează 1,2 ms logică secvențială și calcule, 0,6 ms servicii I/O, 0,5 ms comunicație/diagnostic și 0,4 ms funcții tehnologice. Totalul preliminar este 2,7 ms, lăsând 2,3 ms rezervă. Valoarea finală se verifică online după integrare.

Pasul 4. CPU și I/O. O configurație coerentă este: 5×DI16 = 80 DI; 3×DO16 = 48 DO; 3×AI4 = 12 AI; 2×AO4 = 8 AO, plus modulele/funcțiile speciale necesare. Arhitectura locală sau distribuită se decide din layout și lungimea traseelor.

Pasul 5. Rețea. Se selectează rețeaua conform standardului clientului și cerințelor de motion și siguranță. În scenariul didactic se utilizează PROFINET pentru I/O și integrarea dispozitivelor, fără a presupune că geografia clientului determină protocolul.

Pasul 6. HMI și date. Se selectează un HMI dimensionat prin lizibilitate și sarcină; acesta oferă stare, moduri de operare, rețete, alarme, diagnostic și trasabilitate. OPC UA publică către MES numai setul de date necesar, cu politici de securitate și drepturi de acces.

Pasul 7. Validare și punere în funcțiune. Se execută I/O check, verificarea în Manual, validarea funcțiilor de siguranță, rulare la gol, injectare de defecte, Auto cu produs și verificarea timpului de ciclu. Rezultatul final este un BOM și un plan de test coerente cu secvența, siguranța funcțională, I/O și cerințele de integrare.

7.6.4 Punerea în funcțiune a subsistemului de control

Punerea în funcțiune confirmă că arhitectura proiectată funcționează corect pe mașină reală. Ea începe înainte de modul Automat și trebuie executată într-o succesiune controlată, cu stări sigure și criterii de acceptare documentate.

Etapa 1. I/O check: se verifică fiecare semnal de la dispozitiv până la variabila PLC și HMI, inclusiv sensul, scalarea analogică, starea implicită și diagnosticul. Etapa 2. Verificarea actuatoarelor în Manual: sens de mișcare, limite, viteze reduse și interblocări. Etapa 3. Validarea funcțiilor de siguranță conform planului de validare, separat de testele logice de proces.

Etapa 4. Rulare la gol (dry run), fără produs sau cu dispozitive de test: se verifică stările, tranzițiile, timeout-urile și recuperarea după defect. Etapa 5. Injectare de defecte: senzor absent/blocat, pierdere comunicație, actuator fără confirmare, valori analogice în afara domeniului și alte defecte previzibile. Etapa 6. Modul Automat cu produs și verificarea timpului de ciclu, repetabilității, calității și trasabilității. Etapa 7. FAT și, ulterior, SAT cu criterii de acceptare documentate.

Rezultatele punerii în funcțiune alimentează FAT-ul și, ulterior, SAT-ul. Pentru cabluri, lanțuri portcablu, raze de îndoire, separare EMC și presetupe se aplică regulile de integrare din Capitolul 4 și documentația producătorilor; aici se verifică funcțional traseele, conectivitatea și diagnosticul, fără a repeta dimensionarea electrică sau mecanică [16].

7.7 Studiu de caz integrat: arhitectura de control pentru o stație de presare SAP

Secțiunea prezintă un studiu de arhitectură de control. Configurația de referință SAP are produs tub–carcasă, axă principală electrică Z și fixare pneumatică CL1/CL2. Datele de mare cadență pentru un modul electronic din versiunea anterioară sunt păstrate mai jos numai ca scenariu alternativ ALT–PRODUCT + ALT–THROUGHPUT, nu ca specificație a baseline-ului.

7.7.1 Cerințele inițiale ale aplicației

În exemplul ALT–PRODUCT + ALT–THROUGHPUT se analizează presarea unui modul electronic (PCB, carcasă și conector). Acesta este un alt produs și nu reprezintă SAP tub–carcasă. Scopul exemplului este dimensionarea controlului pentru un scenariu mai solicitant; cerințele și I/O trebuie realocate înainte de reutilizarea soluției în baseline.

- Cadență alternativă ALT–THROUGHPUT: 360 piese/oră (10 s/piesă), de verificat prin ciclogramă și plan de test separat. În configurația SAP de bază, ipoteza de calcul rămâne 120 ansambluri/oră (30 s/ciclu), fără demonstrarea performanței.
- Forță în scenariul alternativ: $F_{max,design}$ = 8 kN ca ipoteză didactică; eroarea admisă, tipul traductorului și comportamentul buclei închise se justifică în proiect și prin probe, nu se presupun automat.
- Cursa din scenariul alternativ: 0–30 mm ca valoare pentru exercițiu; cursa și precizia axei SAP de referință sunt TBD și se stabilesc din desenul produsului și bugetul de toleranțe.
- Trasabilitate completă: pentru fiecare piesă produsă se înregistrează, număr lot, timp ciclu, forța maximă atinsă, cursa la forța maximă, indicator OK/NOK, lista de alarme active în timpul ciclului.
- Funcții de siguranță: oprire de urgență, interblocarea apărătorilor și supravegherea stării de oprire pentru acces. Nivelurile PLr/SIL cerute, capabilitatea subsistemelor și timpii de reacție se stabilesc prin evaluarea riscului și proiectarea funcțiilor; pentru studiul de caz se păstrează aceste elemente ca parametri de demonstrat, nu valori asumate.
- Trei moduri de operare: AUTOMAT (producție continuă), MANUAL (intervenție/ajustare), REGLAJ (introducere sau modificare controlată a rețetelor de către tehnician calificat, cu autentificare).
- Conectivitate: integrare cu MES pentru starea producției, trasabilitate și indicatori; OPC UA este utilizat ca interfață semantică. Politica de securitate, certificatele și drepturile de acces se stabilesc în arhitectura fabricii.
- Mediu: cabinetul și HMI-ul trebuie să atingă gradele de protecție cerute de mediul concret. În scenariul didactic se presupune un cabinet în zonă industrială generală și un HMI expus la curățare; gradele IP se validează separat, fără a le trata ca valori universale.

7.7.2 Arhitectura subsistemului de control

Aplicând metodologia în 7 pași din §7.6.3, configurația este definită pornind de la secvență, I/O, siguranță funcțională și buget temporal. Se utilizează un PLC modular cu opțiune failsafe, I/O local/distribuit după amplasament, HMI cu ecran lat, comutator Ethernet industrial și sursă 24 V DC. Numărul exact de module și costul se stabilesc în BOM-ul proiectului și din ofertele curente.

Asociere I/O sumar, separată pe funcții: intrări/ieșiri standard pentru senzori și actuatoare de proces; I/O de siguranță dedicate funcțiilor identificate prin evaluarea riscului; semnale analogice pentru forță, presiune și alte mărimi de proces; iar encoderele, drive-urile și dispozitivele inteligente sunt

integrate prin module tehnologice sau rețea, după interfața lor. Într-un proiect real, fiecare categorie se inventariază separat, astfel încât canalele safety sau motion să nu fie contabilizate eronat ca DI/DO standard. Transferul din CAD electric către mediul PLC poate fi automatizat dacă instrumentele permit, dar lista I/O verificată rămâne document de control.

7.7.3 Logica de control: structura programului

Programul de control este structurat modular în jurul mașinii de stări și al funcțiilor reutilizabile. IEC 61131-3:2025 definește limbajele, dar nu impune această ierarhie particulară; structura de mai jos este o convenție de proiect pentru lizibilitate și testare [118].

- Nivelul 1. Task/program principal ciclic: coordonează apelurile către achiziția I/O, mașină de stări, funcțiile tehnologice, HMI și comunicații. Denumiri precum OB1 sunt specifice anumitor platforme și nu constituie cerințe IEC 61131-3.
- Nivelul 2. Mașină de stări / SFC: tranziții între stări precum Idle → Alimentare → Fixare → Apropiere → Presare → Validare → Retragere → Evacuare → Idle. Fiecare tranziție se condiționează de confirmări, interblocări și timeout-uri explicite.
- Nivelul 3. Funcții utilitare reutilizabile: FB_PressForceController (regulator PID poziție/forță cu gain scheduling), FB_TraceabilityRecord (înregistrare per piesă), FB_AlarmEngine (manager alarme conform EEMUA 191).
- Nivelul 4. Bibliotecă de funcții elementare: $FC_{Debounce}$ (debouncing senzori), FC_LinearInterp (interpolare liniară pentru calibrare AI), $FC_{LimitCheck}$ (verificare limite pentru AI/AO).

Logica funcțiilor de siguranță rulează pe platforma certificată și este separată logic și prin drepturi de configurare/programare de logica standard, conform arhitecturii producătorului. Validarea nu constă în „certificarea TÜV a programului” după un număr de instrucțiuni; fiecare funcție se verifică și se validează față de cerințele de siguranță, timpi și stare sigură.

7.7.4 Proiectarea HMI-ului

Pentru stația SAP se adoptă, ca regulă de proiect, o navigare în trei trepte: Home → funcție → detaliu. Această alegere susține accesul rapid la starea mașinii, diagnostic și rețete; este o decizie de design compatibilă cu principiile ISO 9241, nu o limită numerică impusă de standard.

Submeniul Comandă include comenzile permise de modul curent și parametrii care pot fi modificați conform rolului utilizatorului. Submeniul Alarme afișează alarmele active, prioritatea, cauza probabilă și acțiunea recomandată; confirmarea individuală, confirmarea de grup, suspendarea controlată (shelving) și perioada de retenție se definesc în filosofia de alarmare. Submeniul Mentenanță oferă diagnostic I/O/dispozitive, interblocări, tendințe și contoare relevante. Starea nu trebuie comunicată exclusiv prin culoare, iar setpoint-urile trebuie limitate și validate.

Lista alarmelor stației SAP este raționalizată conform filosofiei de alarmare bazate pe EEMUA 191: fiecare alarmă are cauză, consecință, acțiune de operator și prioritate justificată. Numărul pe categorii și indicatorii de performanță se validează în punere în funcțiune și exploatare; nu se presupun distribuții fixe sau un prag unic aplicabil tuturor mașinilor.

7.7.5 Integrarea cu MES și raportare OEE

Stația SAP expune prin OPC UA un set restrâns dar bine definit de variabile către MES-ul fabricii: PartCount (contor piese totale), GoodCount (piese OK), BadCount (piese defect), CycleTimeMs (timp ciclu), ProductionStatus (Auto/Manual/Stop/Faulted), AlarmActive (boolean), AlarmList (string lista alarme active), CurrentRecipe (numele rețetei), JobNumber (lot curent). Pentru fiecare piesă produsă, un eveniment OPC UA „PieceProduced" este publicat cu detaliile complete (forța max, cursa max, timestamp, OK/NOK, lista alarme).

MES-ul poate utiliza datele OPC UA pentru calculul indicatorilor de producție și analiza pierderilor. Ținta OEE și pierderile de referință se stabilesc pentru linia concretă și trebuie susținute de date măsurate; exemplele numerice se tratează ca scenarii didactice, nu ca valori de referință universal valabile.

> **În practică · OPC UA față de exportul manual de date**
>
> Avantajul OPC UA nu trebuie exprimat printr-un timp universal de raportare. Câștigul principal este automatizarea schimbului de date, modelarea semantică, evenimentele/subscripțiile și mecanismele de securitate. Comparativ cu exportul manual CSV, integrarea online poate reduce întârzierea informațională și erorile de transcriere, dar performanța end-to-end depinde de MES, rețea, server, politici de securitate și volumul de date.

7.8 Concepte cheie și aplicații pe proiectul SAP

Capitolul a tratat subsistemul de control ca interfață între procesul mecanic și automatizare. Sinteza conceptelor cheie:

- PLC-ul execută task-uri predictibile pentru logică, secvențe, reglare și comunicații. Modelul de scan este util didactic, dar platformele moderne pot combina task-uri ciclice, periodice, de eveniment, motion și safety.
- Selecția controlerului se bazează pe proces și I/O, funcțiile de siguranță, bugetul temporal, arhitectura hardware, rețeaua, HMI/date și planul de validare. Rezerva de I/O și timp este o politică de proiect justificată.
- PROFINET, EtherCAT și EtherNet/IP sunt opțiuni Industrial Ethernet cu ecosisteme și profile diferite. Alegerea se face după standardul clientului, motion, siguranță funcțională, topologie, diagnostic și dispozitive disponibile, nu după procente generale de piață.
- OPC UA (familia IEC 62541): cadru deschis pentru modele de informație și servicii de comunicație. Address Space, sesiunile, SecureChannel, identitatea aplicațiilor, autentificarea și autorizarea permit integrare semantică și controlată; mecanismele concrete depind de profilul și transportul selectat. Companion Specifications standardizează modele de domeniu.
- HMI-ul se proiectează conform principiilor de interacțiune și ergonomie, iar managementul alarmelor se bazează pe o filosofie documentată și pe EEMUA 191. Navigarea superficială și paleta funcțională sunt reguli de proiect, nu limite numerice universale impuse de ISO.
- Asocierea I/O trebuie să mențină consistența dintre schema electrică, configurația PLC și variabilele simbolice. Automatizarea transferului este utilă atunci când platformele o permit și când procesul de versiune este controlat.
- Metodologia în 7 pași: (1) proces + I/O, (2) siguranță funcțională, (3) buget temporal, (4) CPU + I/O, (5) rețea, (6) HMI + date, (7) validare/punere în funcțiune. Procesul este iterativ.

- Stația SAP demonstrează integrarea secvenței mecanice cu I/O, controlerul, siguranță funcțională, HMI, rețeaua și OPC UA. Configurația și costul final se stabilesc în BOM-ul proiectului și se validează în FAT/SAT.

7.8.1 Aplicare pe proiectul SAP: checklist de verificare

Pentru proiectele studenților Master PACSF/RIAI care vor proiecta un subsistem de control similar, următorul checklist verifică completitudinea:

- Inventar I/O complet, derivat din secvența mașinii, cu politica de rezervă documentată.
- Buget temporal documentat și CPU verificat prin timpul real al task-urilor, I/O și comunicațiilor, cu rezervă de execuție.
- Funcțiile de siguranță identificate prin evaluarea riscului, cu stare sigură, PLr/SIL cerut, capabilitatea subsistemelor unde este relevant și plan de validare.
- Schema electrică completă în mediul CAD/CAE al proiectului (de exemplu EPLAN), cu tag-uri și tipuri de semnal coerente.
- Asociere I/O transferat automat sau controlat prin listă verificată, cu trasabilitate între CAD electric și mediul PLC.
- Convenție de denumire descriptivă, documentată și aplicată consecvent; prefixele sensor/cmd/st/flg pot fi folosite ca exemplu, nu ca standard obligatoriu.
- Alegere rețea industrială documentată: standard client, motion, siguranță funcțională, topologie, diagnostic și disponibilitatea dispozitivelor.
- HMI proiectat cu navigare superficială și sarcini clare; ecran Home cu sinteză, moduri de operare, diagnostic și alarme raționalizate.
- Filosofie de alarmare documentată pe baza EEMUA 191; fiecare alarmă are cauză, consecință, acțiune și prioritate justificată.
- OPC UA expune numai datele necesare integrării și aplică politici de securitate, autentificare și autorizare conforme arhitecturii OT/IT; certificatele sunt utilizate acolo unde profilul selectat le cere.
- Documentație BOM hardware + diagramă logică program + lista variabile globale + manual operator HMI.

7.8.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipă; răspunsurile sintetice apar la sfârșitul fiecărei întrebări.

- Q1. De ce un PLC poate fi preferat unui PC general-purpose pentru controlul mașinii?
- Pentru predictibilitatea task-urilor, integrarea I/O și diagnostic, robustețe industrială și suportul pentru funcții de control/safety. Un IPC cu sistem real-time poate oferi la rândul lui determinism; diferența nu este „PLC determinist vs. orice OS nedeterminist”.
- Q2. Un task de proces are perioada 5 ms. Măsurarea online indică 1,6 ms logică, 0,7 ms servicii I/O/comunicație și 0,4 ms variație maximă observată. Care este rezerva?
- Timpul de caz nefavorabil este 2,7 ms, deci rezerva față de perioada task-ului este 2,3 ms. Se verifică separat task-urile de control al mișcării și de siguranță, precum și comportamentul la defect.
- Q3. Cum alegeți rețeaua industrială pentru un client care are deja un standard de fabrică?

- Mai întâi verificați standardul și ecosistemul clientului, apoi cerințele de motion/siguranță funcțională, topologia, diagnostic și compatibilitatea dispozitivelor. Geografia nu este suficientă pentru a alege protocolul.
- Q4. Un HMI cu 8 niveluri de meniu și ecrane aglomerate este automat „neconform ISO 9241”?
- Nu se poate concluziona numai dintr-un număr. ISO 9241 oferă principii de interacțiune; proiectul trebuie evaluat prin sarcină, lizibilitate, consistență și testare. În practică, o navigare mai superficială este de regulă preferabilă.
- Q5. Care este rolul EEMUA 191 în proiectarea alarmelor?
- Oferă un cadru de bună practică pentru filosofia, raționalizarea, proiectarea, operarea și monitorizarea alarmelor. Benchmark-urile se interpretează în contextul instalației; obiectivul este ca fiecare alarmă să fie utilă și acționabilă.
- Q6. Care este avantajul OPC UA față de un protocol de registre pentru integrarea PLC–MES?
- OPC UA adaugă model informațional, tipuri, evenimente/subscripții și mecanisme de securitate. Beneficiul este integrarea semantică și controlată a datelor, nu doar transportul valorilor brute.

7.9 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 7.1. Configurarea I/O cu rezervă

Enunț. O stație are 40 DI, 22 DO, 6 AI și 2 AO. Politica de proiect impune 25 % rezervă, rotunjită în sus. Sunt disponibile module DI16, DO16, AI4 și AO4. Determinați necesarul de canale și numărul de module.

Răspuns. Cu rezervă: 40 · 1,25 = 50 DI; 22 · 1,25 = 27,5 → 28 DO; 6 · 1,25 = 7,5 → 8 AI; 2 · 1,25 = 2,5 → 3 AO. Rezultă 4 × DI16 (64 canale), 2 × DO16 (32), 2 × AI4 (8) și 1 × AO4 (4). Rezerva fizică rezultată este mai mare decât minimul impus; se verifică și sloturile, alimentarea modulelor și dacă unele semnale trebuie să fie pe module failsafe.

Problema 7.2. Utilizarea task-ului ciclic

Enunț. Un task de proces are perioada de 4 ms. Estimările preliminare sunt: logică 1,4 ms, servicii I/O 0,6 ms, comunicație 0,5 ms, funcții de mișcare 0,3 ms. Politica de proiect cere cel puțin 30 % rezervă. (a) Este satisfăcută cerința? (b) Ce se întâmplă dacă se adaugă un diagnostic de 0,4 ms?

Răspuns. (a) Totalul este 2,8 ms, adică 70 % din 4 ms; rezerva este 30 %, exact la limită. (b) Cu diagnosticul, totalul devine 3,2 ms, iar rezerva scade la 20 %, sub politica de proiect. Soluții: mutarea diagnosticului într-un task mai lent (de exemplu 20 ms), creșterea perioadei la 5 ms dacă procesul o permite, sau un CPU mai performant. Valorile se confirmă online după integrare, în condiția de încărcare maximă.

Problema 7.3. Volumul datelor de trasabilitate publicate prin OPC UA

Enunț. Pentru fiecare ansamblu, stația SAP publică curba forță–cursă cu 200 de puncte (forța și poziția, câte 4 octeți fiecare) și un antet de 400 octeți. Cadența este 120 ansambluri/oră, iar stația funcționează 16 h/zi, 250 zile/an. Estimați volumul anual de date.

Răspuns. Pe ansamblu: 200 · 2 · 4 = 1 600 octeți plus antetul, deci aproximativ 2 kB. Pe oră: 120 · 2 kB = 240 kB. Pe an: 240 kB · 16 · 250 = 960 000 kB ≈ 0,96 GB. Volumul este mic pentru rețea și stocare; decizia de proiect privește politica de retenție (cerințele de trasabilitate ale beneficiarului), formatul și legătura fiecărei curbe cu identificatorul piesei și versiunea rețetei.

8 Controlul secvențial

GRAFCET, moduri de funcționare și PackML: de la mecanica echipamentului la specificația de comportament

Despre acest capitol

Capitolul 7 a stabilit arhitectura hardware a controlului. Capitolul de față tratează logica pe care această arhitectură o execută: succesiunea de etape, tranziții și moduri de funcționare prin care echipamentul își realizează ciclul.

Tema este abordată de la granița dintre proiectantul mecanic și automatist: GRAFCET ca limbaj comun de specificare, diagramele de mișcare și bugetul timpului de ciclu, modurile și stările de funcționare cu implicațiile lor mecanice, modelul de stare PackML și indicatorul OEE ca măsură a influenței proiectării mecanice asupra performanței. Studiile de caz din patru industrii și varianta didactică ALT a stației SAP ancorează conceptele în aplicații concrete.

La final, cititorul trebuie să poată specifica secvența de funcționare a unui echipament în GRAFCET, să construiască și să verifice bugetul timpului de ciclu și să identifice deciziile mecanice care condiționează disponibilitatea și performanța mașinii.

Standarde și referințe normative aplicabile

IEC 60848:2013, GRAFCET, limbaj de specificație pentru comportamentul secvențial [18].

IEC 61131-3:2025, ST, LD și FBD; SFC ca mecanism de structurare secvențială [118].

ISA-TR88.00.02-2022 [135] și ISA-88.00.01-2010 [136]: modele de stări/unități și cadrul utilizat pentru PackML.

IEC 62264-1:2013 (ISA-95): modele și terminologie pentru integrarea enterprise–control [115].

ISO 22400-1:2014 [137] și ISO 22400-2:2014+Amd 1:2017 [138]: cadrul și definițiile KPI pentru managementul operațiunilor de fabricație; Part 2 este în revizuire în 2026.

ISO 13849-1:2023 [3] și IEC 62061:2021+A1:2024+A2:2026 [4]: sisteme de comandă legate de siguranță.

ISO 13850:2015, funcția de oprire de urgență [131].

IEC 60204-1:2016+A1:2021, echipamentul electric al mașinilor [29].

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să delimiteze responsabilitățile proiectantului mecanic și ale automatistului în specificarea comportamentului mașinii;
- să specifice secvența de funcționare a unui echipament în GRAFCET;
- să construiască diagrame de mișcare și să verifice bugetul timpului de ciclu, inclusiv prin paralelizarea operațiilor;
- să definească modurile și stările de funcționare și să le pună în corespondență cu modelul PackML;
- să evalueze influența deciziilor mecanice asupra OEE și să recunoască limbajele de programare IEC 61131-3.

Cunoștințe prealabile

Se presupun cunoscute arhitectura de control din Capitolul 7 și actuatoarele și senzorii din Capitolele 4–6. Sunt utile noțiuni de automate cu stări finite și de cinematica mecanismelor.

Glosar de termeni și acronime

Acronimele și termenii tehnici utilizați pe parcursul capitolului sunt definiți la prima apariție și recapitulați în tabelul de mai jos pentru consultare rapidă (Tabelul 8.1).

Tabelul 8.1. Glosar de termeni și acronime utilizați în Capitolul 8.

Termen	Definiție
Caiet de sarcini (Lastenheft)	Documentul redactat de beneficiar care definește ce trebuie realizat: cerințele funcționale și non-funcționale, independent de soluție; bază pentru ofertă și acceptare (în germană, Lastenheft).
Grafcet	GRAphe Fonctionnel de Commande Étape-Transition, limbaj de specificație standardizat prin IEC 60848 pentru descrierea comportamentului secvențial prin etape, tranziții, receptivități și acțiuni.
SFC	engl.: Sequential Function Chart, formalism de structurare secvențială utilizat în IEC 61131-3. Este înrudit conceptual cu GRAFCET, dar nu trebuie tratat drept identic normativ cu IEC 60848.
Etapa	Element al GRAFCET care reprezintă o situație a părții secvențiale; etapa poate fi activă sau inactivă și poate avea asociate una sau mai multe acțiuni. Nu implică obligatoriu o configurație mecanică statică.
Specificație tehnică de realizare (Pflichtenheft)	Răspunsul tehnic al furnizorului la caietul de sarcini: descrie cum va fi satisfăcută fiecare cerință, arhitectură, componente, calcule, interfețe, parametri și metode de verificare (în germană, Pflichtenheft).
Tranziție	Element GRAFCET care separă două situații; trecerea este posibilă când toate etapele imediat precedente sunt active și receptivitatea asociată este adevărată.
Receptivitate	Condiția logica asociata unei tranziții Grafcet; poate combina semnale de intrare, temporizatoare și starea altor etape.
Acțiune	Comportament asociat unei etape. În implementările SFC pot fi utilizați calificatori de acțiune; exemplele N, S, R, L, D și P sunt o punte spre software, nu o clasificare mecanică a actuatorului.

Termen	Definiție
Ciclogramă	Diagramă timp–mișcare care reprezintă evoluția temporală a actuatorilor sau fazelor unui ciclu de producție; instrument utilizat pentru analiza concurenței, timpului de ciclu și posibilelor conflicte de mișcare.
Buget timp ciclu	Descompunerea timpului total de ciclu pe faze ale procesului, cu identificarea fazelor care pot fi paralelizate; instrument de decizie mecanică privind cinematica și concurenta actuatorilor.
PackML	engl.: Packaging Machine Language, model de stări și interfață de date pentru mașini, utilizat în ecosistemul OMAC/ISA și documentat în ISA-TR88.00.02-2022.
AUTO	Mod de operare automată în care secvența de producție se execută conform condițiilor și interblocărilor definite; funcțiile de siguranță rămân active conform arhitecturii.
MANUAL	Mod de operare pentru diagnostic, reglaj sau intervenții controlate. Comenzile permise, vitezele și accesul depind de evaluarea riscului și de conceptul mașinii.
SETUP	Mod de configurare/reglare pentru rețete, calibrare sau teste. Drepturile de acces, vitezele și funcțiile permise se stabilesc din sarcină, evaluarea riscului și cerințele beneficiarului.
HOME	Secvență sau stare de referențiere prin care axele/actuatoarele sunt aduse în configurații cunoscute atunci când aplicația o cere; necesitatea și strategia depind de tipul mecanismului și de informația de poziție disponibilă.
E-STOP	Emergency stop, funcție de siguranță, nu mod normal de operare. Trebuie să aibă prioritate față de comenzile de proces și să conducă la reacția sigură definită prin evaluarea riscului.
DRY RUN	Rulare de test fără produs sau cu condiții simulate, utilizată atunci când proiectul o prevede pentru verificarea secvenței și a timpilor; condițiile de siguranță rămân cele definite pentru mașină.
OEE	engl.: Overall Equipment Effectiveness, indicator agregat, uzual exprimat ca Disponibilitate × Performanță × Calitate. Interpretarea țintelor se face în contextul procesului și al regulilor organizației; nu există un prag „world-class” normativ universal.
MTBF	engl.: Mean Time Between Failures, indicator de fiabilitate utilizat pentru sisteme reparabile; interpretarea sa depinde de populația, condițiile de operare și metoda de colectare a datelor.
MTTR	engl.: Mean Time To Repair, indicator al timpului de reparare/restabilire, relevant pentru mentenabilitate și disponibilitate; definiția exactă trebuie armonizată cu sistemul de mentenanță.
Interlock	Interblocare, condiție care împiedică sau permite o acțiune în funcție de starea procesului. O interblocare de proces nu este automat o funcție de siguranță; aceasta din urmă se derivă din evaluarea riscului.
SAT	engl.: Site Acceptance Test, test de acceptanță la amplasamentul beneficiarului, executat conform planului și criteriilor contractuale ale proiectului.
FAT	engl.: Factory Acceptance Test, test de acceptanță realizat înaintea livrării, conform planului și criteriilor contractuale ale proiectului.

Harta capitolului

Parcursul capitolului: §8.1 Rolul controlului secvențial, perspectiva proiectantului mecanic; §8.2 Granița mecanic–automatist: cine specifică ce; §8.3 GRAFCET, limbajul comun mecanic-automatist; §8.4 Diagrame de mișcare și bugetul timpului de ciclu; §8.5 Studii de caz reprezentative din patru industrii; §8.6 Moduri și stări de funcționare, implicații mecanice; §8.7 PackML, model de stare și interfață comună pentru integrare; §8.8 OEE și influența proiectării mecanice; §8.9 IEC 61131-3, privire de ansamblu asupra limbajelor și structurării secvențiale; §8.10 Studiu de caz integrat, variantă didactică ALT a stației SAP; §8.11 Probleme aplicate; §8.12 Concepte cheie și întrebări de reflecție.

8.1 Rolul controlului secvențial: perspectiva proiectantului mecanic

Arhitectura hardware proiectată în Capitolul 7 (controlerul programabil, modulele I/O, rețelele industriale, interfața operator-mașină) este un schelet inert până când este populat cu logica de control. Această logică nu este, în marea majoritate a echipamentelor de fabricație, o funcție matematică continuă (cum ar fi un regulator PID care urmărește o referință), ci o secvență de stări discrete prin care echipamentul trece pentru a transforma o piesă brută într-un produs finit: alimentare → fixare → procesare → control → evacuare. Codificarea acestei secvențe (fără ambiguitate, fără situații de blocaj, cu tratarea sistematică a cazurilor de excepție) este obiectul controlului secvențial.

Discuția clasică despre control secvențial se centrează pe implementarea PLC. În proiectarea unui echipament este însă utilă separarea între specificația comportamentală și implementarea software. Proiectantul mecanic/mecatronic trebuie să specifice complet comportamentul care rezultă din mecanică (stări, mișcări, condiții fizice, limite, interblocări și reacții la defect) în timp ce automatistul transformă această specificație în arhitectură software și cod executabil (Figura 8.1). Responsabilitățile exacte se stabilesc în organizația și contractul proiectului; importantă este trasabilitatea deciziilor între discipline.

În proiectele bine structurate, această interfață este formalizată prin livrabile revizuite multidisciplinar: diagramă de secvență, diagramă timp–mișcare, listă de moduri și stări, condiții de tranziție, matrice de interblocări, tabel de defecte și reacții. Absența lor transferă implicit decizii de comportament către faza de programare și crește riscul modificărilor târzii. Nu există însă o repartizare universală a documentelor între „mecanic” și „automatist”; responsabilitatea trebuie definită explicit în planul de proiect și la revizuire de proiect [139].

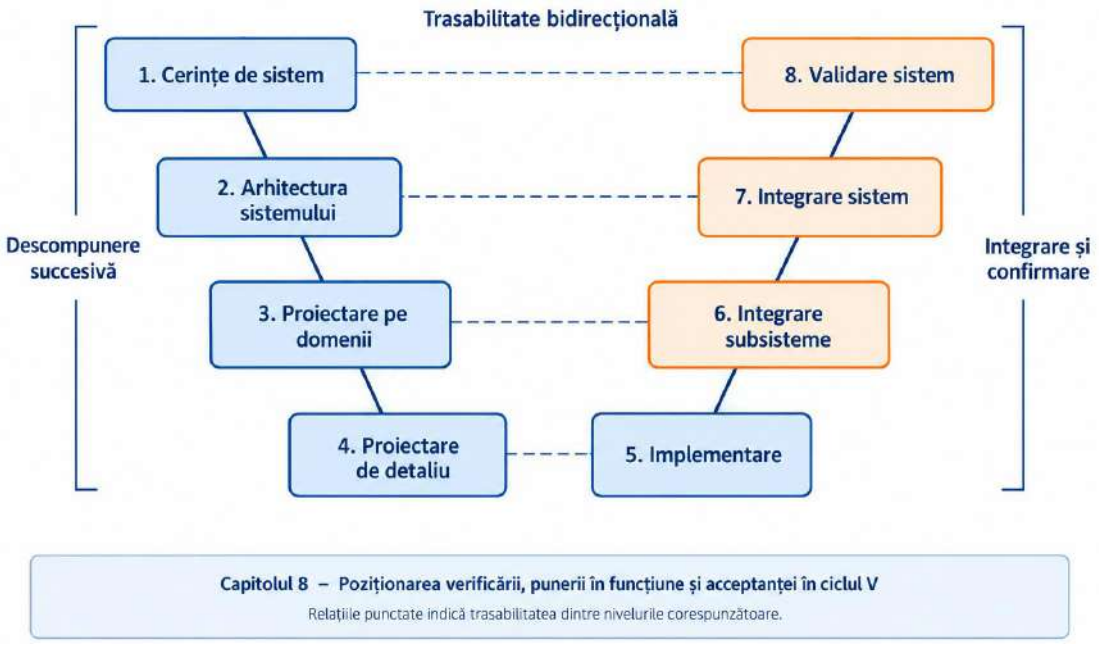


Figura 8.1. Poziționarea Capitolului 8 pe ciclul V de proiectare. Controlul secvențial este faza în care decizia de hardware (Capitolul 7) și comportamentul mecanic (Capitolele 3–6) se transformă într-un caiet de sarcini comportamental și, ulterior, în cod executabil pe PLC.

Capitolul tratează problema progresiv, de la interfața mecanic–automatist și fluxul de specificare până la GRAFCET, ciclogramă, bugetul timpului de ciclu, moduri/stări de operare, PackML, OEE și studiul de caz SAP. Accentul rămâne pe livrabilele de proiectare care fac comportamentul mașinii verificabil și implementabil, nu pe programarea detaliată a PLC-ului.

8.2 Granița mecanic–automatist: cine specifică ce

Interfața dintre proiectarea mecanică și automatizare se materializează într-un set de informații care trebuie să aibă proprietar, versiune și criteriu de acceptare. Tabelul 8.2 prezintă o împărțire de lucru recomandată, nu un standard contractual universal. În proiectele mecatronice mature, unele livrabile sunt elaborate în comun; esențial este ca geometria, cinematica, senzoristica și reacțiile fizice să fie reflectate fără ambiguități în specificația de control.

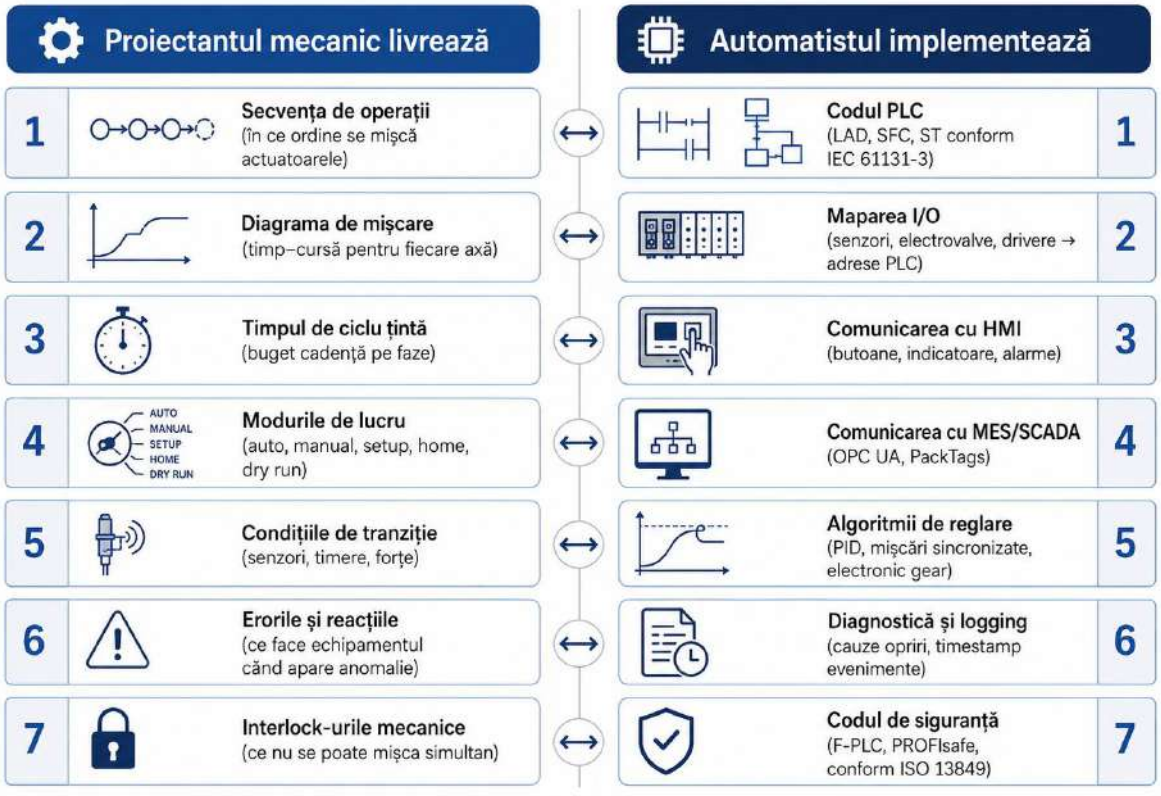


Figura 8.2. Granița mecanic-automatist: ce livrează proiectantul mecanic vs. ce livrează automatistul. Șapte responsabilități per parte, formalizabile ca documente contractuale.

O sursă frecventă de confuzie este responsabilitatea pentru interblocările rezultate din geometrie și cinematică: coliziuni între actuatoare, simultaneități interzise și condiții dependente de poziția fizică. Aceste restricții trebuie identificate în analiza mecanică/mecatronică și transferate explicit în specificația de control, indiferent de rolul care le implementează în software. Proprietatea și aprobarea livrabilului se stabilesc prin organizarea proiectului și contract (Tabelul 8.2).

Tabelul 8.2. Defalcarea formală a livrabilelor între proiectantul mecanic și automatist. Lista reprezintă un nucleu didactic de livrabile pentru colaborarea dintre cele două roluri; responsabilitățile concrete se stabilesc contractual.

Proiectantul mecanic livrează	Automatistul implementează
Secvența de operații (în ce ordine se mișcă actuatoarele)	Codul PLC (LAD, SFC, ST conform IEC 61131-3)
Diagrama de mișcare (timp-cursă pentru fiecare ax)	Alocarea I/O (senzori, electrovalve, drivere → adrese PLC)
Timpul de ciclu țintă (buget cadența pe faze)	Comunicarea cu HMI (butoane, indicatoare, alarme)
Modurile de lucru (auto, manual, setup, home, dry run)	Comunicarea cu MES/SCADA (OPC UA, PackTags)
Condițiile de tranziție (senzori, timere, forțe)	Algoritmii de regulare (PID, mișcări sincronizate, electronic gear)
Erorile și reacțiile (ce face echipamentul când apare anomalie)	Diagnostic și jurnalizare (cauze opriri, marcaj temporal al evenimentelor)
Interlock-urile mecanice (ce nu au voie să se miște simultan)	Codul de siguranță (F-PLC, PROFIsafe, conform ISO 13849)

8.2.1 Fluxul de la specificația mecanică la implementarea PLC

Trecerea de la livrabilele mecanice la implementarea PLC poate fi structurată în cinci pași, fiecare cu un rezultat verificabil (Figura 8.3). În metodologia didactică a capitolului, proiectantul mecanic/mecatronic conduce primele etape de definire a procesului și a comportamentului, iar automatistul finalizează implementarea software. Împărțirea reală a responsabilităților este contractuală. În modelul V, specificarea și proiectarea sunt urmate de integrare, FAT/SAT și validarea cerințelor; OEE este ulterior un indicator de exploatare, nu un test de acceptanță în sine.

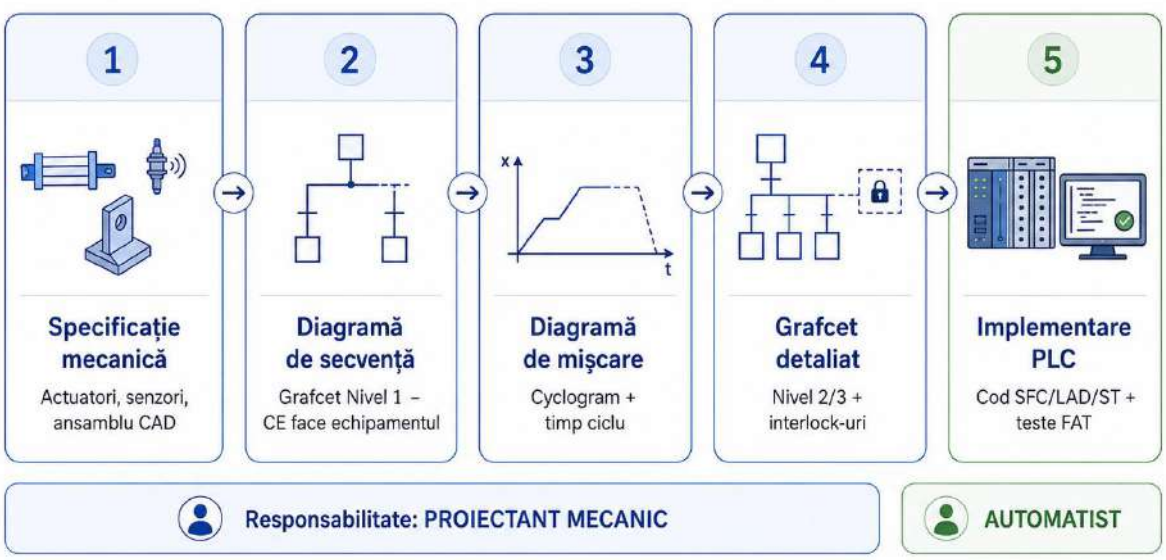


Figura 8.3. Flux de lucru în cinci pași, de la specificația mecanică la implementarea PLC. Alocarea responsabilităților este o convenție didactică și se adaptează structurii contractuale a proiectului.

Pasul 1. Specificația mecanică sintetizează rezultatele Capitolelor 3–6: actuatoare, senzori, geometrie, curse și forțe. Pasul 2. GRAFCET conceptual formalizează ordinea funcțională a operațiilor fără detalii de implementare. Pasul 3. Diagrama de mișcare adaugă dimensiunea temporală prin ciclogramă și bugetul timpului de ciclu. Pasul 4. GRAFCET detaliat introduce condiții, senzori, temporizări și referințe la I/O. Pasul 5. Implementarea PLC transpune specificația în limbajele și structurile software ale

platformei selectate. Termenii „conceptual” și „detaliat” sunt utilizați aici ca niveluri didactice, nu ca o ierarhie normativă impusă de IEC 60848.

În proiectele mature, pașii sunt susținuți de documente cu proprietar, versiune și criteriu de acceptare, revizuite multidisciplinar înainte de implementare. În proiectele mai puțin formalizate, informația poate rămâne verbală, iar decizii precum viteze, timpi de menținere sau secvențe de retragere ajung să fie luate târziu. Consecința este creșterea numărului de iterații în integrare; soluția este trasabilitatea cerință–secvență–I/O–test, nu transferul implicit al responsabilității către o singură disciplină.

În practică · Când granița devine difuză: semnale de alarmă

Trei simptome indică o graniță prost gestionată în proiectele de echipamente: (a) automatistul cere clarificări verbale despre comportament, ceea ce înseamnă ca specificația mecanica este incompletă; (b) apar modificări de hardware după lansarea programării PLC: modificări de schemă, butoane, panouri de acces; (c) cadența țintă din caietul de sarcini nu este atinsă la FAT, ceea ce indică un buget al timpului de ciclu absent sau greșit la pasul 3. Soluția preventivă este întotdeauna aceeași: formalizarea livrabilelor pașilor 2-4 ca documente cu format standardizat, validate prin revizuire de proiect înainte de a începe programarea PLC. Efortul suplimentar se estimează pentru proiectul concret; obiectivul este reducerea iterațiilor în integrare și punere în funcțiune, fără a presupune multiplicatori economici universali.

8.3 GRAFCET: limbajul comun mecanic-automatist

IEC 60848:2013 definește GRAFCET ca limbaj de specificație pentru descrierea funcțională a comportamentului secvențial [18]. IEC 61131-3:2025 utilizează SFC (Sequential Function Chart) ca mecanism de structurare secvențială în programele controlerelor [118]. Cele două formalisme au concepte comune (etape, tranziții și structurare secvențială) dar nu sunt standarde identice și nu trebuie presupusă o transpunere 1:1 în toate platformele. În acest capitol, GRAFCET este folosit pentru specificația comportamentală, iar SFC pentru structurarea implementării software atunci când platforma îl utilizează.

Distincția dintre GRAFCET și SFC trebuie păstrată pe tot parcursul proiectului. GRAFCET (IEC 60848) este utilizat aici ca limbaj de specificație comportamentală, iar SFC ca mecanism de structurare secvențială în ecosistemul IEC 61131-3. O specificație GRAFCET bine formulată poate ghida implementarea SFC, dar transpunerea nu este în mod necesar 1:1 și trebuie verificată pentru platforma și convențiile software utilizate.

Avantajul GRAFCET pentru proiectant este vizibilitatea relației dintre etape, tranziții și acțiuni. În loc să cuantificăm generic „numărul de pagini” față de LAD, criteriul relevant este dacă o secvență poate fi verificată rapid de echipa multidisciplinară și dacă fiecare tranziție are o justificare fizică, o condiție observabilă și o reacție definită la neîndeplinirea acesteia.

Pentru proiectantul mecanic/mecatronic, valoarea GRAFCET constă în legătura explicită dintre situații logice și comportamente fizice. O etapă poate corespunde unei configurații cunoscute sau unei faze de mișcare/proces, iar tranziția trebuie să exprime condiția care permite evoluția. Dacă echipa nu poate explica ce comportament fizic reprezintă o etapă, ce feedback îl caracterizează și ce condiție autorizează trecerea mai departe, specificația trebuie reformulată.

8.3.1 Sintaxa GRAFCET: etape, tranziții, acțiuni

Un GRAFCET este construit din etape, tranziții, receptivități, acțiuni și legături orientate (Figura 8.4). Pentru proiectant, corespondența cu sistemul fizic este esențială: etapa descrie o situație a secvenței, tranziția exprimă posibilitatea de evoluție, receptivitatea formalizează condiția, iar acțiunea definește comportamentul cerut. Unele situații sunt poziții mecanice stabile, altele sunt faze de mișcare sau proces; de aceea nu trebuie impusă artificial regulă „o etapă = o poziție statică”.

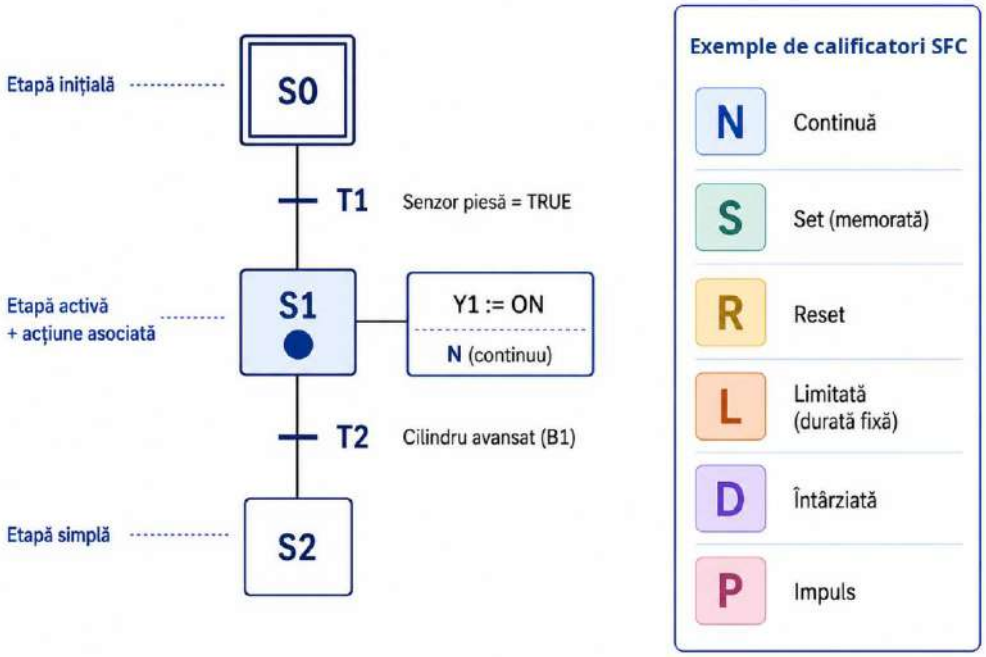


Figura 8.4. Elemente de bază GRAFCET și legătura cu implementarea SFC. Stânga: exemplu de etape, tranziții și receptivități. Dreapta: exemple de calificatori de acțiune SFC (N, S, R, L, D, P) utilizați ca punte spre implementare; setul și semantica exactă se verifică în standardul și platforma utilizate.

8.3.1.1 Etape: stări mecanice identificabile

O etapă GRAFCET reprezintă o situație discretă a părții secvențiale. Într-o mașină aceasta poate descrie o configurație confirmată (de exemplu cilindru retras sau axă la referință) dar și o fază activă, precum apropiere, presare sau evacuare. Criteriul util este ca etapa să aibă o semnificație fizică și funcțională neambiguă și să poată fi verificată suficient pentru comandă, diagnostic și testare.

Regulă de proiect recomandată: stările relevante pentru comandă, interblocare sau diagnostic trebuie să fie observabile suficient pentru scopul lor. Nu fiecare etapă GRAFCET necesită obligatoriu un senzor dedicat; unele stări pot fi inferate din poziția unei axe măsurate, din starea unui subsistem sau dintr-o combinație de semnale. Pentru tranzițiile critice, temporizarea singură nu trebuie utilizată ca substitut nejustificat pentru feedback-ul fizic.

În notația GRAFCET, etapele sunt reprezentate prin pătrate/dreptunghiuri, iar etapele inițiale se disting conform convenției standardului. La inițializarea GRAFCET se activează situația inițială definită de model. Această stare logică nu trebuie confundată automat cu referențierea mecanică HOME: dacă mașina are nevoie de o secvență de recuperare sau referențiere, aceasta se specifică explicit și se validează separat.

O eroare frecventă este formularea unei etape prea largi, de exemplu „Presare”, atunci când procesul necesită condiții și reacții diferite pentru apropiere, aplicarea forței, menținere și retragere.

Descompunerea se face numai până la nivelul necesar pentru a exprima clar acțiunile, condițiile de tranziție, timeout-urile și reacțiile la defect; nu există obligația ca fiecare micro-fază să fie o stare mecanică statică.

8.3.1.2 Tranziții: condiții fizice măsurabile

O tranziție GRAFCET poartă o condiție logică (receptivitate) care, atunci când devine adevărată și toate etapele imediat precedente sunt active, autorizează trecerea marcajului activ mai departe. Condiția este o expresie booleană (combinație de senzori, temporizatoare și stări ale altor etape) dar, pentru proiectantul mecanic, condiția trebuie înțeleasă nu ca o formulă booleană, ci ca răspunsul concret la întrebarea: „cum știm, în lumea fizică, că această tranziție poate să se facă?”

Cele patru tipuri de condiții fizice care apar în tranzițiile industriale sunt: (1) confirmare pozițională, senzor inductiv, optic, sau contact mecanic confirmă că un actuator a ajuns la poziția căutată (de exemplu B1 = TRUE pentru capăt de cursă cilindru); (2) prag analogic atins, un transmitter (forță, presiune, temperatură) trece peste un prag prestabilit (forță > 8 kN, presiune < 0,5 bar); (3) timer expirat, un interval de timp definit s-a scurs (T2 expirat după 0,5 s, timer pentru stabilizare termică); (4) input operator sau exterior, buton pe HMI, semnal de la PLC upstream, comandă MES (Start ciclu, Confirmare piesă OK).

Acest audit al observabilității permite identificarea timpurie a senzorilor sau informațiilor lipsă. Decizia de a adăuga un senzor se justifică prin risc, diagnosticabilitate, precizie și cost pe ciclul de viață; costurile de retrofit sunt dependente de mașină și nu pot fi generalizate prin multiplicatori universali.

Din punct de vedere notațional, condițiile booleene din tranziții pot fi exprimate prin operatori logici sau prin convenția software adoptată. Pentru proiectant este mai importantă formularea fizică neambiguă, de exemplu: „senzor B1 activ ȘI presiune_OK ȘI permisiv de ciclu valid”. Funcțiile de siguranță, inclusiv oprirea de urgență, rămân tratate în stratul de siguranță și nu trebuie reduse la o simplă condiție de proces în GRAFCET. Elementele temporale trebuie specificate numai acolo unde procesul le justifică, cu valori derivate din dinamica echipamentului și validate la test.

8.3.1.3 Acțiuni asociate etapelor: de la cerința fizică la calificatorul SFC

În implementările bazate pe SFC pot apărea calificatori de acțiune precum N, S, R, L, D și P, cu semantică definită de standardul și mediul de programare utilizat. În GRAFCET, proiectantul trebuie să specifice în primul rând comportamentul fizic cerut (continuu, memorat, temporizat, impulsional etc.) fără a transforma calificatorul software într-o proprietate a actuatorului. Tabelul 8.3 păstrează calificatorii ca punte către implementare, nu ca clasificare mecanică normativă.

Tabelul 8.3. Exemple de calificatori de acțiune SFC și posibile utilizări în implementarea comportamentului cerut. Alegerea calificatorului este o decizie software verificată față de cerința fizică.

Calificator SFC (exemplu)	Semnificație în implementare	Exemplu de utilizare
N	Acțiune ne-memorată, activă cât timp etapa asociată este activă.	Menținerea unei comenzi către un actuator pe durata etapei, dacă arhitectura procesului o cere.
S	Setare/memorare a acțiunii până la o resetare explicită.	Păstrarea unei stări sau comenzi peste ieșirea din etapă, atunci când proiectul justifică memorarea.
R	Resetarea unei acțiuni memorate anterior.	Anularea unei stări/comenzi setate printr-o acțiune memorată.
L	Limitarea temporală a unei acțiuni.	Comandă de marcare sau funcție auxiliară cu durată specificată.

Calificator SFC (exemplu)	Semnificație în implementare	Exemplu de utilizare
D	Întârzierea activării acțiunii.	Activarea unei funcții după un timp de stabilizare definit.
P	Acțiune impulsională; varianta exactă depinde de semantica suportată de platformă.	Trigger de cameră/achiziție sau eveniment software de scurtă durată.

Alegerea arhitecturii actuatorului și a distribuitorului influențează modul în care comanda trebuie menținută sau memorată, dar relația nu este biunivocă cu un calificator SFC. Starea sigură la pierderea energiei, comportamentul la reset și posibilitatea de diagnostic se stabilesc prin analiza funcțională și, pentru funcțiile relevante, prin evaluarea riscului.

8.3.2 Cele cinci reguli ale execuției GRAFCET

Standardul IEC 60848 definește cinci reguli de evoluție care stabilesc semantica execuției unui GRAFCET [18]. Pentru proiectant, ele trebuie corelate cu observabilitatea stărilor fizice, timeout-urile, reacțiile la defect și dinamica reală a actuatorilor; regulile modelului nu înlocuiesc analiza comportamentului fizic al mașinii.

Regulă 1. Situația inițială. La inițializarea GRAFCET, etapele desemnate ca inițiale sunt active conform specificației. Implicația de proiectare este definirea explicită a relației dintre starea logică inițială și starea fizică a mașinii. Dacă poziția fizică nu este cunoscută după pornire sau după o oprire, se prevede o secvență de referențiere/recuperare adecvată; aceasta nu rezultă automat din regulă GRAFCET.

Regulă 2. Validarea tranziției. O tranziție este validată când toate etapele imediat precedente sunt active și receptivitatea asociată este adevărată. Receptivitatea poate utiliza semnale fizice, stări interne sau condiții temporale. Pentru tranzițiile cu impact asupra procesului ori riscului, proiectantul trebuie să justifice observabilitatea, timeout-ul și reacția la lipsa confirmării, evitând presupunerile bazate exclusiv pe timp atunci când feedback-ul fizic este necesar.

Regulă 3. Trecerea prin tranziție. În semantica GRAFCET, trecerea printr-o tranziție determină simultan dezactivarea etapelor imediat precedente și activarea etapelor imediat următoare. Aceasta este o regulă a modelului de specificație și nu trebuie tradusă ca afirmație despre „același ciclu de scan PLC”. Implementarea reală introduce perioade de task, actualizare I/O și timpi fizici ai actuatorilor; evoluțiile ulterioare trebuie condiționate de feedback și de bugetul temporal al procesului.

Regulă 4. Evoluții simultane. Atunci când structura GRAFCET permite evoluții concurente, acestea pot activa ramuri paralele ale specificației. Paralelismul logic nu garantează însă simultaneitatea fizică: timpii actuatorilor, debitele, puterea disponibilă și sincronizarea trebuie verificate la nivel de sistem.

Regulă 5. Activare și dezactivare simultană a unei etape. Dacă, în aceeași evoluție GRAFCET, o etapă este simultan activată și dezactivată, se aplică regulă de evoluție definită de IEC 60848. Această regulă nu impune o durată mecanică minimă egală cu perioada task-ului PLC și nu poate fi utilizată pentru dimensionarea senzorilor; detectarea evenimentelor rapide se verifică separat pe întregul lanț senzor–I/O–task.

Sinteză pentru proiectant: regulile GRAFCET asigură o semantică neambiguă a specificației secvențiale, dar comportamentul fizic rămâne guvernat de dinamica actuatorilor, observabilitate, timpi de comunicație și condițiile de siguranță. Specificația trebuie deci completată cu timeout-uri, reacții la lipsa confirmării, condiții de permisivitate și criterii de recuperare după defect.

8.3.3 Tipuri de structuri: secvența, alternativă, simultană, salt

Structurile uzuale (secvență simplă, selecție/ramificare alternativă, paralelism și buclă/salt) pot fi combinate pentru a descrie procese secvențiale complexe (Figura 8.5). Alegerea structurii se face din dependențele reale ale procesului; nu există procente universale de utilizare care să constituie regulă de proiectare.

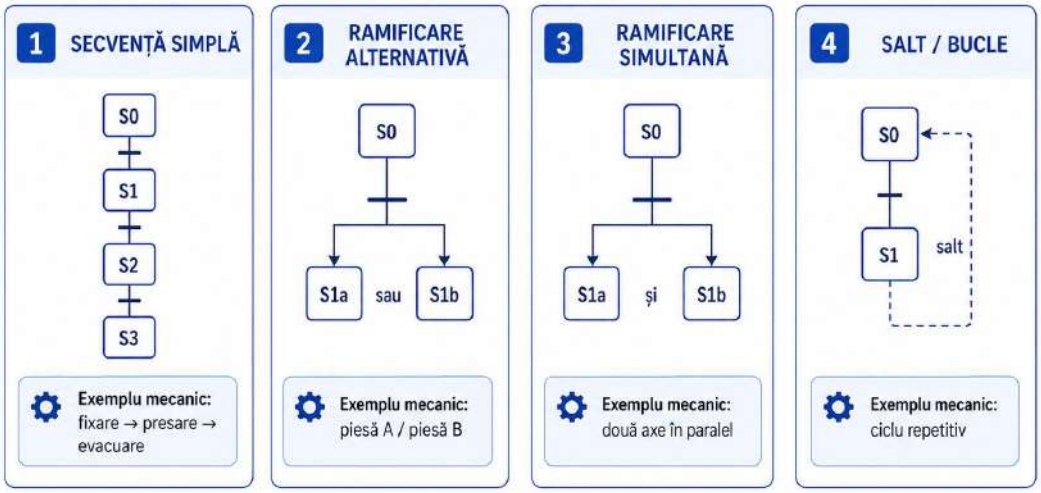


Figura 8.5. Cele patru structuri uzuale de modelare secvențială în GRAFCET: secvență simplă, ramificare alternativă, ramificare simultană și salt/buclă, ilustrate prin exemple mecanice reprezentative.

Secvența simplă, cea mai uzuală, reprezintă o succesiune liniară de etape conectate prin tranziții unice. Aplicabilă la procese pas-cu-pas (alimentare → fixare → procesare → evacuare), unde fiecare etapă nu poate începe până când etapa precedentă nu a fost confirmată complet. Avantajul de proiectare este simplicitatea: timpul de ciclu este suma timpilor de etapă, iar erorile pe fiecare etapă au reacții bine definite.

Ramificarea alternativă introduce o selecție între ramuri în funcție de receptivități. Pentru o selecție deterministă, condițiile trebuie proiectate astfel încât rezultatul intenționat să fie neambiguu; dacă mai multe tranziții devin simultan fireable, comportamentul trebuie analizat conform semanticii IEC 60848 și corectat dacă nu corespunde intenției procesului [18]. Aplicații tipice sunt variantele de produs și separarea traseelor OK/NOK.

Ramificarea simultană (AND-divergence) introduce paralelismul: la o tranziție, mai multe ramuri se activează simultan, iar tranziția următoare (convergență) se validează doar când TOATE ramurile au ajuns la etapa lor finală. Aplicații tipice: două axe care se mișcă în paralel până când ambele ajung la poziție (sincronizare la convergență), două stații care lucrează pe piese paralele și trebuie să se aștepte una pe alta. Această structură este esențială pentru optimizarea timpului de ciclu, discutată în detaliu în §8.4.

Saltul / bucla reia o secvență de la o etapă anterioară, fără parcurgere completă. Aplicații: cicluri continue de producție (la finalul ciclului, salt la S0 pentru piesa următoare), bypass pe stații opționale

(dacă varianta de produs nu cere o operație, salt peste stația respectivă). Saltul diferă de o ramificare alternativă simplă prin faptul că structura permite mai multe puncte de ieșire pentru aceeași destinație, reducând numărul de etape redundante în GRAFCET.

8.3.4 Descompunerea ierarhică pe trei niveluri

Pentru documentația de proiect este utilă o descompunere ierarhică. Modelul în trei niveluri prezentat aici este o convenție de engineering pentru această carte (funcțional, tehnologic și operațional) și nu trebuie interpretat ca o ierarhie obligatorie impusă de IEC 60848 (Figura 8.6).

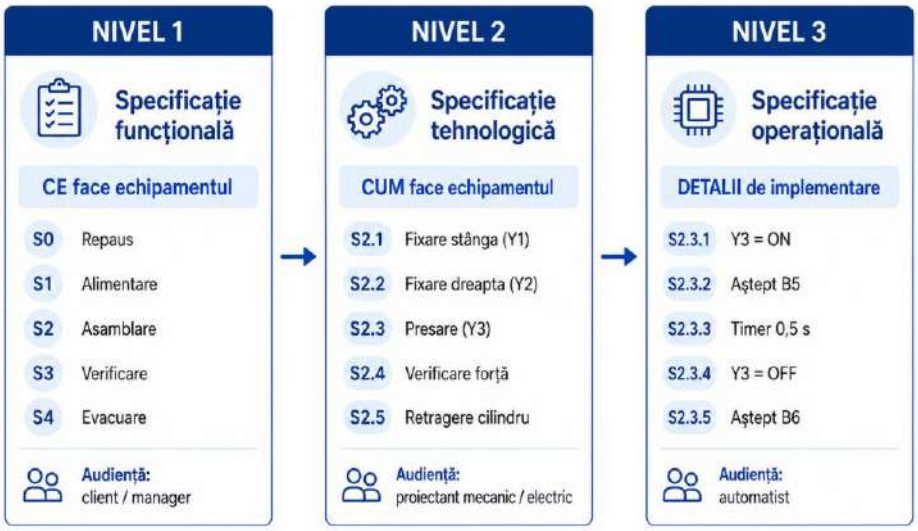


Figura 8.6. Descompunere didactică a specificației GRAFCET pe trei niveluri de detaliu: funcțional, tehnologic și operațional. Nivelurile sunt o convenție pedagogică a acestui capitol și nu reprezintă o clasificare normativă a IEC 60848.

Nivelul 1. Specificația funcțională răspunde la întrebarea CE face echipamentul. Utilizează un număr de etape suficient pentru a descrie funcțiile majore (de exemplu Alimentare, Asamblare, Verificare, Evacuare), fără referințe inutile la actuatoare concrete. Acest nivel poate fi comunicat clientului și corelat cu oferta sau caietul de sarcini. Este deliberat abstract: „În etapa S2 echipamentul efectuează asamblarea”, fără a preciza încă soluția fizică.

Nivelul 2. Specificația tehnologică răspunde la întrebarea CUM realizează echipamentul funcția. Etapele de nivel superior se descompun în faze relevante pentru actuatoare, senzori, condiții și interblocări. Acesta este un livrabil important al proiectării mecatronice; nivelul de detaliu trebuie să permită verificarea fizică și trasabilitatea la listă I/O, fără a impune că fiecare etapă are un senzor dedicat.

Nivelul 3. Specificația operațională introduce detaliile necesare implementării: comenzi, temporizări, condiții fine, gestionarea timeout-urilor și reacțiile la defect. În proiectul didactic, acest nivel este finalizat de automatist împreună cu proiectantul de sistem. El poate fi implementat prin SFC, ST, LD/FBD sau combinații ale acestora, în funcție de platformă; nu este „direct executabil” prin simpla lui desenare.

În proiectul didactic al cărții, proiectantul mecanic/mecatronic este responsabil pentru Nivelurile 1 și 2, iar Nivelul 3 este dezvoltat împreună cu automatistul și finalizat în implementare. Într-un proiect real, împărțirea exactă este contractuală; orice conflict între niveluri trebuie rezolvat prin revizuire de proiect și trasabilitate la cerința de sistem, nu prin „prioritatea” automată a unei discipline.

În practică · Granița Nivel 2–Nivel 3 în proiecte cu grade diferite de formalizare

În proiectele cu procese de dezvoltare mature, nivelul de detaliu și responsabilitățile sunt documentate, revizuite și gestionate prin controlul modificărilor. Nivelul 2 poate fi un livrabil formal al proiectării mecatronice, dar proprietarul documentului se stabilește contractual. Modificările după aprobarea de proiect trebuie trasate și revalidate în funcție de impact.

În proiectele mai puțin formalizate, specificația tehnologică poate fi dedusă informal din desenul de ansamblu. Riscul este ca viteze, timpi, ordini de retragere sau condiții de recuperare să fie definite târziu și fără trasabilitate. Soluția este o specificație comună și o revizuire multidisciplinară înaintea integrării.

8.4 Diagrame de mișcare și bugetul timpului de ciclu

GRAFCET-ul descrie logica secvenței: ce se întâmplă, în ce ordine și sub ce condiții. El poate include condiții temporale, dar nu oferă aceeași vizibilitate asupra suprapunerii mișcărilor și asupra bugetului temporal ca o diagramă timp–mișcare. De aceea, în proiectarea mecanică/mecatronică se utilizează complementar ciclograma, care reprezintă explicit evoluția în timp a mișcărilor și fazelor de proces.

8.4.1 Ciclogramă: limbajul nativ al proiectantului mecanic

Ciclograma este o reprezentare grafică bidimensională în care axa orizontală reprezintă timpul unui ciclu, iar pe verticală sunt enumerate actuatoarele sau fazele relevante. Pentru fiecare element se pot reprezenta intervale de comandă, poziții, curse sau alte mărimi utile. Vizualizarea simultană evidențiază timpul total de ciclu, concurența mișcărilor, timpii de așteptare și suprapunerile care necesită analiză de coliziune sau interblocare.

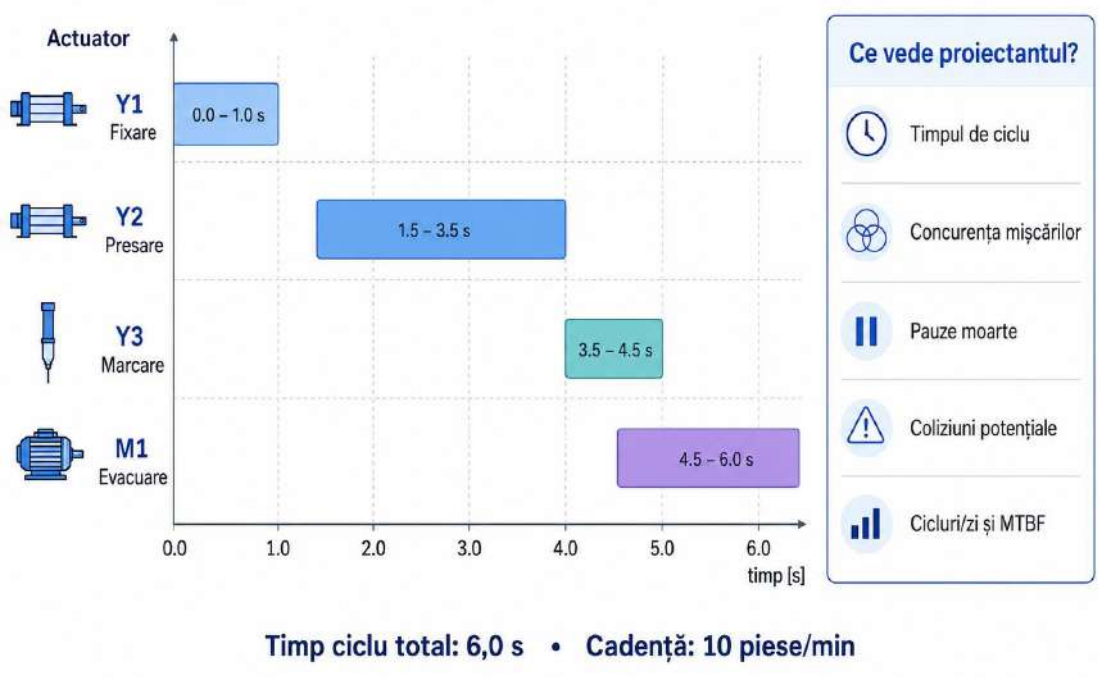


Figura 8.7. Exemplu de ciclogramă pentru un ciclu cu patru actuatoare (Y1 fixare, Y2 presare, Y3 marcare, M1 evacuare). Timp total de ciclu 6,0 s → cadență 10 piese/min. Panoul lateral sintetizează informațiile pe care proiectantul mecanic le poate extrage direct din diagramă.

Informația citită din ciclogramă completează GRAFCET-ul: timpul total de ciclu și cadența, suprapunerea mișcărilor, timpii de așteptare, ferestrele cu risc de coliziune și numărul estimat de cicluri (Figura

8.7). Aceste elemente susțin dimensionarea cinematică, verificarea duratei de viață și definirea interblocărilor. Unele pot fi deduse și dintr-o specificație secvențială detaliată, dar ciclograma le face explicit vizibile pe aceeași axă temporală.

Conceptual, ciclograma este apropiată de diagramele timp–deplasare utilizate în analiza mecanismelor: accentul cade pe relația temporală dintre mișcări. Într-un echipament mecatronic, reprezentarea poate abstractiza tehnologia actuatorului și poate urmări poziția, comanda sau faza de proces, în funcție de obiectivul analizei.

În practică, ciclograma poate fi construită într-un instrument de simulare, într-un mediu de engineering sau chiar într-o foaie de calcul. Instrumentul este secundar; important este ca axa temporală, identificatorii actuatorilor/fazelor, convențiile de reprezentare, timpul total de ciclu și cadența rezultată să fie explicite și trasabile la specificația echipamentului.

Tabelul 8.4 rezumă cele cinci tipuri de informații pe care ciclograma le evidențiază direct și care completează specificația GRAFCET.

Tabelul 8.4. Cinci tipuri de informații evidențiate direct de ciclogramă. Aceste informații completează specificația GRAFCET și susțin deciziile de proiectare cinematică și de dimensionare.

Tip de informație	Ce semnificație are pentru proiectantul mecanic
Timpul total de ciclu	Intervalul dintre începutul și finalul ciclului, ținând cont de fazele executate în paralel; determină cadența rezultată și se compară cu cerința din caietul de sarcini.
Concurența mișcărilor	Intervale în care două sau mai multe bare se suprapun pe verticală → identifică oportunitățile de paralelizare deja existente și pe cele potențiale.
Pauzele moarte	Intervale fără activitate utilă în reprezentarea urmărită. Se diferențiază de timpii tehnologici necesari și se analizează pentru eventuală suprapunere sau eliminare.
Coliziunile potențiale	Suprapuneri între bare ale actuatorilor care lucrează în zone fizice comune (de exemplu, doi roboți cu overlap zone) → conduc la interlock-uri obligatorii în Grafcet.
Numărul de cicluri / zi	Se derivă din timpul productiv și timpul de ciclu; multiplicat cu durata de viață proiectată, oferă cerința de cicluri pentru actuatoare și componente. Se verifică față de durata de viață declarată și regimul de sarcină, nu printr-un MTBF dedus direct.

8.4.2 Bugetul timpului de ciclu și optimizarea prin paralelism

Bugetul timpului de ciclu este o reprezentare derivată a ciclogramei, în care fazele procesului sunt agregate pentru a evidenția contribuția lor temporală și eventualele suprapuneri. Pentru o secvență strict serială, timpul total este suma duratelor fazelor; când există paralelism, timpul de ciclu rezultă din traseul temporal efectiv până la finalizarea ciclului. Reprezentarea este utilă pentru proiectarea cadenței: se pornește de la cadența țintă din caietul de sarcini (de exemplu 12 piese/min), se calculează tactul maxim admisibil (60/12 = 5 s/piesă) și se alocă un buget fazelor și interdependențelor.

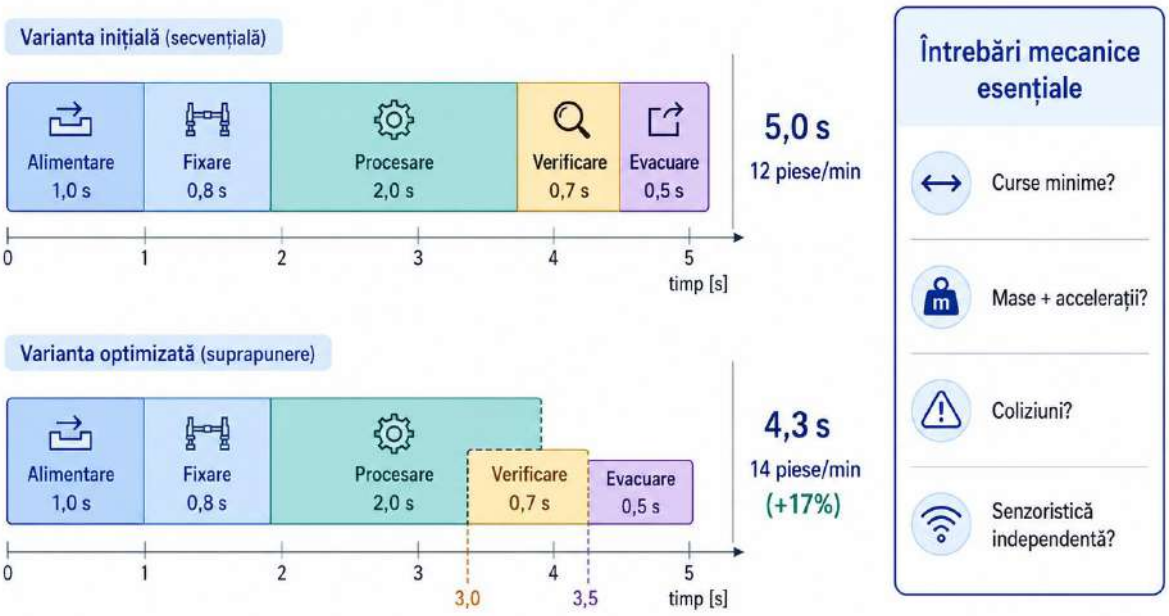


Figura 8.8. Bugetul timpului de ciclu pentru o linie de asamblare cu cadența-țintă 12 piese/min. Sus: variantă secvențială, 5,0 s/ciclu. Jos: exemplu didactic de suprapunere controlată a verificării cu fazele finale de procesare și evacuare, rezultând 4,3 s/ciclu (aprox. 14 piese/min). Paralelizarea este admisă numai dacă independența fizică, dinamica și senzoristica o permit.

Optimizarea unui buget de timp se face frecvent prin paralelizare: identificarea fazelor care nu au dependențe fizice stricte și suprapunerea controlată a execuției lor. În scenariul didactic din Figura 8.8, o parte din verificare începe încă din faza finală a procesării, iar evacuarea se suprapune cu finalul verificării. Suprapunerea totală elimină aproximativ 0,7 s din execuția strict serială, reducând timpul de ciclu de la 5,0 s la 4,3 s și crescând cadența de la 12 la aproximativ 14 piese/min. O astfel de optimizare este validă numai dacă fiecare fază dispune de confirmări independente, nu apar coliziuni și sursele de energie pot susține simultaneitatea.

Identificarea oportunităților de paralelizare cere întrebări mecanice specifice. Patru întrebări pe care proiectantul mecanic trebuie să le pună pentru fiecare pereche de faze consecutive: (1) Curse cilindri minime, fazele operează în zone fizice distincte sau cer aceleași axe? (2) Mase + accelerații, dacă fazele operează simultan, masele în mișcare se suprapun și generează forțe de inerție excesive? (3) Pot paraleliza mișcările, există coliziuni în volumul de lucru dacă cele două se execută simultan? (4) Senzoristica, am senzori care detectează independent finalizarea fiecărei faze, sau ele depind unul de altul?

Fezabilitatea paralelizării se decide printr-un compromis între timp de ciclu, risc de coliziune, dimensionarea surselor de energie, complexitate și costul ciclului de viață. Beneficiul economic trebuie calculat pentru volumul de producție și contextul proiectului, fără procente universale de cost sau venit.

În practică · Patru întrebări pentru ciclogramă: checklist de revizuire

La fiecare revizuire de proiect intermediar, proiectantul mecanic trebuie să prezinte ciclograma actualizată și să răspundă explicit la patru întrebări:

- 1. Care este timpul total de ciclu? Cadența rezultată este peste cerința din caietul de sarcini?
- 2. Unde sunt pauzele moarte? Pot fi reduse prin paralelizare?
- 3. Care sunt coliziunile potențiale? Au interlock-uri Grafcet corespunzătoare?
- 4. Numărul de cicluri/an justifică clasa de cilindri / actuatoare aleasă?

Dacă răspunsul la oricare întrebare este „nu știu” sau „trebuie să verific”, revizuire de proiect-ul se amână: ciclograma nu este matur pentru lansarea programării PLC.

8.5 Studii de caz reprezentative din patru industrii

Exemplele sunt scenarii didactice reprezentative, construite pentru a ilustra tipuri diferite de secvențe și constrângeri. Valorile numerice sunt orientative și trebuie înlocuite cu date de proces, cataloage și cerințe validate atunci când se proiectează un echipament real.

Pentru fiecare studiu, se prezintă: (a) descrierea procesului și cadența țintă; (b) secvența GRAFCET la Nivel 2 (cu sub-etape); (c) notele de proiectare mecanică relevante, curse, mase, accelerații, MTBF; (d) particularitățile de comportament, tipul ramificației GRAFCET, paralelism, integrare cu sisteme externe. Comparația transversală între cele patru cazuri arată diversitatea de constrângeri mecanice care decurg din diferențe aparent mici în caietul de sarcini.

8.5.1 Stația de înșurubare automată: industrie auto

Înșurubarea automată este un proces reprezentativ pentru asamblarea auto, în care cuplul, unghiul și rezultatul operației pot fi înregistrate pentru trasabilitate. În scenariul didactic al capitolului se consideră 12 șuruburi pe ciclu și o durată de ordinul câtorva secunde pentru fiecare operație de înșurubare; timpul total rezultă din secvență, mișcările auxiliare și posibilitățile de paralelizare. Valorile sunt ipoteze de exercițiu, nu benchmark-uri industriale.

Secvența GRAFCET la Nivel 2 cuprinde 9 sub-etape, cu o ramificare alternativă critică:

- S0: Repaus, aștept paleta cu piesa. Toți cilindrii retrași.
- T1: Paleta detectată (senzor inductiv pe poziție).
- S1: Blocare paletă (stoper pneumatic Y1), paleta se oprește cu precizie.
- T2: Stoper avansat confirmat (senzor B1).
- S2: Poziționare șurubelnița (servo X,Y la coordonate calculate).
- T3: Poziție atinsă (urmărire servo encoder).
- S3: Înșurubare (control cuplu + unghi, în 4 trepte).
- T4: Cuplu și unghi în toleranța.
- S4: Verificare (cuplu în tolerant?), punct de decizie.
- T5a / T5b: OK → S5 / NOK → S_{Err}, ramificare alternativă.
- S5: Deblocare paletă + marcare OK.
- S_{Err}: Marcare NOK + alarmă + reținere piesă pentru inspecție umană.

Pentru același scenariu se pot adopta, exclusiv didactic, un domeniu de lucru X–Y de 200 × 200 mm, un cuplu de proces în intervalul 5–25 N·m și un stoper pneumatic cu alezaj de 32 mm și cursă de 50 mm. Aceste valori nu reprezintă selecții validate: rigiditatea, accelerațiile, raportul de transmitere, toleranța de indexare și durata de viață se determină prin calcul și din datele componentelor selectate. Numărul anual de cicluri se derivă din programul de producție și se utilizează la verificarea duratei de viață, nu la atribuirea directă a unui MTBF.

Datele de proces per operație (de exemplu cuplu, unghi, rezultat și identificatorul piesei) pot face parte din strategia de trasabilitate cerută de client și de sistemul de calitate. IATF 16949:2016 rămâne ediția aplicată în 2026, în timp ce ediția a doua este în curs de revizuire; standardul stabilește cerințe pentru sistemul de management al calității, nu o schemă universală de date pentru fiecare șurub. Conținutul trasabilității se definește prin planul de control și cerințele clientului [140].

8.5.2 Linia de termoformare pentru ambalaj alimentar

Termoformarea pentru ambalaj alimentar poate utiliza un film polimer cu avans indexat: materialul este încălzit, format în matriță, umplut, sigilat și tăiat. În scenariul didactic al capitolului, duratele ciclului și numărul de ambalaje pe index sunt ipoteze de proiect utilizate pentru exersarea ciclogramei și a paralelismului; ele nu sunt prezentate ca valori tipice ale industriei.

Secvența GRAFCET la Nivel 2 este strict pipeline (pas-cu-pas, fără ramificări), cu 7 sub-etape:

- S0: Repaus.
- T1: Start ciclu (din mod AUTO).
- S1: Avans film (servomotor, pas precis).
- T2: Film poziționat (encoder).
- S2: Termoformare (matrița se închide, vacuum; forță de închidere ipotetică 30 kN).
- T3: Timer termoformare OK (ipoteză didactică: 1,2 s la 180 °C).
- S3: Umplere produs (în alveole, prin doze gravimetrice paralele).
- T4: Umplere completa.
- S4: Aplicare film superior + sigilare.
- T5: Sigilare OK.
- S5: Tăiere + separare ambalaje.
- T6: Tăiere OK.
- S6: Evacuare pe conveior ieșire.

În scenariul didactic, pasul de avans al filmului este 350 mm cu toleranță ±0,5 mm, iar forța de închidere a matriței este 30 kN. Aceste valori conduc la cerințe pentru servoacționare, măsurarea poziției, rigiditatea cadrului și controlul termic, dar nu determină singure un anumit tip de reductor sau o rezoluție universală de encoder. Pentru zona de produs, materialele, drenabilitatea, accesul la curățare și gradul de protecție se stabilesc din regimul real de igienizare și din cerințele proiectului. ISO 14159:2002 rămâne ediția publicată relevantă în 2026, cu o revizie aflată în dezvoltare; standardul nu impune universal IP69K pentru toate componentele [141].

Integrarea PackML poate fi solicitată pentru standardizarea interfeței mașinii; aceasta este o cerință de client sau de arhitectură, nu o obligație generală a industriei alimentare. Cerințele de trasabilitate și etichetare ale produsului trebuie tratate separat de arhitectura de control a echipamentului.

8.5.3 Celula robotizată de sudare

În scenariul didactic, celula robotizată de sudare prelucrează piese de dimensiuni și mase moderate cu doi roboți care pot lucra concurent asupra aceleiași piese. Timpii de operație, sarcină utilă și cadența sunt date de proiect și se determină din programul de sudare, traiectorii, poziționer și manipulare; avantajul robotizării nu se exprimă printr-un multiplicator universal față de sudarea manuală.

Secvența GRAFCET la Nivel 2 cuprinde ramificare simultană cu sincronizare la convergență (rendez-vous), cea mai complexa dintre cele patru cazuri:

- S0: Home (roboți în poziție park, în afara zonei de lucru).
- T1: Operator confirma piesa fixata + start.
- S1: Închidere uși de protecție (funcția de interblocare este proiectată din evaluarea riscului și implementată prin SRP/CS validat conform arhitecturii de siguranță) [3, 12].
- T2: Uși închise + condițiile de siguranță îndeplinite.

- S2: [PARALEL], Robot 1 suda zona A, Robot 2 suda zona B.
- S2a: Robot 1, sudare zona A (35 s, ipoteză didactică).
- S2b: Robot 2, sudare zona B (40 s, ipoteză didactică).
- T3: Ambii roboți gata (sincronizare la convergență).
- S3: Inspecție vizuala (camera 3D pentru verificare geometrie).
- T4: Inspecție OK.
- S4: Deschidere uși + semnalizare.
- S_{Err}: Alarma + stop roboți (dacă inspecția detectează defect).

Pentru procesul de sudare, sistemul local de captare și evacuare a fumului se dimensionează din evaluarea expunerii, poziția sursei, debitul necesar și cerințele de sănătate și securitate aplicabile. Aceste cerințe de proces se tratează separat de logica GRAFCET și de funcțiile de siguranță ale celulei.

Particularitatea de comportament este ramificarea simultană cu sincronizare la convergență: robotul care termină primul așteaptă îndeplinirea condiției comune înainte de etapa următoare. Perioada rețelei, schimbul de stări și orice mecanism de evitare a coliziunii se dimensionează din dinamica roboților și capabilitățile controlerelor și se validează pe configurația reală. Evitarea coliziunii nu trebuie redusă la un timp fix de rețea sau la un orizont universal de predicție.

8.5.4 Stand de testare etanșeitate

Standul de testare a etanșeității este utilizat în aplicații precum schimbătoare de căldură, circuite fluidice sau recipiente. Metoda de măsurare se alege în funcție de rata de scurgere admisă, volumul intern, gazul de test, timpul disponibil, temperatura și incertitudinea cerută. Domeniul și sensibilitatea diferă substanțial între metode și echipamente; în exemplul didactic se consideră un ciclu de ordinul zecilor de secunde, fără a-l trata ca benchmark industrial.

Secvența GRAFCET la Nivel 2:

- S0: Repaus.
- T1: Piesa pe poziție + start.
- S1: Închidere garnituri (cilindri cu presiune controlată).
- T2: Garnituri etanșe confirmate (senzor presiune diferențiala).
- S2: Pre-test (vid sau pre-presurizare; 2–5 s numai ca ipoteză didactică pentru stabilizare).
- T3: Presiune în fereastra de stabilizare definită pentru test (exemplu didactic: P0 ± 1 %).
- S3: Test propriu-zis (măsurare a decăderii presiunii; 30 s ca ipoteză didactică).
- T4: ΔP măsurat.
- S4: Decizie (ΔP < tolerant → OK / NOK).
- T5a / T5b: Ramificare OK / NOK.
- S5: Marcare OK + evacuare zona acceptare.
- S_{NOK}: Marcare NOK + evacuare zona rebut.

Rezoluția și incertitudinea se dimensionează din limita de acceptare și din bugetul de măsurare; selecția traductorului și metoda de calibrare se stabilesc pentru configurația concretă de test.

În scenariul didactic, stabilitatea termică și izolarea față de vibrații sunt tratate ca surse de incertitudine. Temperatura admisă, timpul de stabilizare și metodă de calibrare se stabilesc prin bugetul de incertitudine și studiul capabilității; piesele master OK/NOK pot fi utilizate pentru verificări periodice atunci când procedura metrologică o justifică.

Tabelul 8.5 compară transversal cele patru scenarii didactice prezentate în această secțiune.

Tabelul 8.5. Comparație transversală a celor patru scenarii didactice. Valorile și reperele normative sunt specifice contextului fiecărei aplicații și trebuie validate pentru proiectul real.

Aspect	Înșurubare auto	Termoformare	Sudura robot	Etanșeitate
Cadență / durate (scenariu didactic)	4–8 s/șurub (H)	3–6 s/ciclu, 8–12 amb. (H)	30–90 s/piesă (H)	10–30 s/piesă (H)
Tip ramificare Grafcet	Alternativă (OK / NOK)	Pipeline (pas-cu-pas)	Simultană (rendez-vous)	Alternativă (OK / NOK)
Paralelism	S2 (X+Y servo)	S3 (8-12 doze)	S2 (2 roboți)	Niciun
Standard / reper relevant	IATF 16949:2016 + cerințe OEM [140]	ISO 14159:2002 + cerințe de igienă aplicabile [141]	ISO 10218-2:2025 + evaluarea riscului [12]	Cerințe metrologice și de trasabilitate specifice aplicației
Pârghie mecanică critică	Stoper / indexare (fiabilitate)	Cadru și matriță (rigiditate / igienă)	Zone de lucru și evitare coliziuni	Etanșări și incertitudinea măsurării

8.6 Moduri și stări de funcționare: implicații mecanice

În afara ciclului automat, o mașină trebuie să gestioneze stări și moduri pentru reglare, diagnostic, referențiere, testare și recuperare. Denumirile și numărul acestora nu sunt universale. Proiectantul mecanic/mecatronic trebuie să identifice ce configurații fizice, accesuri, limitări de mișcare și feedback sunt necesare pentru fiecare stare prevăzută în specificația mașinii, menținând separat funcțiile de siguranță precum E-STOP.

Implicația mecanică a modurilor depășește logica PLC: accesibilitatea, vizibilitatea, opritorii mecanici, mecanismele de reglare, pozițiile de service și dispozitivele de protecție trebuie anticipate în concept. Modificările tardive pot genera cost și revalidare suplimentare, dar impactul economic este specific proiectului și nu se exprimă prin multiplicatori universali.

8.6.1 Set reprezentativ de moduri și stări operaționale

Nu există un set universal de „șase moduri obligatorii” pentru orice mașină. Pentru proiectare este însă util să analizăm un set reprezentativ de stări și moduri întâlnite frecvent: AUTOMAT, MANUAL, SETUP/REGLARE, HOME/REFERENȚIERE și DRY RUN/TEST, la care se adaugă funcția de siguranță E-STOP. Cerințele reale se stabilesc din analiza sarcinilor, evaluarea riscului și caietul de sarcini al beneficiarului.

- AUTOMAT (producție). Secvența de producție se execută conform stărilor, interblocărilor și condițiilor definite. Funcțiile de siguranță rămân active conform arhitecturii mașinii.
- MANUAL (diagnostic/intervenție). Permite comenzi individuale sau secvențe limitate pentru diagnostic, reglare și mentenanță. Mișcările permise, viteza/forța și condițiile de acces se stabilesc prin evaluarea riscului și procedura de intervenție; nu există un procent universal din viteza nominală.
- SETUP/REGLARE. Permite configurarea rețetelor, calibrarea și reglajele autorizate. Parametrii accesibili, limitele de mișcare și drepturile de utilizator se definesc din proces și analiza riscului, nu printr-o reducere procentuală universală a vitezei.

- HOME/REFERENȚIERE. Secvență sau stare prin care axele/actuatoarele sunt aduse într-o configurație cunoscută atunci când aplicația o cere. Necesitatea unei referențieri după pornire, schimbarea modului sau o oprire depinde de tipul traductorului de poziție, pierderea energiei și strategia de recuperare.
- E-STOP activ. Oprirea de urgență este o funcție de siguranță, nu un mod normal de operare. Acționarea dispozitivului trebuie să conducă la reacția sigură stabilită prin evaluarea riscului; resetarea dispozitivului nu trebuie să producă repornirea automată a mașinii.
- DRY RUN/TEST. Rulare fără produs sau cu condiții simulate, utilizată dacă proiectul o prevede pentru verificarea secvenței și a timpilor. Mișcările, forțele și bypass-urile permise trebuie definite explicit; modul de test nu anulează funcțiile de siguranță.

Acest set este un cadru didactic de verificare. Proiectele pot utiliza mai puține sau mai multe moduri, iar denumirile pot diferi. STEP-BY-STEP, JOG, CLEANING/CIP/SIP și TEST sunt exemple de funcții suplimentare care trebuie specificate numai dacă procesul și evaluarea riscului le justifică.

8.6.2 Tranzițiile între moduri și relația cu E-STOP

Tranzițiile între moduri sunt guvernate de o mașină de stări de nivel superior, deasupra GRAFCET-ului de producție. Tranzițiile nu sunt arbitrare: condițiile de schimbare a modului trebuie definite astfel încât să păstreze siguranța operațională și starea controlată a mașinii (Figura 8.9).



Figura 8.9. Moduri și stări operaționale ale mașinii și relația lor cu funcția separată de siguranță E-STOP. Tranzițiile și necesitatea HOME/RECOVERY se stabilesc pentru arhitectura concretă.

O regulă critică este că funcția de oprire de urgență trebuie să fie disponibilă atunci când standardele aplicabile o cer și să aibă prioritate față de comenzile normale. ISO 13850:2015 definește principiile funcției, iar IEC 60204-1 tratează cerințe relevante pentru realizarea electrică. Categoria de oprire aplicabilă și nivelul necesar al funcției de siguranță (de exemplu PLr sau SIL, după standardul ales) se stabilesc prin evaluarea riscului și arhitectura funcției; nu există regula universală „E-STOP = categoria 3”. După resetarea dispozitivului de oprire de urgență, repornirea nu trebuie să fie automată [3, 4, 29, 131]. Necesitatea unei secvențe HOME înainte de reluarea producției depinde de informația de poziție disponibilă și de strategia sigură de recuperare.

Tranzițiile între AUTO, MANUAL și SETUP trebuie condiționate astfel încât să nu genereze mișcări neașteptate și să mențină o configurație cunoscută. Unele mașini cer referențiere HOME, altele păstrează poziția prin encodere absolute sau folosesc secvențe controlate de recovery. Regula de proiect este definirea explicită a stării de intrare/ieșire pentru fiecare mod și validarea acesteia în FAT/SAT, nu impunerea universală a HOME.

8.6.3 Implicațiile mecanice ale modurilor și stărilor

Tabelul de mai jos sintetizează un set de cerințe mecanice care trebuie analizate pentru modurile/stările adoptate în proiect (Tabelul 8.6). Lista este un checklist de proiectare, nu o prescripție universală; elementele aplicabile se confirmă prin analiza sarcinilor, evaluarea riscului și cerințele beneficiarului.

Tabelul 8.6. Implicații mecanice ale unui set reprezentativ de moduri/stări de operare și ale funcției E-STOP. Cerințele concrete se stabilesc pentru mașină și evaluarea de risc specifice.

Mod / funcție	Cerință mecanică de analizat	Criteriu de proiectare / verificare
AUTOMAT	Configurație de producție cu acces și protecții conforme conceptului mașinii.	Condițiile de pornire, acces și interblocare se verifică față de proces și evaluarea riscului.
MANUAL	Acces pentru diagnostic și vizibilitate asupra mișcărilor permise, dintr-o poziție compatibilă cu strategia de siguranță.	Viteza, forța, dispozitivul de validare (enabling device) și comenzile disponibile se stabilesc din evaluarea riscului; nu există un procent universal din viteza nominală.
SETUP	Acces la elemente de reglare, schimbare format și calibrare prevăzute în concept.	Reglaje cu repere, scale/blocări și drepturi de acces definite; se previn reglajele ambigue sau necontrolate.
HOME	Repere și feedback suficiente pentru referențiere atunci când arhitectura o cere.	Se pot utiliza encodere, senzori de referință și/sau opritori mecanici; toleranța se derivă din cerința axei, nu dintr-o valoare universală.
E-STOP	Configurația mecanică trebuie să poată atinge sau menține starea sigură definită.	Reacția poate include oprire controlată, STO, menținerea/evacuarea energiei etc., după analiza riscului; resetarea nu repornește automat.
DRY RUN / TEST	Condiții de test și poziții ale sculelor definite pentru rulare fără produs sau cu semnale simulate.	Mișcările, forțele și eventualele bypass-uri se specifică și se validează; funcțiile de siguranță rămân active conform conceptului.

În practică · Modul MANUAL: proiectați accesul și observabilitatea

Modul MANUAL nu înseamnă doar „butoane pe HMI”. Tehnicianul trebuie să poată identifică starea actuatorilor și să execute numai mișcările permise de procedura de intervenție. Vizibilitatea se obține prin amplasare, ferestre, camere sau alte mijloace, iar accesul în zone periculoase se tratează prin conceptul de siguranță și dispozitivele de protecție adecvate. Proiectarea trebuie să evite situațiile în care diagnosticarea încurajează ocolirea protecțiilor sau utilizarea improprie a E-STOP.

8.7 PackML: model de stare și interfață comună pentru integrare

Modurile și stările locale descriu modul în care operatorul și mașina interacționează în exploatare. Pentru integrarea într-o linie este util un vocabular comun de stări, comenzi și date. ISA-TR88.00.02-2022 oferă un exemplu de implementare a conceptelor ISA-88 pentru stări și moduri ale mașinilor/unităților și constituie baza de referință utilizată aici pentru PackML; documentul se sprijină pe modelele și terminologia ISA-88.00.01-2010 [135, 136]. Adoptarea nu este obligatorie universal: se aplică atunci când este cerută de beneficiar, de arhitectura liniei sau de strategia de standardizare a OEM-ului.

PackML provine din inițiativa OMAC pentru mașini de ambalare și este utilizat și în alte aplicații de fabricație atunci când interoperabilitatea stărilor și a datelor aduce valoare [135]. Pentru proiectantul mecanic/mecatronic, relevanța sa este sistemică: stările de oprire și recuperare trebuie corelate cu

configurația fizică, buffer-ele și interfețele de transfer influențează comportamentul liniei, iar datele de stare trebuie transmise coerent către HMI/MES. Nu se presupune că toate industriile sau toți OEM-ii cer PackML.

8.7.1 Mașina de stări cu 17 stări

Modelul PackML utilizat în ISA-TR88.00.02-2022 conține 17 stări: ABORTING, ABORTED, CLEARING, STOPPING, STOPPED, RESETTING, IDLE, STARTING, EXECUTE, COMPLETING, COMPLETE, HOLDING, HELD, UNHOLDING, SUSPENDING, SUSPENDED și UNSUSPENDING [135]. Tranzițiile sunt declanșate de comenzi și condiții definite de implementare. Este important să distingem stările stabile (de exemplu STOPPED, IDLE, COMPLETE, HELD, SUSPENDED, ABORTED) de stările tranzitorii. Figura 8.10 prezintă modelul fără a confunda ABORT cu funcția de oprire de urgență a mașinii.

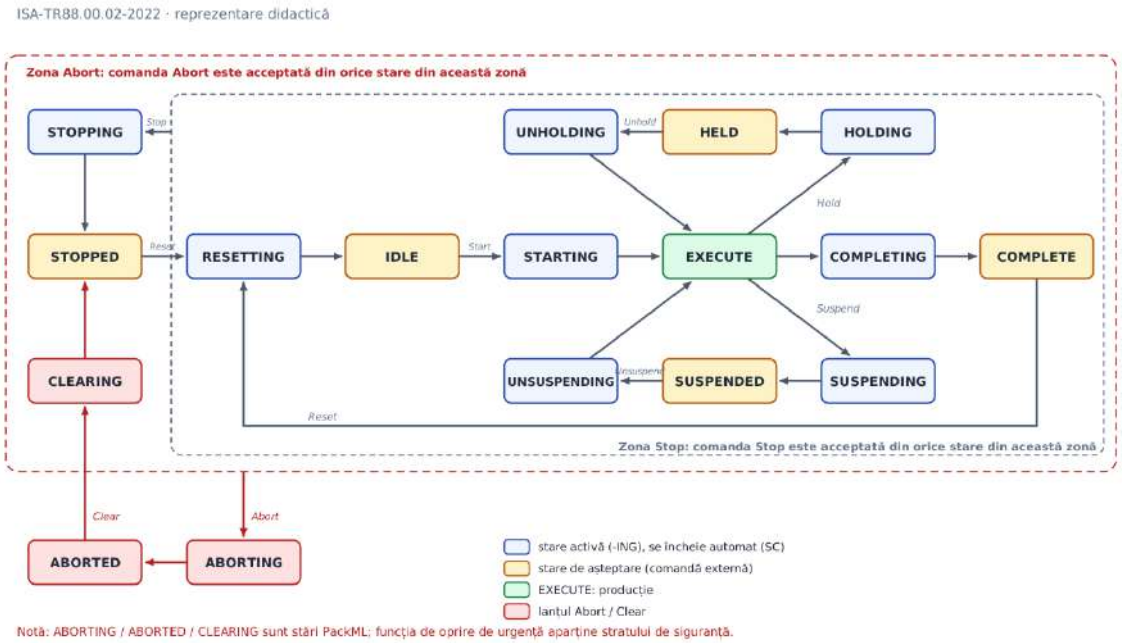


Figura 8.10. Modelul PackML cu 17 stări conform ISA-TR88.00.02-2022. Reprezentarea evidențiază fluxul principal, buclele HOLD/SUSPEND și ramura ABORT/CLEARING; oprirea de urgență rămâne o funcție de siguranță distinctă.

HELD și SUSPENDED au semnificații diferite în modelul PackML. În modelul de referință, HELD este asociată unei opriri controlate generate de condiții interne ale unității, iar SUSPENDED este utilizată pentru situații în care execuția este împiedicată de condiții externe sau de linie [135]. Corespondența concretă cu indicatorii OEE/MES trebuie totuși documentată explicit în modelul de date al proiectului.

Stările ABORTING, ABORTED și CLEARING gestionează o secvență PackML de abandon și recuperare a stării mașinii. Ele nu sunt sinonime cu emergency stop. Oprirea de urgență aparține stratului de siguranță și poate determina, în implementare, trecerea modelului operațional spre ABORTING/ABORTED, dar cele două concepte rămân distincte. CLEARING descrie recuperarea controlată după o stare ABORTED; cerințele de acces fizic, evacuare a pieselor și readucere în stare cunoscută se definesc pentru mașină concretă.

8.7.2 PackML pentru proiectantul mecanic: corespondența stărilor

Pentru proiectantul mecanic/mecatronic sunt relevante cinci aspecte:

1. PackML poate fi o cerință explicită a beneficiarului. Dacă apare în caietul de sarcini, trebuie definite profilul de implementare, ediția și responsabilitatea pentru testare; în absența cerinței, utilizarea este o decizie de arhitectură.
2. Modelul de stare este un contract de integrare. Extensiile sau modurile locale se pun în corespondență, documentat, cu modelul utilizat, fără a altera arbitrar semantica stărilor comune.
3. HELD și SUSPENDED influențează proiectarea fluxului. Buffer-ele mecanice pot reduce suspendările generate de condiții externe, dar efectul depinde de variabilitatea timpilor de proces, capacitatea buffer-ului și politica de control a liniei.
4. CLEARING poate impune cerințe de acces și recuperare. Capotele, retragerea sculelor, iluminarea și posibilitatea de extragere a produsului se proiectează numai dacă strategia de clearing a mașinii le cere.
5. PackTags facilitează expunerea structurată a stării și a datelor de producție [135]. Calculul OEE nu rezultă automat din folosirea PackML; definițiile timpilor, pierderilor și ferestrei de măsurare trebuie armonizate cu MES și cu modelul informațional al organizației [115].

Corespondența dintre unele stări PackML și implicațiile mecanice observabile este prezentată în Tabelul 8.7.

Tabelul 8.7. Corespondența dintre unele stări PackML și implicațiile mecanice observabile. Configurația concretă a mașinii în fiecare stare se definește în profilul de implementare și nu este impusă universal de denumirea stării.

Stare PackML	Poziție / configurație mecanică corespunzătoare
STOPPED	Stare stabilă după oprire. Configurația mecanică și condițiile de acces sunt definite de proiect și de conceptul de siguranță.
IDLE	Stare stabilă de pregătire pentru execuție. Nu implică universal HOME, scule retrase sau o anumită stare a materialului.
EXECUTE	Starea în care funcția de producție/operare a modului curent este executată.
HELD	Stare stabilă după HOLDING. Poziția piesei și a actuatorilor depinde de strategia de hold a mașinii.
SUSPENDED	Stare stabilă după SUSPENDING, frecvent asociată unei condiții externe/linie. Configurația mecanică se definește în profilul mașinii.
ABORTED	Stare stabilă după ABORTING. Nu este sinonimă cu E-STOP; starea mecanică și recuperarea se definesc prin proiect.

8.8 OEE și influența proiectării mecanice

Overall Equipment Effectiveness (OEE) sintetizează utilizarea productivă a echipamentului prin componentele Disponibilitate (A), Performanță (P) și Calitate (Q), utilizate uzual în relația:

$$\mathrm{OEE} = A \cdot P \cdot Q \tag{8.1}$$

Pentru ca indicatorul să fie comparabil, proiectul trebuie să definească explicit baza temporală, ciclul ideal și regulile de clasificare a producției și pierderilor [137, 138, 142].

OEE trebuie interpretat în contextul procesului, mixului de produse, ferestrei de timp și regulilor de clasificare a pierderilor. Pragurile istorice prezentate în literatura TPM ca niveluri „world-class” sunt

benchmark-uri de practică, nu cerințe ISO 22400 și nu trebuie utilizate ca criterii universale de acceptare a unei mașini [142].

OEE este influențat atât de proiectarea echipamentului, cât și de operare, mentenanță, logistică și politica de clasificare a timpilor. Proiectarea mecanică poate limita sau îmbunătăți disponibilitatea, performanța și calitatea prin fiabilitate, accesibilitate, cinematică, rigiditate, precizie și stabilitate; nu este însă corect să atribuim valoarea OEE unei singure discipline.

8.8.1 Componentele OEE: definiții și convenții de calcul

Ținta de disponibilitate se stabilește contractual și pe baza modelului de producție; standardul nu impune un prag universal.

Ținta de performanță se stabilește pentru procesul concret; micro-opririle, mersul la viteză redusă și pierderile de ritm trebuie clasificate consecvent în sistemul de date.

Ținta de calitate depinde de produs, capabilitatea procesului și criteriile de acceptare. În aplicații critice poate fi mult mai severă decât un procent generic.

8.8.2 Pârghii mecanice pentru fiecare componentă OEE

Figura 8.11 descompune OEE în cele trei componente ale sale și asociază fiecăreia principalele pârghii mecanice.

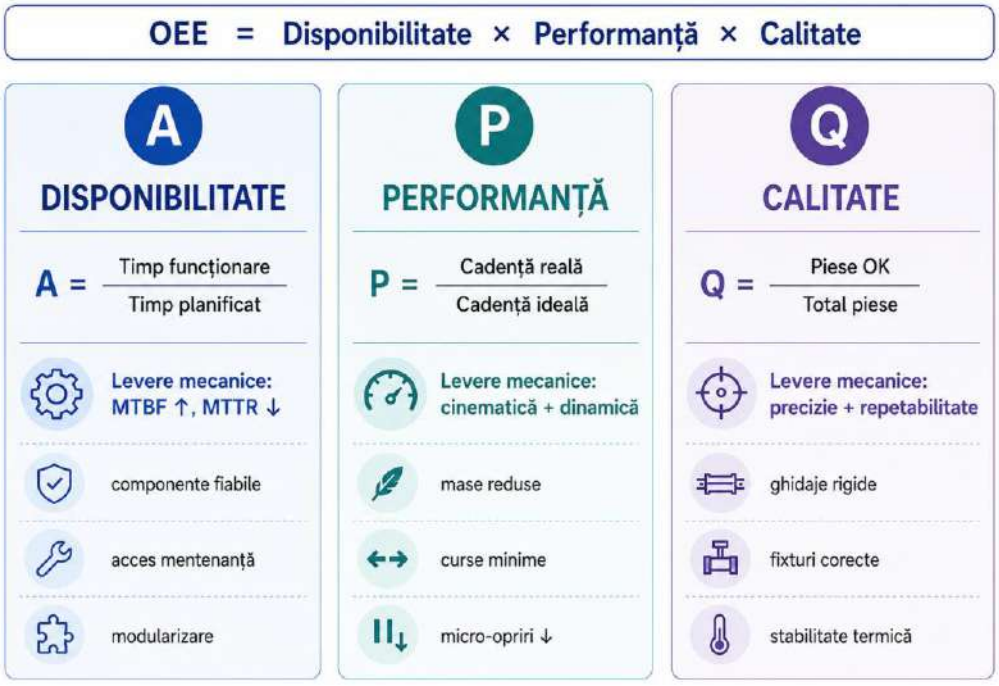


Figura 8.11. Descompunerea OEE în cele trei componente și principalele pârghii mecanice asociate. Disponibilitatea este influențată de fiabilitate și mentenabilitate (inclusiv MTBF și MTTR), performanța de cinematică și dinamică, iar calitatea de precizie, repetabilitate și stabilitate.

Descompunerea OEE pe pârghii de proiectare ajută la legarea indicatorului de decizii tehnice verificabile.

Pentru Disponibilitate (A), pârghiile mecanice sunt fiabilitatea și mentenabilitatea. Componentele se dimensionează din sarcină, număr de cicluri, mediu, factori de utilizare și datele de durată de viață disponibile. MTBF și MTTR sunt indicatori de sistem/exploatare și nu pot fi deduși numai din materialul unei etanșări sau din clasa unui rulment. Accesul, modularitatea și înlocuirea rapidă trebuie verificate prin proceduri de service și criterii de mentenanță.

Pentru Performanță (P), pârghiile mecanice includ bugetul timpului de ciclu, cursele, masele în mișcare, accelerațiile, rigiditatea, vibrațiile și posibilitatea de concurență între operații. Optimizarea se face prin modelare și măsurare, cu respectarea limitelor actuatorilor, procesului și siguranței; paralelizarea este utilă numai când independența fizică și resursele comune o permit.

Pentru Calitate (Q), pârghiile mecanice includ lanțul de toleranțe, geometria și repetabilitatea dispozitivelor de fixare, rigiditatea, stabilitatea termică și strategia metrologică (Tabelul 8.8). Componentele de precizie se selectează din cerința funcțională și bugetul de eroare. Principiul 3-2-1 este relevant pentru poziționarea pieselor rigide atunci când geometria și procesul îl permit, dar nu este o regulă universală pentru orice fixture.

Tabelul 8.8. Pârghii mecanice care pot influența componentele OEE. Efectul fiecărei intervenții se cuantifică pe datele și convențiile de calcul ale proiectului, nu prin multiplicatori universali.

Componenta OEE	Pârghie mecanică	Cum se implementează în proiectare
A: Disponibilitate	**MTBF ↑**	Componente dimensionate pentru sarcina, ciclurile și mediul reale; selecție pe durata de viață declarată și datele de fiabilitate disponibile.
A: Disponibilitate	**MTTR ↓**	Accesibilitate pentru mentenanță, modularizare, conectări rapide și înlocuire verificată prin procedură de service.
A: Disponibilitate	**Schimbare format ↓**	Schimbare de format: poziționare repetabilă, elemente anti-eroare, repere și blocări care reduc reglajele inutile.
P: Performanta	**Cadența ↑**	Mase și accelerații dimensionate pentru timpul de ciclu, solicitările dinamice și capacitatea actuatorilor.
P: Performanta	**Cadența ↑**	Curse și traiectorii minimizate fără compromiterea accesului, rigidității sau siguranței; paralelism numai pentru faze independente.
P: Performanta	**Vibrații ↓**	Rigiditate și comportare modală verificate față de spectrul de excitație și cerința de precizie a procesului.
P: Performanta	**Micro-opriri ↓**	Alimentare robustă, ghidaje și acumulare proiectate din variabilitatea reală a pieselor și procesului.
P: Performanta	**Mers în gol ↓**	Buffer-e între stații dimensionate prin analiza fluxului; efectul asupra suspendărilor se verifică prin simulare sau date.
Q: Calitate	**Precizie ↑**	Lanț de toleranțe și ghidare dimensionate din capabilitatea cerută, nu dintr-o clasă generică de componentă.
Q: Calitate	**Repetabilitate ↑**	Dispozitive de fixare cu referințe funcționale, rigiditate și repetabilitate adecvate procesului.
Q: Calitate	**Stabilitate ↑**	Stabilitate termică prin materiale, management termic și/sau compensare, validate prin bugetul de eroare.
Q: Calitate	**Drift ↓**	Calibrare/verificare periodică stabilită din planul metrologic, deriva observată și criticitatea caracteristicii.

În practică · Trade-off între disponibilitate și performanță

Pentru că OEE este produsul A × P × Q, o valoare scăzută a oricărei componente poate domina rezultatul. Exemplul A = 95 %, P = 90 %, Q = 100 % conduce la OEE = 85,5 %, iar A = 80 %, P = 100 %, Q = 100 % conduce la 80 %. Calculul ilustrează sensibilitatea indicatorului, nu o regulă universală conform căreia disponibilitatea trebuie întotdeauna prioritizată.

Decizia de proiectare se ia pe baza riscului, calității, cerinței de cadență și costului pe ciclul de viață. Fiabilitatea, performanța și calitatea trebuie optimizate împreună; costul unui rebut sau al unei opriri depinde de produs și proces și nu se exprimă prin multiplicatori universali.

8.8.3 Calculul OEE: exemplu numeric

Exemplul rezolvat 8.1. Calcul OEE: scenariu ALT–THROUGHPUT (360 piese/oră), separat de SAP de referință

Enunțul. La sfârșitul primei săptămâni de producție după SAT, stația SAP (Stație automatizată de asamblare prin presare, într-o variantă didactică ALT–THROUGHPUT) operează conform datelor agregate de MES:

- Schimburi de producție: 5 zile × 2 schimburi × 8 ore = 80 ore = 4.800 min
- Pauze planificate: 30 min/schimb × 10 schimburi = 300 min
- Schimbări format planificate: 4 schimbări × 15 min = 60 min
- Defecte tehnice neplanificate: 95 min cumulate (blocaj alimentator 25 min, defect senzor forța 35 min, problema comunicație OPC UA 35 min)
- Lipsa material: 40 min (întârziere logistica)
- Cadența nominală a variantei: 360 piese/oră = 6 piese/min
- Cadența efectivă globală rezultată din producția raportată: 18.480 / 4.305 = 4,29 piese/min, sub cadența ideală de 6 piese/min; valoarea include efectul micro-opririlor și al rulării la viteză redusă
- Piese produse total: 18.480
- Piese rebut: 75 (forța în afara toleranței) + 35 (cod bare necitit) = 110

Soluția. Aplicăm formula OEE = A × P × Q. Înaintea calculului stabilim convenția didactică: pauzele planificate sunt excluse din timpul planificat, iar schimbările de format, defectele tehnice și lipsa materialului sunt tratate aici ca pierderi de disponibilitate. Într-un sistem real, clasificarea trebuie armonizată cu definițiile organizației și cu MES. În relațiile de mai jos, T desemnează timpi [min], N, cantități de piese, iar c_{nom}, cadența nominală [piese/min].

Pasul 1. Disponibilitatea.

$$T_{\text{planificat}} = T_{\text{total}} - T_{\text{pauze}} = 4.800 - 300 = 4.500 \text{ min} \tag{8.2}$$

$$T_{\text{productiv}} = T_{\text{planificat}} - (T_{\text{format}} + T_{\text{defecte}} + T_{\text{material}}) = 4.500 - (60 + 95 + 40) = 4.305 \text{ min} \tag{8.3}$$

$$A = \frac{T_{\text{productiv}}}{T_{\text{planificat}}} = \frac{4.305}{4.500} = 0{,}957 \quad (95{,}7\,\%) \tag{8.4}$$

În convenția didactică aleasă, disponibilitatea rezultă 95,7 %. Valoarea se interpretează față de ținta contractuală și de regulile de clasificare a timpilor; calculul singur nu permite atribuirea cauzală unei anumite componente hardware.

Pasul 2. Performanța.

$$N_{\text{nominal}} = T_{\text{productiv}} \cdot c_{\text{nom}} = 4.305 \cdot 6 = 25.830 \text{ piese} \tag{8.5}$$

$$N_{\text{produs}} = 18.480 \text{ piese} \tag{8.6}$$

$$P = \frac{N_{\text{produs}}}{N_{\text{nominal}}} = \frac{18.480}{25.830} = 0{,}715 \quad (71{,}5\,\%) \tag{8.7}$$

Performanța rezultă 71,5 % în convenția de calcul utilizată. Diferența față de cadența ideală trebuie investigată prin date de stare, timpi de ciclu și cauze de micro-oprire; exemplul nu atribuie apriori pierderea unei singure cauze.

Pasul 3. Calitatea.

$$N_{\text{bune}} = N_{\text{produs}} - N_{\text{rebut}} = 18.480 - 110 = 18.370 \text{ piese} \tag{8.8}$$

$$Q = \frac{N_{\text{bune}}}{N_{\text{produs}}} = \frac{18.370}{18.480} = 0{,}994 \quad (99{,}4\,\%) \tag{8.9}$$

Calitatea rezultă aproximativ 99,4 %. Interpretarea necesită separarea modurilor de defect și verificarea sistemului de măsurare; simpla existență a controlului în buclă închisă sau a trasabilității nu demonstrează cauzal această valoare.

Pasul 4. OEE agregat.

$$\text{OEE} = A \cdot P \cdot Q = 0{,}957 \cdot 0{,}715 \cdot 0{,}994 = 0{,}680 \quad (68{,}0\,\%) \tag{8.10}$$

OEE agregat este aproximativ 68,0 %. Valoarea se compară cu ținta și cu baza de calcul stabilite pentru aplicația concretă; nu există o categorie normativă universală „acceptabil/world-class” impusă de ISO 22400.

Pasul 5. Diagnostic și plan de îmbunătățire.

În acest exemplu, componenta cu cea mai mare distanță față de 1 este Performanța. Planul de îmbunătățire trebuie construit după identificarea cauzelor dominante din datele de stare și timpii de ciclu, nu numai din valoarea agregată OEE.

- Instrumentarea automată a micro-opririlor și a cauzelor de oprire, cu definiții consecvente în PLC/MES.
- Analiza Pareto a cauzelor dominante de micro-opriri
- Intervenții țintite numai asupra cauzelor demonstrate prin Pareto și date de proces, urmate de verificarea efectului.

Ținta ulterioară se stabilește contractual sau organizațional și se validează pe o fereastră de măsurare reprezentativă.

8.9 IEC 61131-3: privire de ansamblu asupra limbajelor și structurării secvențiale

IEC 61131-3:2025 specifică sintaxa și semantica limbajelor Structured Text (ST), Ladder Diagram (LD) și Function Block Diagram (FBD), precum și elementele SFC pentru structurarea secvențială [118]. Instruction List (IL) aparține edițiilor anterioare și este relevant în principal pentru sisteme legacy. Pentru proiectantul mecanic/mecatronic, scopul acestei secțiuni este recunoașterea formelor de reprezentare și comunicarea cu automatistul, nu programarea detaliată; pentru perspectiva practică asupra PLC-urilor se poate consulta și [119].

SFC este deosebit de util pentru reprezentarea implementării secvențiale, dar relația cu GRAFCET nu trebuie tratată ca echivalență normativă 1:1. Un GRAFCET de specificație bine formulat poate fi transpus într-o arhitectură SFC sau într-o mașină de stări implementată în ST/LD/FBD, în funcție de platformă și standardele organizației.

LD (Ladder Diagram) provine din reprezentarea logicii cu relee și este potrivit pentru condiții booleene, interblocări și diagnostic atunci când aceasta este convenția platformei și a organizației. Pentru secvențe mari poate deveni mai puțin compact decât o reprezentare explicită prin stări, dar alegerea se face după lizibilitate, mentenabilitate și standardul software al proiectului.

FBD (Function Block Diagram) este un limbaj grafic bazat pe blocuri funcționale și conexiuni de semnal, util pentru prelucrare numerică, reglare, condiționare de semnal și funcții reutilizabile. Domeniul său nu se limitează la logica analogică, iar combinația cu alte limbaje se stabilește din arhitectura aplicației.

ST (Structured Text) este limbaj textual destinat exprimării compacte a calculelor, structurilor de date și algoritmilor. Este frecvent util pentru prelucrarea datelor și funcții complexe; localizarea calculului OEE sau a integrării MES în PLC este însă o decizie de arhitectură, nu o cerință a standardului.

IL (Instruction List) poate fi întâlnit în proiecte legacy bazate pe ediții anterioare ale IEC 61131-3. Nu este inclus în suita curentă IEC 61131-3:2025 pentru dezvoltări noi și nu trebuie prezentat ca limbaj modern de referință.

În proiectele moderne, alegerea limbajului este dependentă de platformă, standardul intern și tipul funcției. O combinație de structurare secvențială, logică booleană și cod textual este frecventă, dar nu există o proporție universală a „nevoilor” acoperite de o anumită combinație.

8.10 Studiu de caz integrat: variantă didactică ALT a stației SAP

Secțiunea dezvoltă exclusiv varianta didactică ALT–PRODUCT + ALT–THROUGHPUT + ALT–HYD, păstrată pentru exersarea GRAFCET, ciclogramei, PackML și OEE. Produsul alternativ, presa hidraulică și cadența de 360 piese/oră nu descriu configurația SAP de referință, care rămâne: tub–carcasă, presare electrică pe axa Z, fixare pneumatică CL1/CL2 și ipoteza preliminară de 120 ansambluri/oră. Secvența acestei variante nu trebuie confundată cu GRAFCET-ul de referință S0–S8 din Figura 1.9.

8.10.1 Recapitulare cerințe și arhitectura

Cerințele exclusiv ale scenariului alternativ ALT–PRODUCT + ALT–THROUGHPUT + ALT–HYD sunt: forță maximă ipotetică de 8 kN, trasabilitate per piesă, cadență țintă 360 piese/oră și moduri AUTO/MANUAL/SETUP/HOME. Acești parametri nu se transferă către SAP de referință fără o modificare controlată. Funcțiile safety și reacția la oprire se stabilesc prin evaluarea riscului pentru varianta concretă.

Arhitectura scenariului ALT–HYD (distinctă de SAP de referință): cadru metalic didactic, dispozitiv de fixare a paletei, presă hidraulică Ø80 mm cu cursă ipotetică 100 mm și transportor de alimentare/evacuare. Pentru această variantă sunt necesare propriile calcule, model de produs, I/O, evaluare de risc și plan FAT/SAT; Capitolul 3 tratează mecanica, iar Capitolul 6 senzorii. În baseline, presarea este electrică pe axa Z, iar alimentarea automată rămâne opțională.

Arhitectura PLC discutată în Capitolul 7 oferă criterii de proiectare pentru control și I/O; acoperirea efectivă a cerințelor variantei ALT trebuie demonstrată prin lista I/O proprie, bugetul temporal și verificarea comunicațiilor. Gradul de utilizare CPU și încărcarea rețelei se măsoară după integrare și nu se presupun din procente generale.

8.10.2 Ciclograma și bugetul timpului de ciclu

Exclusiv pentru ALT–THROUGHPUT, ipoteza de 360 piese/oră (= 6 piese/min) corespunde unui tact-țintă de 10 s. Duratele fazelor de mai jos sunt date de exercițiu, nu rezultate de măsurare, iar ciclul alternativ nu demonstrează performanța SAP de referință. Pentru configurația de bază, 120 ansambluri/oră rămâne ipoteza H, echivalentă cu un tact-țintă de 30 s, de verificat prin ciclogramă și test.

- Faza 1: Alimentare paleta + blocare stoper (1,0 s)
- Faza 2: Citire cod bare (paralel cu f1) (0,5 s, paralelizata)
- Faza 3: Poziționare componente A și B (cilindri X, Y simultan) (1,2 s)
- Faza 4: Presare hidraulică Z, cu monitorizare F–z și limită maximă de proiectare ipotetică de 8 kN (2,5 s, ipoteză de exercițiu).
- Faza 5: Menținere forța + verificare (timer 0,5 s + senzori) (0,8 s)
- Faza 6: Retragere cilindru presa + scriere log MES (paralel) (1,0 s)
- Faza 7: Deblocare stoper + evacuare paleta (0,7 s)

În ipoteza că citirea codului de bare se suprapune integral cu faza 1, timpul secvențial însumat este 1,0 + 1,2 + 2,5 + 0,8 + 1,0 + 0,7 = 7,2 s, iar rezerva aritmetică față de tactul-țintă de 10 s este 2,8 s. Aceste valori nu includ variațiile reale, micro-opririle, dependențele mecanice ori constrângerile safety; fezabilitatea cadenței se demonstrează numai prin buget temporal complet și încercări.

8.10.3 Modurile de operare și livrabilele mecanice

Pentru varianta didactică ALT sunt analizate modurile AUTO, MANUAL, SETUP și HOME/REFERENȚIERE, la care se adaugă separat funcția de siguranță E-STOP. Tabelul 8.9 sintetizează implicații mecanice orientative; modurile și condițiile de acces trebuie specificate și verificate pentru fiecare arhitectură, fără transfer automat la SAP de referință.

Tabelul 8.9. Livrabile și implicații mecanice pentru modurile/stările utilizate în scenariul didactic ALT. Selecția și condițiile lor sunt specifice aplicației.

Mod / funcție	Livrabile și implicații mecanice în scenariul SAP
AUTO	Ciclu automat; configurația de producție și protecțiile rămân conforme conceptului mașinii.
MANUAL	Comenzi limitate pentru diagnostic; vitezele, forțele și accesul rezultă din evaluarea riscului.
SETUP	Acces controlat la reglaje/calibrare; repere și blocări pentru repetabilitatea schimbării de format.
HOME	Referențiere când este necesară; feedback suficient pentru o stare de poziție cunoscută.
E-STOP	Funcție de siguranță separată; reacția sigură derivată din evaluarea riscului; resetarea nu produce restart automat.

8.10.4 GRAFCET-ul ciclului de producție (mod AUTO)

GRAFCET-ul de nivel 2 de mai jos descrie exclusiv ciclul AUTO al variantei ALT, nu secvența S0–S8 a SAP de referință din Figura 1.9. Sunt reprezentate etapele nominale, paralelizările din S1 și S5 și o ramificare de rezultat OK/NOK; condițiile complete de pornire, recuperare și safety se dezvoltă în specificația și evaluarea de risc proprii variantei.

- S0: Repaus / pregătire de ciclu: actuatorul de presare, poziționerele și stoperul se află în poziții inițiale confirmate; condițiile de energie și de pornire sunt definite separat pentru varianta ALT (nu se presupune evacuarea aerului la fiecare ciclu).
- T1: Paleta detectată la intrare (senzor inductiv B0).
- S1: PARALEL, S1a: Blocare paleta (Y0) + S1b: Citire cod bare (scanner Q1).
- T2: Convergență, stoper avansat (B1) + cod bare citit + valid (Q1_OK).
- S2: Poziționare componente PARALEL, S2a: Componenta A pe poziție (Y1) + S2b: Componenta B pe poziție (Y2).
- T3: Convergență, ambele componente pe poziție (B2 + B3).
- S3: Presare (Y3, cilindru presa avansat sub control forța).
- T4: Criteriul tehnologic de sfârșit al presării este confirmat pe baza profilului F–z și a poziției definite pentru varianta ALT, fără depășirea limitei maxime de proiectare ipotetice de 8 kN; pragurile efective și fereastra de acceptare rămân TBD.
- S4: Menținere la condiția tehnologică prevăzută (timer 0,5 s numai ca ipoteză pentru varianta ALT; necesitatea menținerii trebuie justificată prin studiul îmbinării).
- T5: Timer expirat.
- • S5: PARALEL, S5a: Retragere cilindru presă + S5b: pregătirea/transferul înregistrării MES (identificator piesă + forță/cursă + timestamp), fără a condiționa mișcarea critică de o confirmare IT decât dacă arhitectura proiectului o cere.
- T6: Convergență, cilindrul de presare este retras (B5). Confirmarea transferului către MES se tratează asincron sau devine condiție de secvență numai dacă specificația proiectului o cere explicit.
- S6: Evaluare rezultat pe criterii de proces și geometrie definite (profil F–z, poziție finală, eventuale alarme): decizie OK/NOK; limitele se stabilesc prin calificarea procesului, nu din simpla valoare a forței.
- T7a / T7b: Ramificare OK / NOK.
- S7: Pentru rezultat OK, înregistrare rezultat, deblocare stoper și evacuare normală după confirmarea retragerii presei și a celorlalte condiții de secvență.

- S_{NOK}: Pentru rezultat NOK, identificare și reținere controlată a paletei; recuperarea, intervenția operatorului și evacuarea ulterioară se definesc într-o procedură specifică și în evaluarea riscului.
- T8a: Paleta OK a părăsit stația (B6). T8b: Pentru NOK, evacuarea sau revenirea în ciclu sunt permise numai după recuperare controlată și confirmările definite pentru varianta ALT (TBD).
- Revenire la S0 numai după confirmarea finalizării ramurii OK sau a procedurii NOK, cu condițiile de restart îndeplinite; resetarea unei funcții de siguranță nu produce pornire automată.

Acest GRAFCET de nivel 2 este o specificație comportamentală didactică a variantei ALT, nu un program PLC executabil și nici dovada unei cadențe de 360 piese/oră. Implementarea de nivel inferior se dezvoltă cu trasabilitate la cerințele și I/O ale variantei, condițiile de intervenție/recuperare, evaluarea riscului și planul de test; un număr fix de iterații nu este proprietate universală a metodologiei.

8.10.5 Implementarea PackML pe stratul exterior

În scenariul didactic se utilizează modelul cu 17 stări PackML din ISA-TR88.00.02-2022 ca strat de integrare a stării mașinii [135]. Corespondența dintre modurile locale și stările PackML este documentată în profilul aplicației; nu se presupune că AUTO, MANUAL sau SETUP sunt sinonime directe cu o singură stare PackML.

Oprirea de urgență rămâne o funcție separată de siguranță; în funcție de arhitectură, ea poate determina tranziția stratului PackML către ABORTING/ABORTED, însă resetarea funcției de siguranță și CLEARING/RESETTING sunt procese distincte și trebuie documentate separat.

Efortul de implementare PackML depinde de bibliotecile disponibile, standardul software intern, integrarea HMI/MES și gradul de reutilizare. Pentru proiectul real, acesta se estimează în planul software și se justifică prin reducerea costului de integrare și mentenanță, fără valori procentuale universale.

În practică · Cum se măsoară OEE pe stația SAP

În scenariul SAP, contoarele de producție și timpii de stare sunt definite explicit în modelul de date al proiectului. Total_Count, Good_Count și Reject_Count sunt denumiri de implementare, nu obligații universale PackML. Regulile de incrementare trebuie să fie reciproc coerente și trasabile la evenimentul fizic „piesă finalizată”.

Datele pot fi publicate prin OPC UA către MES cu o perioadă de actualizare derivată din cerința de monitorizare. Calculul OEE se realizează pe ferestre de timp definite și cu aceleași convenții pentru stări și pierderi; frecvența de publicare, durata schimbului și locul calculului sunt decizii de arhitectură, nu valori universale.

8.11 Probleme propuse cu răspunsuri

Problema 8.1 · Ciclogramă pentru o stație de lipire structurală

Proiectați ciclograma și GRAFCET-ul la nivel 2 pentru o stație automată care lipește două componente metalice cu adeziv structural: fixare, aplicare adeziv, poziționare, presare la 2 kN, menținere 5 s și verificare a etanșeității cu vid timp de 2 s. Pentru fazele fără durată dată adoptați și justificați valori de proiect, calculați timpul total și propuneți o ramificare alternativă pentru cazul NOK.

Răspuns. Exemplu de buget, cu durate adoptate și justificate: fixare 1,0 s; aplicare adeziv 3,0 s (lungimea cordonului / viteza de depunere); poziționare 1,5 s; apropiere și presare până la 2 kN 1,0 s; menținere 5,0 s; test de etanșeitate cu vid 2,0 s; eliberare 0,5 s; evacuare 1,5 s. Total secvențial ≈ 15,5 s, adică aproximativ 3,9 piese/min. GRAFCET la nivel 2: etapă inițială, apoi etapele în ordinea de mai sus, fiecare cu receptivitate fizică (senzori de capăt de cursă, forță ≥ 2 kN, temporizare de 5 s, presiune de vid în

fereastră). După test se folosește o ramificare alternativă: dacă vidul se menține, piesa merge la evacuarea OK; dacă nu, la evacuarea NOK, cu contorizare și alarmă. Timpul se poate reduce prin suprapunerea evacuării cu fixarea piesei următoare, dacă mecanica permite.

Problema 8.2 · Tip de ramificare pentru fixare simultană

Pentru un mecanism cu doi cilindri de fixare (Y1 stânga, Y2 dreapta) care trebuie să avanseze simultan până când ambele sunt confirmate pe poziție (senzori B1 și B2), redactați structura GRAFCET la Nivel 2. Discutați implicațiile mecanice ale paralelismului: ce se întâmplă dacă un cilindru ajunge la poziție înainte de celălalt? Cum se asigură sincronizarea? Care sunt riscurile dacă senzorii B1 sau B2 eșuează?

Răspuns. Se folosește o ramificare simultană (divergență ȘI): după etapa de start, două secvențe paralele comandă Y1 și Y2, fiecare încheiată de confirmarea B1, respectiv B2, iar convergența ȘI sincronizează continuarea numai când ambele sunt pe poziție. Dacă un cilindru ajunge primul, piesa poate fi împinsă sau înclinată; sincronizarea se asigură prin ajustarea identică a debitelor (drosele), opritori mecanici, pozițiile de contact proiectate simetric sau un mecanism de egalizare. Dacă B1 sau B2 nu confirmă, secvența rămâne blocată: se prevede o temporizare de supraveghere cu alarmă și o reacție definită. Dacă un senzor rămâne blocat activ, se verifică plauzibilitatea (senzorul trebuie să dispară la retragere). Riscul de prindere al mâinii în zona de fixare se tratează separat, ca funcție de siguranță.

Problema 8.3 · HELD vs SUSPENDED: implicații de proiectare

Explicați diferența dintre stările PackML HELD și SUSPENDED. Pentru o linie cu trei stații conectate prin conveior, identificați cauzele care pot conduce fiecare stație în aceste stări. Propuneți o metodă de dimensionare a bufferelor pe baza distribuțiilor timpilor de ciclu și a disponibilității; pentru un calcul numeric, declarați explicit ipotezele privind timpii și politica de transfer.

Răspuns. SUSPENDED: mașina este funcțională, dar așteaptă din cauza unei condiții externe (lipsă de piese în amonte sau aval blocat) și reia automat când condiția dispare. HELD: o cauză internă sau o comandă a operatorului oprește temporar producția (de exemplu realimentarea cu adeziv sau înlăturarea unui blocaj intern), iar reluarea cere o comandă explicită. Pe o linie cu trei stații, stația 2 trece în SUSPENDED când stația 1 nu livrează sau stația 3 este blocată, și în HELD la un defect sau o intervenție proprie. Buffer-ul se dimensionează ca să acopere timpul de restabilire al stației vecine: de exemplu, la un ciclu de 6 s și un timp de restabilire de 5 min (percentila 90 % a distribuției, ipoteză), sunt necesare aproximativ 300 / 6 = 50 de poziții. Valoarea se verifică prin simulare cu distribuțiile reale ale timpilor de ciclu și de defectare.

Problema 8.4 · Calcul OEE comparativ

Calculați OEE pentru următoarele scenarii, considerând că toate opririle indicate sunt pierderi de disponibilitate și că restul schimbului reprezintă timp planificat de producție: (a) schimb 8 h, 40 min opriri, cadență ideală 50 piese/min, 18.000 piese produse, 17.500 OK; (b) schimb 8 h, 20 min opriri, cadență ideală 50 piese/min, 15.000 piese produse, 14.900 OK. Comparați componentele A, P și Q și propuneți intervenții de proiectare pentru componenta dominantă.

Răspuns. (a) Timp planificat 480 min, timp de funcționare 440 min: A = 440/480 ≈ 0,917. Producția ideală este 440 · 50 = 22.000 piese, deci P = 18.000/22.000 ≈ 0,818; Q = 17.500/18.000 ≈ 0,972; OEE ≈ 0,729 (72,9 %). (b) Timp de funcționare 460 min: A ≈ 0,958; producția ideală 23.000, deci P = 15.000/23.000 ≈ 0,652; Q = 14.900/15.000 ≈ 0,993; OEE ≈ 0,621 (62,1 %). Scenariul (b) are mai puține opriri, dar performanța este mult mai slabă: pierderile de viteză și micro-opririle domină. Intervențiile de

proiectare vizează cauzele lor: alimentarea fiabilă cu piese, eliminarea blocajelor, senzori de detecție robuști și timpi de ciclu stabili.

Problema 8.5 · Pârghii mecanice pentru o linie de ambalare

Pentru o linie de ambalare alimentară (similar §8.5.2), propuneți trei intervenții mecanice care pot crește Disponibilitatea și trei care pot crește Performanța. Pentru fiecare, explicați mecanismul de influență și precizați ce date trebuie măsurate pentru a cuantifica efectul asupra OEE. Comparați apoi intervențiile printr-un criteriu beneficiu–cost, fără a presupune câștiguri procentuale universale.

Răspuns. Disponibilitate: (1) scule și formate cu schimbare rapidă (interfețe cu punct zero, ajustări indexate) reduc timpul de schimbare; măsurare: durata fiecărei schimbări. (2) Componente de uzură accesibile și standardizate, cu piese de schimb comune reduc MTTR; măsurare: MTTR pe cauze. (3) Ghidaje de produs proiectate fără puncte de agățare reduc blocajele; măsurare: frecvența opririlor pe cauze. Performanță: (1) transferuri cu servoacționări și profile de mișcare optimizate cresc cadența stabilă; măsurare: distribuția timpului de ciclu. (2) Buffer-e între mașini reduc propagarea micro-opririlor; măsurare: numărul și durata stărilor SUSPENDED. (3) Rigiditate mai mare a structurii și a mecanismelor de alimentare permite viteze mai mari fără alimentări greșite; măsurare: rata de alimentare greșită în funcție de viteză. Comparația beneficiu–cost: creșterea măsurată a OEE, transformată în ore productive și valoare, raportată la costul intervenției.

8.12 Concepte cheie și întrebări de reflecție

8.12.1 Concepte cheie: Capitolul 8

Șapte concepte cheie de reținut din acest capitol:

1. Proiectantul mecanic/mecatronic contribuie la specificația comportamentală a mașinii: secvență, ciclogramă, condiții, interblocări, moduri/stări și reacții la defect. Responsabilitățile exacte se stabilesc contractual.
2. GRAFCET (IEC 60848) este un limbaj de specificație secvențială. SFC din IEC 61131-3 este înrudit și poate susține implementarea, dar nu este identic normativ cu GRAFCET.
3. Descompunerea pe niveluri CE → CUM → DETALII este o convenție didactică de proiectare, utilă pentru trasabilitate; standardul nu impune universal trei niveluri și nici împărțirea rigidă pe discipline.
4. Ciclograma completează GRAFCET cu dimensiunea temporală și permite analiza concurenței, pauzelor, coliziunilor potențiale și bugetului timpului de ciclu.
5. Modurile și stările operaționale se definesc pentru mașină concretă. E-STOP este o funcție de siguranță separată, iar referențierea HOME se cere numai când arhitectura și strategia de recuperare o justifică.
6. PackML, pe baza ISA-TR88.00.02-2022, oferă un vocabular comun de stări, comenzi și date atunci când este cerut pentru integrarea mașinii; nu este obligatoriu universal.
7. OEE = A × P × Q este un indicator de exploatare definit prin convenții de timp și producție. Proiectarea mecanică influențează toate componentele, împreună cu operarea, mentenanța și logistica.

8.12.2 Întrebări de reflecție

Q1. Pentru un echipament din proiectul vostru de practică, redactați lista celor șapte livrabile mecanice (din Tabelul 8.2). Care lipsesc? Ce risc de retrofit aduce fiecare absență?

Q2. Desenați ciclograma și GRAFCET-ul la nivel 2 pentru o stație automată care fixează o piesă, aplică adeziv, asamblează, presează, menține procesul 5 s și verifică etanșeitatea cu vid. Pentru etapele fără durate date adoptați ipoteze explicite și calculați timpul total de ciclu.

Q3. Pentru un mecanism cu doi cilindri de fixare care avansează simultan, ce tip de ramificare GRAFCET folosiți? Dacă piesa poate fi tip A sau tip B, ce tip de ramificare folosiți? Justificați alegerea.

Q4. Explicați diferența între stările PackML HELD și SUSPENDED. Dați un exemplu concret pentru fiecare. Ce decizie mecanică influențează raportul HELD/SUSPENDED dintr-o linie?

Q5. Calculați OEE pentru: schimb 8 h, 40 min opriri considerate pierderi de disponibilitate, cadență ideală 50 piese/min, 18.000 piese produse, 17.500 OK. Identificați componenta dominantă și propuneți trei pârghii de proiectare, precizând ce date ar valida efectul lor.

Q6. Pentru o linie de ambalare, propuneți trei îmbunătățiri mecanice pentru Disponibilitate și trei pentru Performanță. Pentru fiecare, indicați mecanismul fizic, datele necesare cuantificării și modul în care ați compara beneficiul cu costul pe ciclul de viață.

9 Siguranța funcțională

Cadrul legal, evaluarea riscului și arhitecturi safety (PL/SIL)

Despre acest capitol

Capitolele anterioare au definit funcțiile echipamentului. Capitolul de față tratează condiția fără de care niciuna dintre ele nu poate fi pusă în funcțiune: siguranța mașinii, abordată prin cadrul legal european, evaluarea riscului și proiectarea funcțiilor de siguranță.

Parcursul urmează logica ISO 12100 (eliminarea pericolelor prin proiectare, apoi protecții și funcții de siguranță, apoi informații pentru utilizare) și o leagă de instrumentele de cuantificare PL (ISO 13849-1) și SIL (IEC 62061), de categoriile de oprire, de poziționarea protecțiilor, de prevenirea pornirii neașteptate și de aplicațiile robotice colaborative. Studiul de caz derivă funcțiile de siguranță ale stației SAP.

La final, cititorul trebuie să poată conduce o evaluare a riscului pentru un echipament dat, să determine nivelul de performanță cerut pentru fiecare funcție de siguranță și să justifice soluțiile de protecție alese, cu distanțele și componentele aferente.

Standarde și referințe normative aplicabile

Regulamentul (UE) 2023/1230: mașini; aplicabil, în principal, de la 20 ianuarie 2027.
ISO 12100:2010; ISO 13849-1:2023/-2:2012; IEC 62061:2021+A1:2024+A2:2026, risc, PL/SIL și validare.
IEC 60204-1:2016+A1:2021 și ISO 13850:2015, echipamentul electric și oprirea de urgență.
ISO 13855:2024, ISO 13857:2019, ISO 14120:2015, ISO 14119:2024, poziționarea și proiectarea protecțiilor.
ISO 14118:2017 și ISO 13851:2019, pornire neașteptată/izolare și comandă bimanuală.
ISO 10218-1/-2:2025 și ISO/TS 15066:2016, roboți industriali și aplicații colaborative.
IEC 62443 (serie); Regulamentul (UE) 2024/2847: cybersecurity.

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să explice cadrul legal european al siguranței mașinilor: Directiva 2006/42/CE și Regulamentul (UE) 2023/1230;
- să conducă o evaluare a riscului conform ISO 12100;

- să determine nivelul de performanță cerut (PLr) conform ISO 13849-1 și să înțeleagă abordarea SIL din IEC 62061;
- să dimensioneze poziționarea protecțiilor și distanțele de siguranță conform ISO 13855, ISO 14120 și ISO 13857;
- să specifice și să valideze funcțiile de siguranță ale unui echipament, inclusiv pentru aplicațiile robotice colaborative.

Cunoștințe prealabile

Capitolul presupune cunoașterea arhitecturii de control din Capitolul 7 și a actuatoarelor și senzorilor din Capitolele 4–6, deoarece funcțiile de siguranță acționează asupra acestora. Sunt utile noțiuni elementare de fiabilitate și probabilități, aprofundate în Capitolul 11.

Glosar de termeni și acronime

Acronimele și termenii tehnici utilizați pe parcursul capitolului sunt definiți la prima apariție și recapitulați în tabelul de mai jos pentru consultare rapidă (Tabelul 9.1).

Tabelul 9.1. Glosar de termeni și acronime utilizate în Cap. 9.

Termen	Definiție
PL	Performance Level, nivel discret a–e conform ISO 13849-1. Intervalele PFH sunt: PL a: 10^{-5}…$<10^{-4}$ 1/h; PL b: 3×10^{-6}…$<10^{-5}$; PL c: 10^{-6}…$<3\times10^{-6}$; PL d: 10^{-7}…$<10^{-6}$; PL e: 10^{-8}…$<10^{-7}$.
PLr	Required Performance Level (PLr), nivelul cerut pentru o funcție de siguranță, determinat prin evaluarea riscului și, când există, prin standardul de tip C aplicabil.
PL achieved	PL atins de SRP/CS, demonstrat prin arhitectură, fiabilitate, acoperire diagnostică, măsuri CCF și cerințe sistematice/software conform ISO 13849-1.
SIL	Safety Integrity Level, nivel de integritate a siguranței utilizat în cadrul IEC 61508/IEC 62061. Pentru sistemele de comandă legate de siguranță ale mașinilor, IEC 62061 utilizează SIL 1–3. PL și SIL sunt cadre distincte; intervalele PFH pot fi comparate, dar etichetele nu sunt interschimbabile automat.
PFH_d	PFH, frecvența medie a defectării periculoase pe oră utilizată pentru cuantificarea performanței funcției de siguranță; terminologia exactă urmează ediția curentă a standardului.
MTTFd	Mean Time To dangerous Failure, timpul mediu până la o defectare periculoasă.
DC	Diagnostic Coverage, fracția defectelor periculoase detectate de monitorizare.
B10d	Număr de cicluri la care 10% din componentele electromecanice ating defectarea periculoasă.
CCF	Common Cause Failure, defectări ale mai multor canale generate de aceeași cauză. ISO 13849-1 cere măsuri sistematice împotriva CCF; nu se reduce la un singur factor β.
F-CPU	Failsafe CPU, controler programabil destinat implementării funcțiilor de siguranță. Arhitectura internă și nivelurile certificate diferă între familii și se verifică în certificatul produsului.
Stop Cat. 0	Oprire prin întrerupere imediată a alimentării actuatoarelor (IEC 60204-1 §9.2.2).
Stop Cat. 1	Oprire controlată (decelerare programată) urmată de întreruperea alimentării.

Termen	Definiție
Stop Cat. 2	Oprire controlată cu energia disponibilă pentru actuatoare menținută; alegerea se justifică prin funcție și evaluarea riscului.
Fail-safe state	Starea sigură în care echipamentul trece la pierderea alimentării sau la trigger safety.
Hardstop mecanic	Limitator fizic (bloc metalic, opritor) care împiedică mișcarea sub control electronic.
E-Stop	Emergency stop, funcție de oprire de urgență conform ISO 13850 și IEC 60204-1; dispozitivul de comandă este uzual roșu pe fond galben.
Light curtain	Perdea optică de siguranță (AOPD/ESPE). Tipul IEC 61496 și rezoluția de detecție sunt caracteristici distincte și se selectează în funcție de funcția de protecție.
S = K·T + C	Relație de bază utilizată în metodele de separare din ISO 13855. Parametrii și eventualele corecții depind de geometria apropierii și de tipul protecției.
K	Parametru de viteză de apropiere selectat conform metodei aplicabile din ISO 13855:2024; nu există o singură valoare universală pentru toate configurațiile.
T	Timp total de oprire/răspuns relevant pentru calculul distanței de separare; include detectarea, procesarea, acționarea și oprirea mișcării periculoase și se verifică prin măsurare.
C	Termen suplimentar al metodei ISO 13855, dependent de dispozitiv, rezoluție și geometria accesului; se preia din cazul normativ aplicabil.
LOTO	Lockout/Tagout, termen utilizat în special în practica OSHA pentru controlul energiilor periculoase. ISO 14118 tratează proiectarea mijloacelor de prevenire a pornirii neașteptate și izolarea energiilor.
Cobot	Robot/aplicație colaborativă industrială: cerințele actuale sunt tratate în ISO 10218-1:2025 și ISO 10218-2:2025; ISO/TS 15066:2016 rămâne o referință suplimentară pentru colaborare.
SISTEMA	Software IFA pentru evaluarea SRP/CS conform ISO 13849-1. SISTEMA 3.x este asociat ediției ISO 13849-1:2023.
PROFIsafe / FSoE / CIP Safety	Protocoale safety peste PROFINET / EtherCAT / EtherNet/IP; mecanismele de detecție a erorilor (de exemplu CRC, secvență, temporizare și identificatori) sunt specifice profilului.
HFT / SFF	Hardware Fault Tolerance / Safe Failure Fraction, concepte de integritate hardware utilizate în cadrul funcțional-safety; aplicarea exactă urmează IEC 62061 și arhitectura concretă.
SAT / FAT	Site / Factory Acceptance Test, etape de acceptanță la beneficiar / producător care pot include teste de siguranță; nu înlocuiesc validarea cerută de standardele de siguranță funcțională.
RAR	Risk Assessment Report, documentul cu evaluarea riscului conform ISO 12100.
FSE	Functional Safety Engineer, rol/titulatură profesională utilizată în industrie; există scheme de certificare oferite de organisme diferite, dar nu reprezintă o cerință normativă unică.
Notified Body	Organism notificat, organism terț desemnat pentru procedurile de evaluare a conformității în cazurile în care legislația aplicabilă cere sau permite intervenția sa.
Marcaj CE	Simbol declarație producător: conformitate cu legislația europeană aplicabilă.
Cyber Resilience Act	Regulamentul (UE) 2024/2847 privind cerințele orizontale de cybersecurity pentru produsele cu elemente digitale; obligațiile de raportare din art. 14 se aplică de la 11 septembrie 2026, iar regulamentul se aplică în principal de la 11 decembrie 2027 [143].

Harta capitolului

Parcursul capitolului: §9.1 Cadrul legal european al siguranței mașinilor; §9.2 Evaluarea riscului, ISO 12100; §9.3 Performance Level (PL) conform ISO 13849-1; §9.4 Safety Integrity Level (SIL), IEC 62061; §9.5 Categoriile de oprire IEC 60204-1 și starea sigură a actuatorilor; §9.6 Poziționarea protecțiilor, ISO 13855:2024; §9.7 Garduri și distanțe de protecție, ISO 14120 + ISO 13857; §9.8 Prevenirea pornirii neașteptate, ISO 14118 și LOTO; §9.9 Aplicații robotice colaborative, ISO 10218:2025 și ISO/TS 15066; §9.10 Hardware safety, controlere, senzori și actuatoare; §9.11 Verificarea și validarea funcțiilor de siguranță; §9.12 Tendințe: AI, cybersecurity și safety; §9.13 Studiu de caz integrat, funcțiile de siguranță ale stației SAP; §9.14 Probleme aplicate; §9.15 Concepte cheie și întrebări de reflecție.

9.1 Cadrul legal european al siguranței mașinilor

Capitolele anterioare au tratat proiectarea echipamentului ca problemă de inginerie. Peste această arhitectură tehnică se suprapune cadrul juridic de introducere pe piață și punere în funcțiune. În Uniunea Europeană, Directiva 2006/42/CE rămâne cadrul aplicabil până la 19 ianuarie 2027 inclusiv, iar Regulamentul (UE) 2023/1230 se aplică de la 20 ianuarie 2027. Pentru proiectant, cerințele de siguranță nu sunt o verificare finală, ci restricții de proiectare care trebuie urmărite din faza de concept până la validare [28, 31].

Capitolul urmărește traseul complet: cadrul legal și marcajul CE; evaluarea și reducerea riscului conform ISO 12100; definirea PLr și proiectarea SRP/CS conform ISO 13849-1; utilizarea IEC 62061 pentru sisteme de comandă legate de siguranță; alegerea opririi și a stării sigure; poziționarea protecțiilor conform ISO 13855:2024; garduri și interblocări; prevenirea pornirii neașteptate; aplicații robotice colaborative; hardware și comunicații safety; validare; respectiv interfața dintre safety, AI și cybersecurity (Figura 9.1).

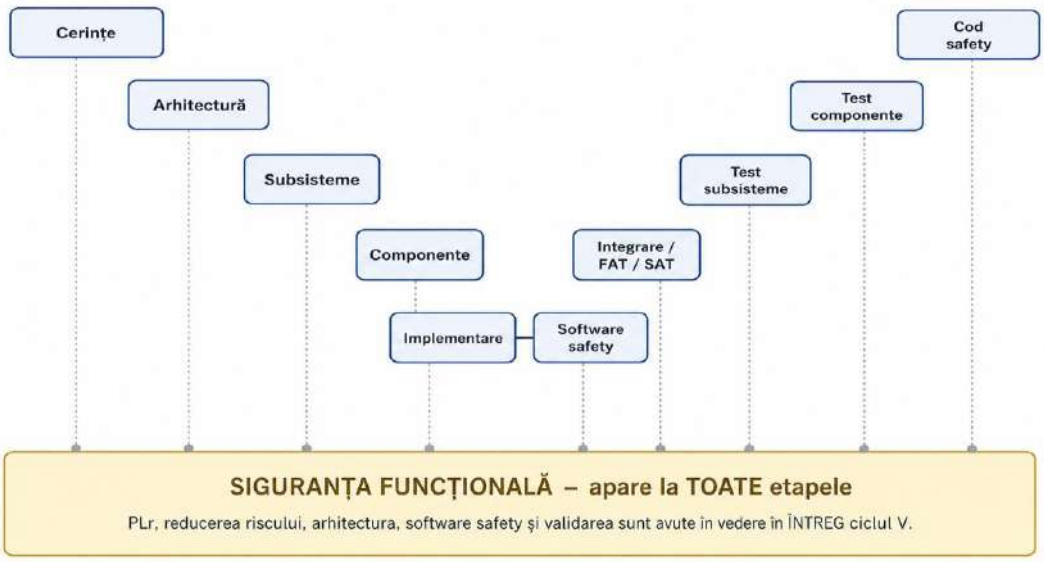


Figura 9.1. Poziționarea Capitolului 9 în ciclul V. Siguranța funcțională este o temă transversală: apare în cerințe (PLr/SIL rezultat din evaluarea riscului și standardele aplicabile), arhitectură (de exemplu categoriile B/1/2/3/4 în ISO 13849-1), subsisteme (componente cu date de siguranță documentate), implementare (hardware/software adecvat) și verificare/validare. Testele FAT/SAT pot furniza dovezi, dar nu substituie validarea funcției de siguranță.

9.1.1 Tranziția de la Directiva 2006/42/CE la Regulamentul (UE) 2023/1230

Cadrul legal european este în tranziție. Directiva 2006/42/CE a stat la baza cerințelor pentru mașini timp de aproape două decenii și continuă să se aplice produselor introduse pe piață înainte de data de aplicare a noului regulament. Regulamentul (UE) 2023/1230 este direct aplicabil în statele membre și înlocuiește Directiva 2006/42/CE de la 20 ianuarie 2027. Pentru proiectele care vor fi livrate după această dată, cerințele Regulamentului trebuie introduse în specificație și în dosarul tehnic încă din faza de proiectare.

Regulamentul (UE) 2023/1230 consolidează cadrul pentru produse cu software și conectivitate și tratează explicit modificările digitale, comportamentul complet sau parțial auto-evolutiv și protecția împotriva coruperii funcțiilor relevante pentru siguranță (Figura 9.2). Un aspect important este includerea în Anexa I, partea A, a componentelor sau sistemelor cu comportament auto-evolutiv bazat pe machine learning care asigură funcții de siguranță; pentru acestea sunt prevăzute proceduri de evaluare a conformității cu intervenție terță. Această cerință nu trebuie generalizată la orice utilizare a AI în mașină [28].

Pentru proiectant, implicația este de arhitectură: funcțiile de siguranță trebuie definite, limitate și validate independent de funcțiile de optimizare. Dacă AI/ML participă la o funcție relevantă pentru siguranță, se aplică cerințele specifice Regulamentului și trebuie demonstrată conformitatea pentru acea funcție. Dacă AI este folosit doar pentru productivitate, inspecție sau optimizare, analiza de risc trebuie să demonstreze că o eroare a algoritmului nu poate invalida funcțiile de siguranță. Conectivitatea introduce, separat, cerințe de cybersecurity care trebuie integrate în proiect, nu adăugate după punerea în funcțiune.

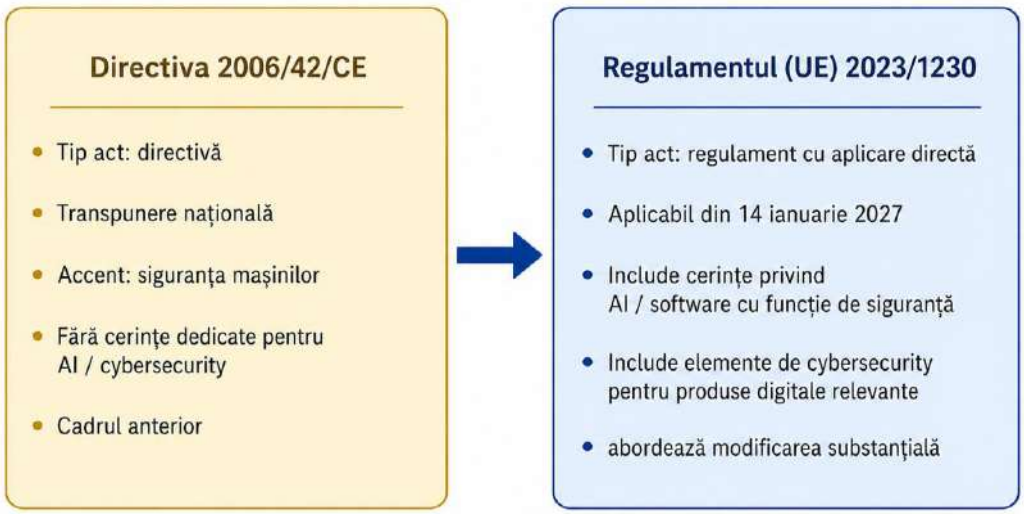


Figura 9.2. Tranziția de la Directiva 2006/42/CE la Regulamentul (UE) 2023/1230. Pe lângă schimbarea juridică de la directivă la regulament cu aplicare directă, noul cadru tratează explicit teme precum software-ul relevant pentru siguranță, comportamentul auto-evolutiv, cybersecurity și documentația digitală, care erau mult mai puțin dezvoltate în Directiva 2006/42/CE [28].

Consecința practică este că data estimată a introducerii pe piață trebuie stabilită încă din planul proiectului. Echipamentele ce vor fi introduse pe piață de la 20 ianuarie 2027 se proiectează și se documentează pentru Regulamentul (UE) 2023/1230. Funcțiile cu AI, accesul de la distanță, actualizările software și conectivitatea OT trebuie analizate în evaluarea riscului și în strategia de cybersecurity, fără a presupune automat o anumită marcă de F-CPU sau o arhitectură unică.

9.1.2 Procesul de conformitate și marcaj CE

Marcajul CE este rezultatul procesului de evaluare a conformității prin care producătorul declară că mașină respectă legislația de armonizare a Uniunii aplicabilă. Primul pas este identificarea actelor legislative aplicabile produsului și a limitelor lor de domeniu. Pentru o mașină industrială, cadrul privind mașinile este central, iar cerințe suplimentare pot proveni, de exemplu, din legislația EMC, radio sau ATEX, în funcție de configurație. Directiva de joasă tensiune nu se adaugă automat ca o certificare separată pentru orice mașină; interacțiunea dintre actele aplicabile trebuie analizată pentru produsul concret.

Standardele armonizate ale căror referințe sunt publicate în Jurnalul Oficial al Uniunii Europene pot conferi prezumție de conformitate pentru cerințele esențiale pe care le acoperă. Aplicarea unui standard tehnic nu înlocuiește evaluarea riscului și nici nu transformă automat un calcul într-o «certificare». Dacă se utilizează o altă soluție tehnică, producătorul trebuie să poată demonstra, prin documentație și validare, că cerințele legale aplicabile sunt îndeplinite.

Documentația tehnică trebuie să permită evaluarea conformității mașinii. Conținutul se structurează după legislația aplicabilă și poate include descrierea mașinii, desene și scheme, evaluarea riscului, specificațiile funcțiilor de siguranță, justificarea componentelor și calculelor PL/SIL, rapoarte de verificare și validare, instrucțiuni și declarații relevante. FAT/SAT pot furniza dovezi importante, dar nu reprezintă prin ele însele o listă legală standardizată de documente. Documentația și informațiile cerute trebuie păstrate pentru perioadele stabilite de legislația aplicabilă.

> **În practică · Livrarea pe piețe din afara UE**
>
> Marcajul CE nu trebuie tratat ca un «pașaport universal». Cerințele pieței de destinație se verifică separat. În SUA, pentru multe categorii de echipamente electrice utilizate la locul de muncă, OSHA cere aprobarea de către un Nationally Recognized Testing Laboratory (NRTL); UL este unul dintre NRTL-uri, nu singura cale. În Great Britain, politica actuală permite pentru numeroase reglementări de produs utilizarea în continuare a marcajului CE, alături de ruta UKCA; regulile trebuie verificate pentru categoria concretă. În China, CCC se aplică numai produselor incluse în catalogul de certificare obligatorie.
>
> Concluzie de proiect: piața de destinație și schema de evaluare trebuie stabilite în faza de concept, iar BOM-ul trebuie verificat pentru aprobările cerute de client, autoritate sau codul local. Nu se folosesc costuri ori durate «tipice» universale ca argument de proiectare.

9.1.3 Modificarea substanțială: implicații pentru retrofit

Regulamentul (UE) 2023/1230 definește «modificarea substanțială» ca o modificare fizică sau digitală, neprevăzută de producător, realizată după introducerea pe piață sau punerea în funcțiune, care afectează siguranța prin crearea unui pericol nou sau prin creșterea unui risc existent și conduce la necesitatea unor măsuri suplimentare. Persoana care efectuează o asemenea modificare poate deveni producător, cu obligațiile de evaluare a conformității asociate modificării [28].

În retrofit, analiza nu se face prin praguri procentuale arbitrare de forță sau viteză, ci prin efectul modificării asupra pericolelor și riscurilor. Adăugarea unui robot, schimbarea cinematicii, creșterea forțelor, înlocuirea unei tehnologii de protecție sau introducerea unor funcții software noi pot necesita reevaluarea riscurilor. Reparațiile și mentenanța care nu afectează conformitatea cu cerințele esențiale nu sunt, prin ele însele, modificări substanțiale.

Decizia trebuie documentată printr-o evaluare comparativă «înainte–după»: pericole noi, risc crescut, funcții de siguranță afectate, limite ale mașinii modificate și necesitatea unor măsuri suplimentare. Nu există în Regulamentul (UE) 2023/1230 praguri universale de tip «+20 % forță/viteză» care să decidă automat caracterul substanțial al modificării.

9.2 Evaluarea riscului: ISO 12100

Înainte de selectarea nivelurilor PL/SIL, a controlerelor sau a componentelor de siguranță trebuie stabilit ce riscuri trebuie reduse și până la ce nivel poate fi justificată soluția. ISO 12100:2010 oferă cadrul general pentru evaluarea și reducerea riscului, iar standardele de tip B/C și legislația aplicabilă particularizează măsurile. Obiectivul nu este „maximizarea" abstractă a protecției, ci reducerea sistematică a riscurilor prin măsuri adecvate, trasabile și verificabile [27].

9.2.1 Procesul iterativ de evaluare a riscului

Evaluarea riscului conform ISO 12100 este iterativă: se stabilesc limitele mașinii, se identifică pericolele și situațiile periculoase, se estimează riscul, se evaluează dacă este necesară reducerea sa și se aplică măsuri până când riscul rezidual este adecvat (Figura 9.3). Procesul se reia ori de câte ori o măsură sau o modificare introduce un pericol nou ori schimbă ipotezele inițiale.

Identificarea pericolelor se realizează pentru toate fazele ciclului de viață și pentru utilizarea previzibilă: pericole mecanice, electrice, termice, zgomot, vibrații, radiații, substanțe și alte surse relevante. ISO 12100 oferă categorii și exemple utile pentru structurarea analizei, dar evaluatorul trebuie să documenteze pericolul, situația periculoasă, persoanele expuse, faza de utilizare și condițiile în care poate apărea.

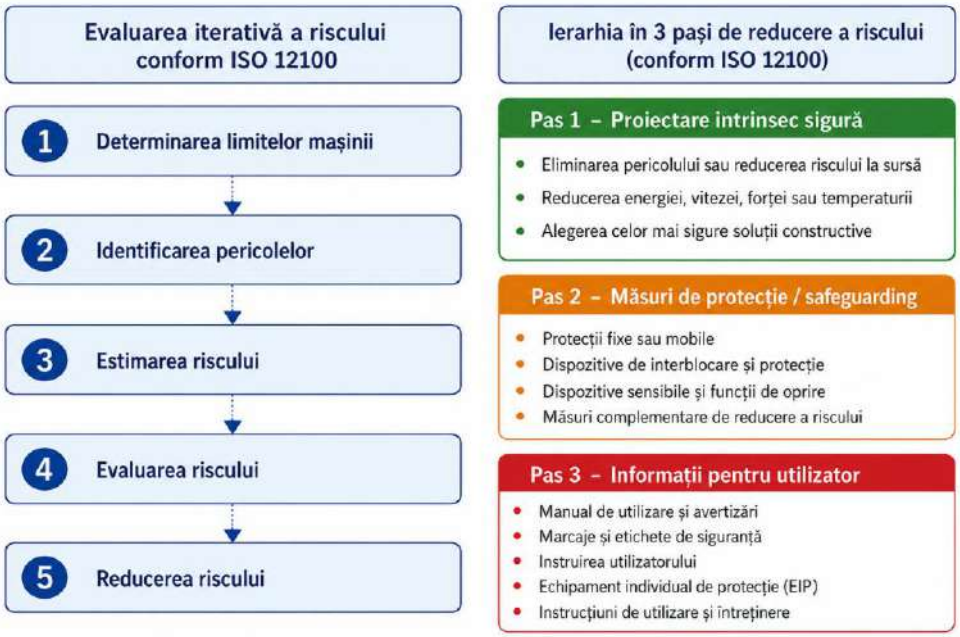


Figura 9.3. Procesul iterativ de evaluare și reducere a riscului conform ISO 12100 și prioritatea celor trei categorii de măsuri: proiectare intrinsec sigură, protecții/safeguarding și informații pentru utilizare. Figura este o sinteză didactică; aplicarea concretă urmează standardul și analiza proiectului.

Pasul 3. Estimarea riscului apreciază severitatea posibilă și probabilitatea producerii vătămării. Pentru funcțiile de comandă legate de siguranță, ISO 13849-1 utilizează în Anexa A un risk graph cu parametrii S (severitate), F (frecvență/durată a expunerii) și P (posibilitate de evitare sau limitare a vătămării) (Figura 9.4). Acești parametri nu sunt o formulă aritmetică S×F×P și nu trebuie transformați în praguri universale de ore/zi, număr de expuneri sau viteze. Se justifică fiecare alegere pe baza aplicației, a standardului de tip C și a experienței documentate.

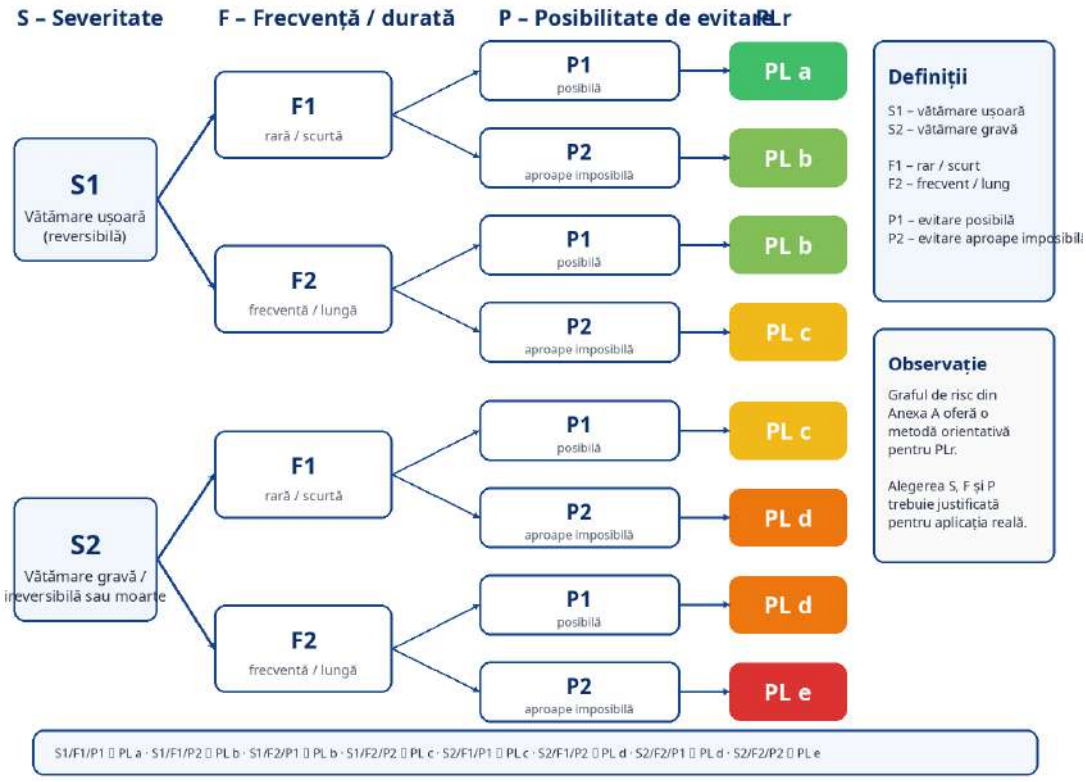


Figura 9.4. Graful de risc S–F–P pentru determinarea PLr conform ISO 13849-1, Anexa A. Parametrii descriu severitatea, frecvența/durata expunerii și posibilitatea de evitare; selecția lor trebuie justificată pentru aplicația concretă.

Pasul 4. Evaluarea riscului decide dacă reducerea suplimentară este necesară. ISO 12100 nu furnizează un singur prag numeric universal. Standardele de tip C, standardele de funcții de siguranță și cerințele clientului pot particulariza criteriile. Pentru SRP/CS, PLr se determină pentru funcția de siguranță după definirea pericolului și a condițiilor de expunere; nu se deduce automat doar din forța sau viteza actuatorului.

Pasul 5. Reducerea riscului aplică metoda în trei trepte: proiectare intrinsec sigură, măsuri de protecție/safeguarding și informații pentru utilizare. După implementare se reia evaluarea pentru a verifica riscul rezidual și eventualele pericole introduse de măsurile noi.

9.2.2 Metoda în trei trepte de reducere a riscului

Când este necesară reducerea riscului, ISO 12100 cere aplicarea priorităților metodei în trei trepte. Proiectantul trebuie să înceapă cu eliminarea sau reducerea pericolului prin proiectare, apoi să introducă protecții tehnice pentru riscul rămas și, în final, să furnizeze informații privind riscul rezidual. Ordinea exprimă o prioritate de proiectare; documentația trebuie să arate ce măsuri au fost analizate și de ce sunt adecvate.

Pasul 1. Proiectare intrinsec sigură (Inherently Safe Design)

Pasul 1. Proiectarea intrinsec sigură urmărește eliminarea pericolului sau reducerea lui la sursă: limitarea energiei și forțelor la ceea ce cere procesul, reducerea maselor și inerțiilor, eliminarea punctelor de strivire prin geometrie, stabilitate la pierderea energiei, reducerea temperaturilor și presiunilor, alegerea materialelor și suprafețelor adecvate. Valorile concrete nu se aleg din reguli universale, ci din analiza aplicației și standardele specifice mașinii.

În aplicațiile robotice colaborative, riscul de contact este tratat prin combinația dintre ISO 10218-1:2025, ISO 10218-2:2025 și, pentru anumite aspecte biomecanice, ISO/TS 15066:2016 [144]. Limitele depind de regiunea corpului, tipul contactului, geometria sculei și dinamica sistemului; ele nu se reduc la o singură «forță maximă» universală. Proiectarea mecanică a end-effectorului și a piesei manipulate este parte a evaluării aplicației, nu doar robotul de bază.

Pasul 2. Protecții și dispozitive de siguranță (Safeguarding)

Pasul 2. Protecții și măsuri tehnice de protecție tratează riscurile care nu au putut fi reduse suficient prin proiectare. Soluțiile pot include protecții fixe sau mobile, interblocări, dispozitive electro-sensibile și alte protective devices. Tipul, performanța și poziționarea se selectează din pericol, acces, timpul de oprire și standardele aplicabile; nu există o combinație universală valabilă pentru toate mașinile.

Pasul 3. Informații pentru utilizator (Information for Use)

Pasul 3. Informații pentru utilizare completează măsurile tehnice prin instrucțiuni, avertizări, marcaje, proceduri și instruire pentru riscurile reziduale. Informația nu trebuie utilizată ca substitut pentru o măsură tehnică rezonabil practicabilă și cerută de analiza riscului. Conținutul și frecvența instruirii se stabilesc în funcție de rol, aplicație și cerințele organizației; nu există o periodicitate anuală universală impusă pentru toate mașinile.

În practică · Iterația tipică pe stația SAP: cazul presării

SCENARIU ALTERNATIV ȘI EXCLUSIV DIDACTIC (ALT–SAFETY): exemplu ipotetic de iterație a reducerii riscului, NU evaluare efectuată pe SAP de referință. Prima iterație a identificat pericolul major de presare cu forță de 20 kN și cursa 100 mm, pentru care o evaluare de risc ar analiza severitatea, expunerea și evitarea și ar stabili motivat PLr pentru funcția de protecție; PL e este doar o ipoteză de exercițiu, nu un rezultat calculat pentru SAP de referință.

Aplicarea Pasului 1 a redus forța de presare la 8 kN (suficient pentru piesele țintă) și cursa la 30 mm, fără a permite deducerea automată a unor valori S/F/P sau a nivelului PLr (zona de prindere accesibilă doar la deschiderea gardianului, nu în operare AUTO). PLr trebuie determinat separat pentru fiecare funcție din evaluarea documentată a riscului. Mai important: masa cilindrului și a sculei a fost redusă de la 12 kg la 5 kg, ceea ce poate reduce riscul secundar de cădere a sculei, dar necesită verificarea retenției în cazul demontării pentru mentenanță.

Aplicarea Pasului 2 a adăugat un gard mobil interblocat (ISO 14119), o perdea optică de tip 4 în zona de acces stângă (IEC 61496-1/-2) și trei dispozitive E-STOP, integrate într-o arhitectură de comandă a siguranței care trebuie dimensionată și validată. Pasul 3 a adăugat instrucțiuni pentru operator, pictograme pe carter și instruire adaptată sarcinilor și riscurilor [145]–[146].

9.3 Performance Level (PL) conform ISO 13849-1

ISO 13849-1:2023 definește metodologia de proiectare și integrare a părților sistemului de comandă legate de siguranță (SRP/CS). Performance Level este exprimat pe cinci niveluri, a–e, asociate unor intervale PFH. În forma utilizată curent: PL a = 10^{-5}...<10^{-4} 1/h; PL b = 3×10^{-6}...<10^{-5}; PL c = 10^{-6}...<3×10^{-6}; PL d = 10^{-7}...<10^{-6}; PL e = 10^{-8}...<10^{-7}. PL nu este doar o probabilitate: cerințele arhitecturale, sistematice, software și de validare rămân obligatorii [3].

9.3.1 PLr și Performance Level atins

Distincția fundamentală este între PLr (nivelul cerut pentru funcția de siguranță) și PL atins de SRP/CS. Proiectantul demonstrează că soluția îndeplinește PLr și celelalte cerințe aplicabile. PLr provine din evaluarea riscului și din standardul de tip C, dacă există; PL atins rezultă din arhitectură, MTTFd/fiabilitate, DCavg, măsuri împotriva CCF și cerințele sistematice/software.

9.3.2 Categoriile arhitecturale și parametrii de fiabilitate

Categoriile B, 1, 2, 3 și 4 descriu arhitecturi și comportamente la defect ale SRP/CS. Categoria singură nu determină Performance Level: PL atins rezultă din combinația dintre arhitectură, fiabilitatea componentelor, diagnostic, măsurile împotriva defectelor de cauză comună și cerințele sistematice/software (Figura 9.5). De aceea, o funcție nu trebuie calificată sau respinsă numai prin eticheta categoriei.

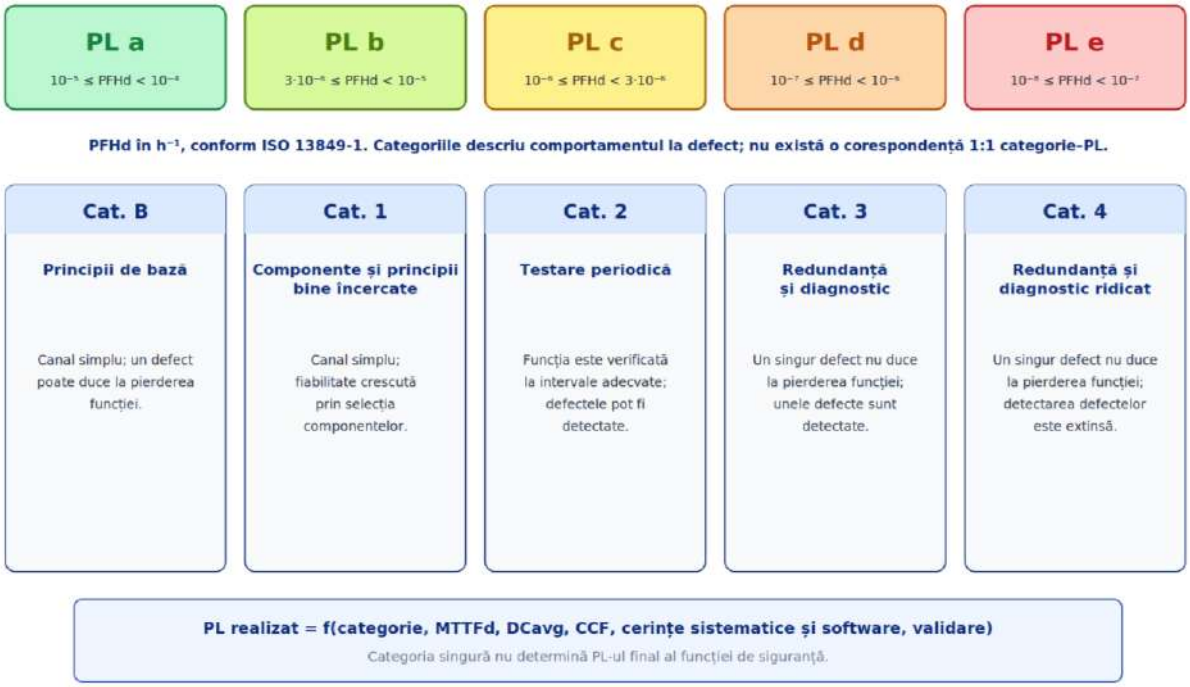


Figura 9.5. Nivelurile PL (a–e) și intervalele PFH asociate, împreună cu caracteristicile calitative ale categoriilor arhitecturale B, 1, 2, 3 și 4. Nu există o corespondență univocă între categorie și PL; PL realizat depinde de categorie, MTTFd, DCavg, CCF și cerințele sistematice/software.

Categoriile B și 1 utilizează arhitecturi fără redundanța specifică categoriilor 3–4, iar Categoria 2 introduce testarea/diagnosticul periodic conform condițiilor standardului. Domeniul de PL care poate fi atins este limitat de categoria și parametrii utilizați, dar adecvarea pentru o funcție se decide prin

comparația PL atins–PLr și prin validarea funcției complete. Nu este corectă asocierea unei categorii cu o anumită funcție de mașină doar prin exemple precum „semnalizare” sau „oprire”.

Categoria 3 utilizează o structură redundantă astfel încât un singur defect să nu conducă la pierderea funcției de siguranță, iar defectele sunt detectate în măsura necesară de arhitectură și diagnostic. Categoria 4 impune cerințe mai stricte privind comportamentul la defecte și acumularea defectelor. Diversitatea tehnologică poate fi o măsură utilă împotriva CCF, dar nu este, prin ea însăși, definiția Categoriei 4. Nivelul PL rezultat se stabilește din combinația tuturor parametrilor ISO 13849-1, nu doar din categoria aleasă.

9.3.3 Evaluarea PL cu SISTEMA

Evaluarea PL poate fi realizată manual sau cu instrumente software. SISTEMA, dezvoltat de IFA, modelează SRP/CS pe baza arhitecturilor prevăzute de ISO 13849-1 și calculează parametrii relevanți, inclusiv PL. Pentru proiecte noi bazate pe ISO 13849-1:2023 se utilizează SISTEMA 3.x; versiunile 2.x sunt asociate ediției 2015. Bibliotecile producătorilor pot facilita introducerea datelor, dar valorile și condițiile de utilizare trebuie verificate în documentația componentelor [147].

Fluxul tipic este: definirea funcției de siguranță și a PLr; descompunerea în subsisteme de intrare–logică–ieșire; alegerea arhitecturii; introducerea datelor de fiabilitate și diagnostic; evaluarea CCF; calculul PFH/PL și documentarea ipotezelor. Raportul SISTEMA este o dovadă tehnică utilă în dosarul de proiect, dar nu înlocuiește evaluarea riscului, validarea conform ISO 13849-2 și responsabilitatea producătorului.

Avantajul SISTEMA este trasabilitatea calculului și reducerea erorilor de structurare, nu o «validitate juridică automată». Organismele de evaluare pot utiliza raportul ca parte a dovezilor, însă acceptarea conformității depinde de calitatea datelor de intrare, de arhitectura reală, de validare și de aplicarea corectă a standardului.

9.4 Safety Integrity Level (SIL): IEC 62061

IEC 62061:2021, împreună cu amendamentele A1:2024 și A2:2026, este standardul sectorial pentru proiectarea, integrarea și validarea sistemelor de comandă legate de siguranță ale mașinilor. Ediția actuală nu trebuie prezentată ca fiind limitată exclusiv la o anumită tehnologie de actuator; accentul este asupra sistemului de comandă care execută funcții de siguranță și asupra ciclului de viață al acestuia [4].

9.4.1 Conceptul SIL pentru mașini

Pentru mașini sunt utilizate SIL 1, SIL 2 și SIL 3. Pentru funcțiile cu solicitare ridicată/continuă, intervalele PFH sunt, în esență: SIL 1 = 10^{-6}…<10^{-5} 1/h; SIL 2 = 10^{-7}…<10^{-6}; SIL 3 = 10^{-8}…<10^{-7}. Aceste intervale permit compararea numerică cu PFH din ISO 13849-1, însă cele două standarde au cerințe și metode proprii și nu sunt interschimbabile printr-o simplă etichetă.

IEC 62061 și ISO 13849-1 folosesc modele și structuri diferite pentru demonstrarea integrității funcțiilor de siguranță. IEC 62061 utilizează parametri probabilistici și cerințe de arhitectură/sistem, iar ISO 13849-1 combină categoriile cu parametri precum MTTFd, DCavg și CCF. Niciuna dintre abordări nu

trebuie descrisă generic ca fiind „mai riguroasă”; alegerea și aplicarea corectă depind de funcție, datele disponibile și standardul de tip C.

9.4.2 Relația PL–SIL și criterii de alegere

În practică se pot compara intervalele PFH: SIL 1 acoperă numeric domeniul corespunzător în principal PL b–c, SIL 2 corespunde numeric domeniului PL d, iar SIL 3 domeniului PL e. Aceasta este o comparație de performanță probabilistică, nu o echivalență completă de conformitate. Alegerea standardului se face după arhitectura mașinii, politica organizației, standardul de tip C și cerințele clientului (Tabelul 9.2).

Tabelul 9.2. Criterii de alegere între ISO 13849-1 și IEC 62061 pentru o aplicație dată.

Criteriu	ISO 13849-1 (PL)	IEC 62061 (SIL)
Domeniu aplicare	SRP/CS pentru tehnologii diverse, inclusiv electrice, hidraulice, pneumatice și mecanice	Sisteme de comandă legate de siguranță ale mașinilor; cadru sectorial IEC 61508
Abordare	Categorii + MTTFd + DCavg + CCF + cerințe sistematice/software	Ciclu de viață safety, arhitectură și evaluare probabilistică a SCS
Unealtă de calcul	SISTEMA 3.x și biblioteci de producător; calculul rămâne responsabilitatea proiectantului	Instrumente proprii/producător sau calcul documentat conform IEC 62061
Alegere în proiect	Foarte răspândit în mașini; util când arhitectura SRP/CS se exprimă natural prin categoriile ISO 13849	Util când organizația/proiectul lucrează în cadrul IEC 61508/62061 sau cere lifecycle SIL
Criteriu decisiv	Standard de tip C, experiența organizației și disponibilitatea datelor	Standard de tip C, cerințe contractuale și integrarea în arhitectura funcțional-safety
Observație	Nu există procente universale de utilizare sau timp standard de proiectare	Nu există procente universale de utilizare sau timp standard de proiectare

Pentru un proiectant de echipamente nu este utilă o regulă de tip «ISO 13849 pentru 80–85 % din proiecte». Ambele standarde sunt recunoscute în domeniul mașinilor. Alegerea se documentează în funcție de standardul de tip C, arhitectura controlului, cerințele clientului, competențele organizației și disponibilitatea datelor de fiabilitate. Utilizarea simultană este posibilă numai cu o delimitare clară a funcțiilor și fără a combina necontrolat metodele de calcul.

9.5 Categoriile de oprire IEC 60204-1 și starea sigură a actuatorilor

Secțiunile precedente au tratat PL/SIL și arhitectura funcției de siguranță. La nivelul mecanic trebuie definit comportamentul fiecărui actuator la declanșarea funcției: oprire, menținere, retragere, frânare sau altă stare controlată. Decizia depinde de tipul actuatorului, inerție, sarcina manipulată, energia stocată și pericol; nu se deduce direct dintr-o categorie de oprire sau dintr-un nivel PL/SIL.

9.5.1 Categoriile de oprire IEC 60204-1: implicații mecanice

IEC 60204-1:2016+A1:2021 definește trei categorii de oprire. Categoria 0 este o oprire necontrolată prin îndepărtarea imediată a energiei de la actuatoare; «necontrolată» nu înseamnă că mișcarea se oprește instantaneu: inerția poate continua (Figura 9.6). Categoria 1 este o oprire controlată cu energie disponibilă pentru realizarea opririi, urmată de îndepărtarea energiei. Categoria 2 este o oprire controlată cu energia menținută la actuatoare. Alegerea se bazează pe evaluarea riscului și pe comportamentul mecanic necesar [29].

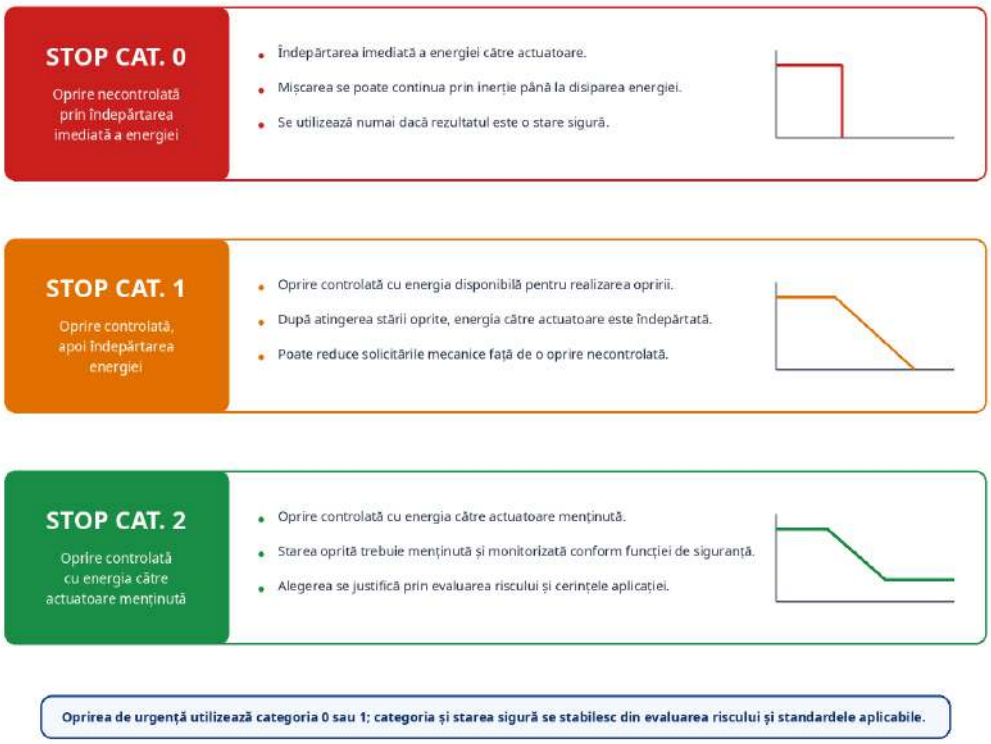


Figura 9.6. Categoriile de oprire conform IEC 60204-1: categoria 0, oprire necontrolată prin îndepărtarea imediată a energiei; categoria 1, oprire controlată urmată de îndepărtarea energiei; categoria 2, oprire controlată cu energia către actuatoare menținută. Pentru oprirea de urgență sunt utilizabile categoriile 0 sau 1, în funcție de evaluarea riscului.

Categoria 0: oprire necontrolată prin îndepărtarea imediată a energiei de la actuatoare. Este adecvată numai dacă îndepărtarea energiei conduce la o stare sigură și mișcarea reziduală nu creează un risc mai mare. Timpul până la oprirea efectivă este o proprietate a mecanicii și trebuie măsurată sau determinată, nu presupusă ca «instantanee».

Categoria 1: oprire controlată, urmată de îndepărtarea energiei după ce oprirea a fost realizată. Este frecvent utilizată când o decelerare controlată reduce riscul de coliziune sau de pierdere a sarcinii. Secvența de oprire trebuie implementată prin funcții de siguranță adecvate și validată pentru situația concretă.

Categoria 2: oprire controlată cu energia menținută la actuatoare. Nu este «interzisă pentru PL d/e» printr-o regulă generală; adecvarea sa depinde de funcția de siguranță, de arhitectura de menținere a stării și de evaluarea riscului. Pentru funcția de oprire de urgență, ISO 13850 și IEC 60204-1 conduc în mod uzual la categoria 0 sau 1, nu la categoria 2 [29, 131].

9.5.2 Starea sigură pentru fiecare tip de actuator

Starea sigură este starea în care riscul asociat funcției este redus în condițiile definite. Ea nu este identică pentru toate actuatoarele: o mișcare poate necesita oprire, o sarcină suspendată poate necesita menținere/reținere, iar o axă cu inerție poate necesita frânare controlată. Starea se definește pentru fiecare funcție pe baza evaluării riscului și se verifică inclusiv la pierderea energiei și la defectele relevante (Figura 9.7; Tabelul 9.3).

Tabelul 9.3. Exemple conceptuale de stări sigure pentru actuatoare industriale. Starea sigură reală se stabilește pentru fiecare funcție prin evaluarea riscului și validarea arhitecturii concrete.

Tip actuator	Configurație tipică	Stare sigură	Cum se asigură mecanic
Cilindru pneumatic, presare/orizontal	Distribuitor configurat pentru starea de repaus sigură; eventual evacuare rapidă	Retras / fără forță periculoasă	Configurația valvei, geometria și energia stocată se aleg astfel încât pierderea comenzii să reducă riscul; se verifică mișcarea reziduală.
Cilindru pneumatic, sarcină verticală	Blocare de sarcină + element mecanic de retenție unde riscul o cere	Menținut / sprijinit sigur	Nu se presupune că un centru închis reține indefinit sarcina. Se prevăd supape de blocare și/sau retenție mecanică dimensionate pentru defecte și scurgeri.
Cilindru hidraulic, axă verticală	Supapă de menținere a sarcinii / counterbalance + măsură mecanică pentru mentenanță	Sarcină reținută controlat	Soluția se dimensionează din masa suspendată, presiune, scurgeri admisibile și scenarii de defect; redundanța rezultă din evaluarea riscului, nu dintr-un prag universal de tonaj.
Motor asincron / transportor	Oprire conform funcției safety; frână dacă timpul de coast-down este inacceptabil	Oprit; eventual frânat	Îndepărtarea cuplului nu garantează oprire imediată. Se verifică inerția, timpul de oprire și riscul de repornire.
Servomotor / axă controlată	STO, SS1, SBC sau alte subfuncții IEC 61800-5-2, după caz	Cuplu sigur eliminat și/sau mișcare oprită/reținută	STO nu este o frână și nu împiedică gravitația. Pentru axe verticale se proiectează menținerea sarcinii și se validează frâna/elementul mecanic.
Stepper / axă ușoară	Disable sigur numai dacă arhitectura îl califică; frână/retentor pentru sarcini verticale	Oprit / sarcină reținută	Nu se presupune capacitate safety din simplul semnal enable. Funcția trebuie realizată prin componente și arhitectură evaluate.
Vacuum / manipulare	Supapă de retenție, rezervă de vacuum și monitorizare	Piesa menținută sau adusă într-o stare sigură	Starea sigură se definește din consecința căderii piesei. Poate fi necesară reținere temporară, prindere mecanică sau coborâre controlată.

Tabelul ilustrează că starea sigură este o proprietate a funcției și a sarcinii, nu a tehnologiei în sine. În special, pentru sarcini suspendate nu este suficientă «blocarea fluidului» fără analiza scurgerilor, a ruperii conductei și a mentenanței. Pot fi necesare supape de menținere, frâne, opritoare, proptele sau blocaje mecanice, dimensionate și validate pentru riscul concret.

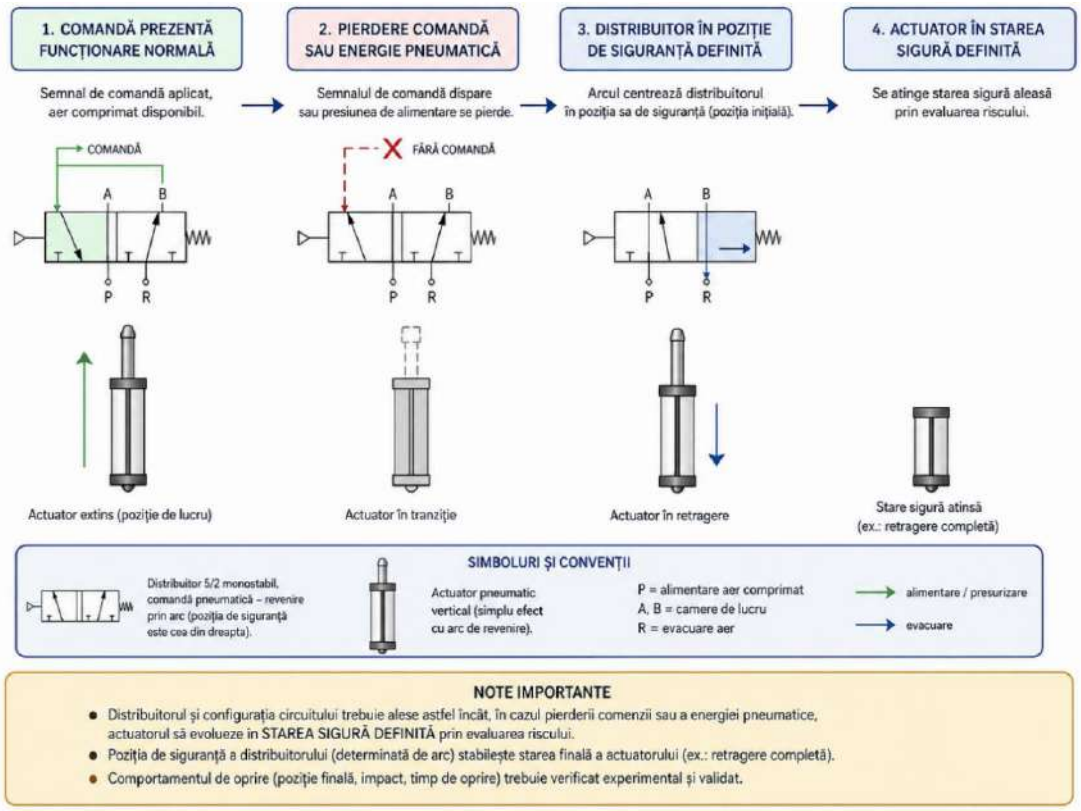


Figura 9.7. Exemplu conceptual de stare sigură pentru un actuator pneumatic. Configurația distribuitorului și a circuitului trebuie aleasă astfel încât pierderea comenzii să conducă la starea definită prin evaluarea riscului; mișcarea și timpul de oprire se verifică experimental.

Figura 9.8 prezintă un exemplu conceptual de reținere a unei sarcini hidraulice verticale.

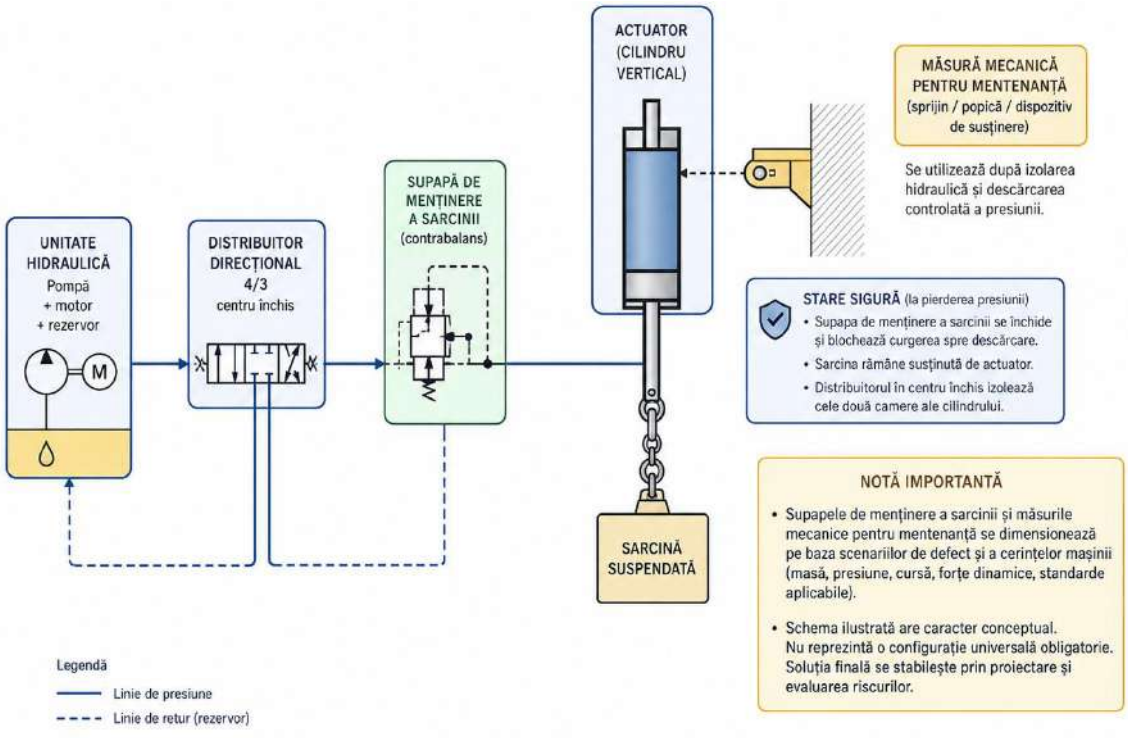


Figura 9.8. Exemplu conceptual pentru reținerea unei sarcini hidraulice verticale. Supapele de menținere a sarcinii și măsurile mecanice pentru mentenanță se dimensionează din scenariile de defect și din cerințele mașinii; schema ilustrată nu reprezintă o configurație universal obligatorie.

Pentru acționările electrice, Figura 9.9 sintetizează funcțiile de siguranță ale unei axe electrice; STO elimină capacitatea drive-ului de a produce cuplu, dar nu asigură prin ea însăși frânarea.

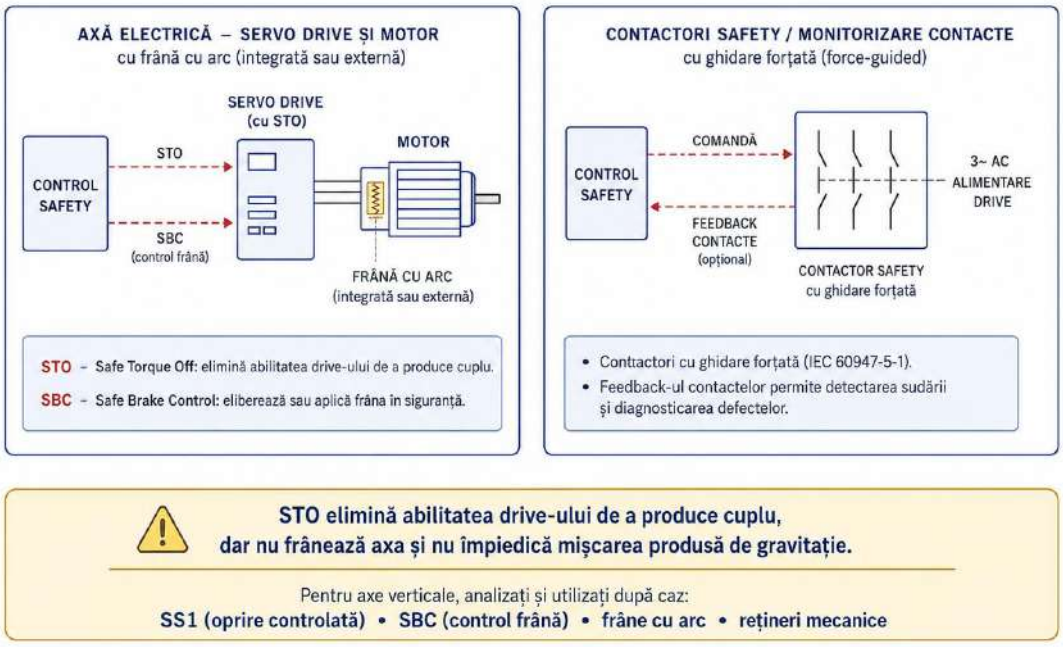


Figura 9.9. Funcții safety pentru o axă electrică. STO elimină capacitatea drive-ului de a produce cuplu, dar nu realizează prin ea însăși frânarea și nu împiedică mișcarea gravitațională. Pentru axe verticale se analizează SS1/SBC, frâne și/sau retenție mecanică [148].

9.5.3 Opritoare și blocaje mecanice pasive

Măsurile mecanice pasive (opritoare, dispozitive de reținere, frâne sau alte limitări fizice) pot fi necesare atunci când evaluarea riscului arată că o simplă comandă electrică/fluidică nu controlează suficient energia sau mișcarea reziduală (Figura 9.10). Necesitatea lor nu rezultă automat dintr-un anumit PL, ci din pericol, modul de defectare și arhitectura de reducere a riscului.

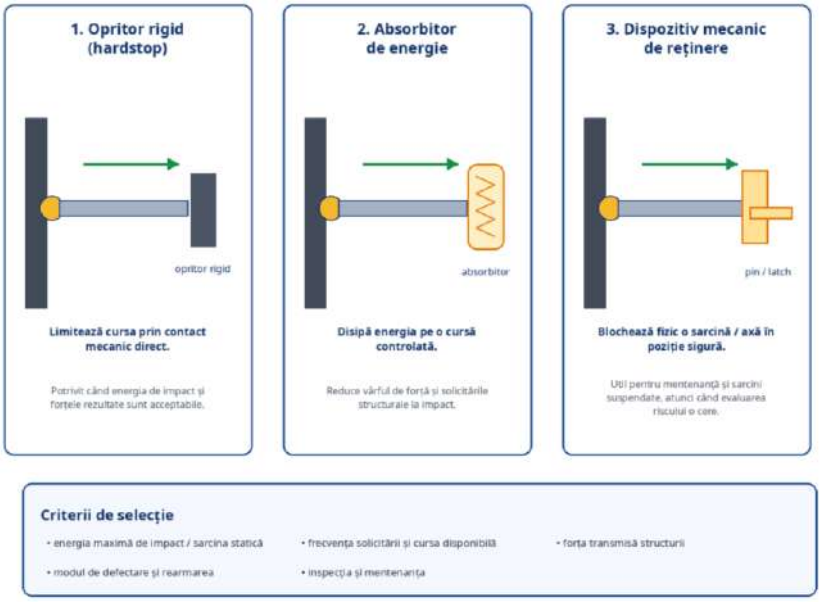


Figura 9.10. Exemple de limitare mecanică pasivă: opritor rigid, absorbitor de energie și dispozitiv mecanic de reținere. Alegerea se face din energia de impact sau sarcina statică, frecvența solicitării, spațiul disponibil, modul de defectare și cerințele de mentenanță.

Opritoarele mecanice pot fi rigide, elastomerice, amortizoare industriale sau mecanisme de blocare/reținere. Dimensionarea se face din energia și forța maximă de impact, frecvența de utilizare, cursa de decelerare, rezistența structurii și starea post-impact. Factorii de siguranță și capacitățile nu se aleg prin praguri universale; se folosesc standardele de produs, datele furnizorului și calculul structural al aplicației.

Selectarea și dimensionarea unui opritor sau amortizor mecanic pornesc de la energia maximă și sarcinile posibile în scenariul de defect, inclusiv contribuția gravitațională atunci când este relevantă. Se verifică apoi frecvența de acționare, cursa disponibilă de decelerare, forțele transmise structurii și comportamentul după impact/rearmare. Factorii de proiectare, capacitatea statică și durabilitatea nu se aleg prin valori universale; se folosesc standardul de tip C, regulile de calcul structural și datele producătorului dispozitivului pentru aplicația concretă.

În practică · Când este justificată o barieră mecanică pasivă

Pentru sarcini suspendate, operații de mentenanță în zona de pericol sau mecanisme cu energie semnificativă, evaluarea riscului trebuie să analizeze ce se întâmplă la pierderea funcției electronice și a energiei de acționare. Dacă rezultatul poate fi cădere, strivire sau coliziune, se analizează o măsură pasivă independentă: opritor, proptea, pin de blocare, dispozitiv de reținere ori suport mecanic.

Necesitatea și dimensionarea rezultă din evaluarea riscului și din standardul de tip C; nu există praguri universale de 100 kg, 100 kN sau costuri standard care fac automat obligatoriu un anumit dispozitiv.

9.6 Poziționarea protecțiilor: ISO 13855:2024

După definirea funcțiilor de siguranță și a stării sigure, poziția protecțiilor trebuie determinată astfel încât persoana să nu poată ajunge la pericol înainte ca mișcarea periculoasă să înceteze. Referința actuală este ISO 13855:2024, care tratează poziționarea și dimensionarea mai multor tipuri de protecții: ESPE, covoare/pardoseli sensibile la presiune, comenzi bimanuale și protecții interblocate. Ediția 2010 este retrasă [149].

9.6.1 Distanța de separare: timp de oprire, apropiere și geometrie

Metodele ISO 13855 utilizează timpul total de oprire, viteza de apropiere și termeni geometrici/de penetrare specifici configurației. Relația S = K·T + C rămâne un model didactic util pentru anumite cazuri, dar K și C nu trebuie memorate ca valori universale: ele se selectează din metoda normativă corespunzătoare geometriei de apropiere, tipului și rezoluției dispozitivului (Figura 9.11).

$$S = K \cdot T + C \tag{9.1}$$

unde S este distanța minimă de instalare a dispozitivului de detecție [mm], K este viteza de apropiere a părții corpului uman [mm/s], T este timpul total de răspuns al sistemului [s], iar C este factorul de penetrare a corpului în zona de detecție [mm]. Parametrii se stabilesc conform cazului normativ aplicabil; relația nu se utilizează izolat de condițiile, corecțiile și verificările prevăzute de ISO 13855:2024.

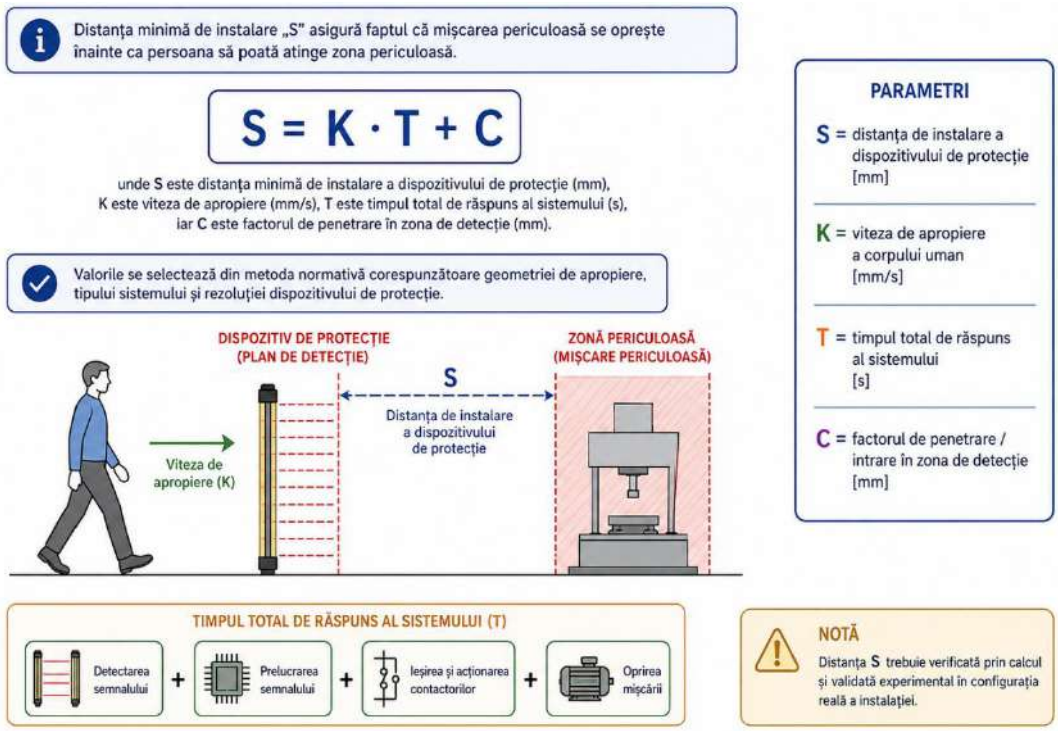


Figura 9.11. Relația de proiectare S = K·T + C utilizată în metodele ISO 13855:2024. Parametrii K și C se selectează pentru geometria de apropiere și tipul dispozitivului, iar T include întregul lanț de răspuns până la încetarea mișcării periculoase.

Parametrul K se selectează conform metodei de apropiere definită de ISO 13855:2024. Standardul distinge mișcarea membrelor superioare și deplasarea persoanei și precizează domeniul în care valorile sunt aplicabile. Alergarea, săritura sau căderea nu sunt acoperite de ipotezele standardului și trebuie tratate separat dacă sunt rezonabil previzibile.

Parametrul T trebuie să includă toate întârzierile relevante din lanțul funcției de siguranță și timpul până la încetarea efectivă a mișcării periculoase. În faza de proiectare se utilizează date garantate de producători și modele conservatoare; la validare, timpul de oprire se măsoară pe mașină reală și se ia în considerare variația sa în condițiile previzibile de utilizare și uzură.

Termenul C și eventualii termeni suplimentari depind de dispozitiv, rezoluție și geometria accesului. Pentru o perdea optică verticală, un scaner, o pardoseală sensibilă sau o protecție interblocată pot fi aplicabile relații și condiții diferite. Într-un proiect profesional se citează clauza/tabelul ISO 13855:2024 utilizat, nu doar formula finală.

9.6.2 Exemplu didactic: poziționarea unei perdele optice la o presă

Exemplul rezolvat 9.1. Poziționarea unei perdele optice: exemplu didactic

Enunț. Pentru o presă de asamblare s-a măsurat/estimat conservator un timp total de oprire T = 0,282 s. Se utilizează o perdea optică cu rezoluție 14 mm, instalată vertical. Pentru ilustrarea calculului se presupune că metoda ISO 13855:2024 selectată pentru geometria concretă conduce la K = 2000 mm/s și C = 0 mm.

Calcul: Cu valorile ipotezei, distanța minimă rezultă:

$$S = K \cdot T + C = 2\,000 \cdot 0{,}282 + 0 = 564 \text{ mm} \tag{9.2}$$

În proiect se adoptă, de exemplu, 600 mm, cu condiția verificării tuturor cerințelor suplimentare ale metodei normative și a riscului de reach-over/reach-around.

Validare. După montaj, timpul de oprire se măsoară cu instrumente adecvate. Dacă timpul real maxim este mai mare decât ipoteza de 0,282 s, distanța se recalculează. Valoarea K, termenul C și orice limită inferioară se confirmă direct din ediția ISO 13855 aplicabilă; exemplul nu substituie standardul.

9.6.3 Scanere laser și dispozitive sensibile la presiune

ISO 13855:2024 tratează și ESPE cu zone bidimensionale/tridimensionale, covoare/pardoseli sensibile la presiune, comenzi bimanuale și protecții interblocate. Pentru fiecare tehnologie se utilizează metoda specifică de poziționare și dimensiune. Timpii de răspuns, rezoluția și câmpurile de protecție se iau din documentația dispozitivului și se validează pe instalația reală.

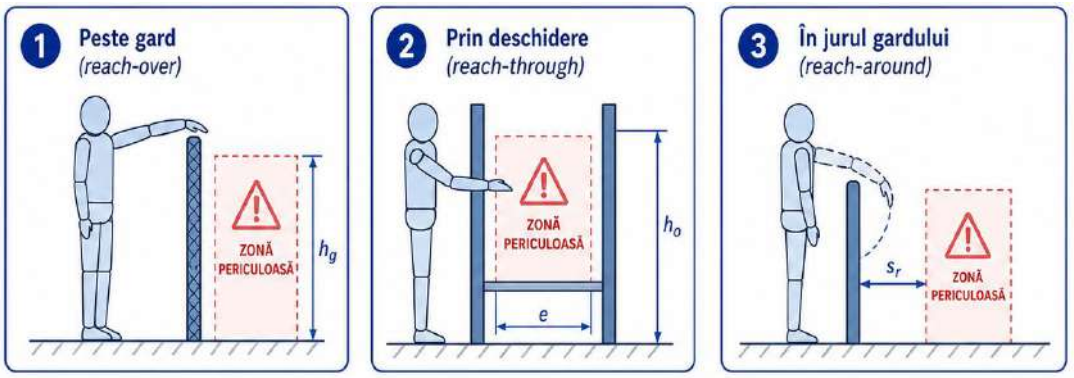
Pentru covoare și pardoseli sensibile la presiune, poziționarea trebuie corelată cu ISO 13856-1 și cu metoda ISO 13855:2024. Suprafața rezultată poate influența puternic layout-ul celulei; comparația cu scanere sau protecții fizice se face pe baza riscului, ergonomiei, disponibilității și costului real al proiectului, nu pe valori comerciale universale.

9.7 Garduri și distanțe de protecție: ISO 14120 + ISO 13857

Protecțiile fixe sunt printre cele mai robuste măsuri de safeguarding deoarece realizează o separare geometrică și nu depind de timpul de reacție al unui sistem de detecție. Protecțiile mobile interblocate adaugă însă componente de control care trebuie proiectate și validate ca parte a funcției de siguranță. Alegerea între gard, protecție interblocată și ESPE se face din accesul necesar, riscul de proiectile, ergonomie, mentenanță, spațiu și costul real al proiectului; nu se folosesc prețuri universale. Standardele de bază sunt ISO 14120 și ISO 13857, completate de ISO 14119 când există interblocări [145, 150, 151].

9.7.1 Garduri conform ISO 14120: clasificare și proiectare

ISO 14120:2015 clasifică protecțiile în fixe și mobile și stabilește cerințe de proiectare/construcție. O protecție mobilă poate fi asociată unui dispozitiv de interblocare, iar atunci când pericolul persistă după comanda de oprire poate fi necesară și blocarea protecției (guard locking). Necesitatea interblocării și a blocării nu rezultă automat dintr-un nivel PLr; se stabilește din accesul previzibil, timpul de dispariție a pericolului, energiile reziduale și evaluarea riscului, folosind ISO 14119 pentru dispozitivele de interblocare.



Scenariu	Variabilă geometrică esențială	Implicație pentru proiectare
1 Peste gard	h_g – înălțimea gardului	Gardul trebuie să aibă înălțimea suficientă pentru a împiedica trecerea mâinilor peste protecție.
2 Prin deschidere	e – deschiderea (lățimea sau diametrul) h_o – înălțimea deschiderii	Dimensiunea deschiderii trebuie limitată astfel încât mâna să nu poată ajunge în zona periculoasă.
3 În jurul gardului	s_r – distanța laterală față de zona periculoasă	Distanța trebuie mărită pentru a împiedica atingerea zonei periculoase pe lângă protecție.

Notă pentru proiectant
Se selectează scenariul relevant (1, 2 sau 3) în funcție de configurația protecției și de accesul posibil.
Se determină apoi dimensiunile și distanțele minime conform ISO 13857, în funcție de înălțimea gardului și de geometria zonei periculoase.

Figura 9.12. Distanțe de protecție conform ISO 13857: trei scenarii de acces, reach-over (peste gard), reach-around (în jurul gardului), reach-through (prin deschideri din gard). Pentru fiecare scenariu, standardul tabulează distanțele minime în funcție de înălțime și dimensiune deschidere. Proiectarea gardurilor începe cu identificarea scenariului dominant și selecția distanțelor corespunzătoare.

Materialul gardului se selectează din riscurile mecanice și de proces: plasă sudată pentru vizibilitate și ventilație, policarbonat sau alte panouri transparente când este necesară reținerea particulelor și observarea procesului, tablă/structuri metalice pentru impact sau medii severe. Grosimea, rigiditatea, fixarea și rezistența la proiectile se verifică pentru aplicație. Înălțimea gardului și golurile față de pardoseală nu se aleg dintr-o singură valoare «standard», ci se corelează cu ISO 13857 și cu geometria zonei periculoase (Figura 9.12).

9.7.2 Distanțele de protecție ISO 13857

ISO 13857:2019 rămâne ediția publicată curentă; în septembrie 2026 a fost inițiată revizuirea sa; furnizează distanțe de protecție pentru prevenirea atingerii zonelor periculoase de către membrele superioare și inferioare. Valorile sunt tabelare și depind de dimensiunea și forma deschiderii, poziția corpului, înălțimea protecției și poziția zonei periculoase. Standardul nu poate fi redus la o singură regulă de «850 mm» și nici la o singură înălțime universală a gardului [151].

Tabelul 9.4 arată cum se utilizează ISO 13857:2019 pentru scenariile de reach-through, reach-over și reach-around.

Tabelul 9.4. Utilizarea ISO 13857:2019 pentru scenarii de reach-through, reach-over și reach-around. Valorile numerice se preiau din tabelul normativ corespunzător geometriei reale.

Tip de acces	Ce se verifică	Decizie de proiectare
Reach-through	Dimensiunea și forma deschiderii; partea corpului care poate pătrunde	Distanța la pericol se selectează din tabelele ISO 13857:2019 pentru deschiderea concretă.
Reach-over	Înălțimea structurii de protecție și poziția/înălțimea pericolului	Se utilizează tabelul de reach-over; creșterea gardului poate reduce distanța necesară, dar nu există o valoare universală.
Reach-around	Margini laterale, colțuri și goluri dintre panouri	Se elimină traseele de acces în jurul protecției sau se mărește distanța la pericol.
Lower limbs	Goluri la bază și posibilitatea introducerii piciorului/gambei	Se aplică cerințele dedicate membrelor inferioare atunci când accesul este previzibil.
Observație	ISO 13857 acoperă populația definită de standard și anumite percentile antropometrice	Pentru persoane sau situații în afara domeniului standardului, evaluarea riscului trebuie completată.

Consecința de proiectare este că mici schimbări ale dimensiunii unei deschideri pot muta aplicația într-o altă clasă tabelară și pot crește substanțial distanța necesară. De aceea, deschiderile din plasă, fantele de alimentare și golurile de la uși se verifică direct pe desenul de ansamblu cu tabelul ISO 13857:2019 aplicabil, nu prin extrapolare liniară.

Pentru reach-over, distanța rezultă din combinația dintre înălțimea structurii de protecție și poziția zonei periculoase. Selecția se face din tabelul normativ, iar proiectantul trebuie să verifice și accesul lateral și prin deschideri. Afirmații precum «2,4 m este înălțimea standard» sunt cel mult convenții de proiect ale unei organizații, nu substitut pentru calculul geometric cerut de ISO 13857.

9.7.3 Protecții mobile interblocate: ISO 14119:2024

ISO 14119:2024 clasifică dispozitivele de interblocare, între altele, în funcție de principiul de acționare și codare. În schema clasică: Type 1, acționare mecanică necodificată; Type 2, acționare mecanică codificată; Type 3, acționare fără contact necodificată; Type 4, acționare fără contact codificată. Nivelul de codare și măsurile împotriva neutralizării se selectează din evaluarea riscului și motivația previzibilă de defeat (Figura 9.13); Type 4 nu este «obligatoriu pentru PL e» printr-o regulă generală.

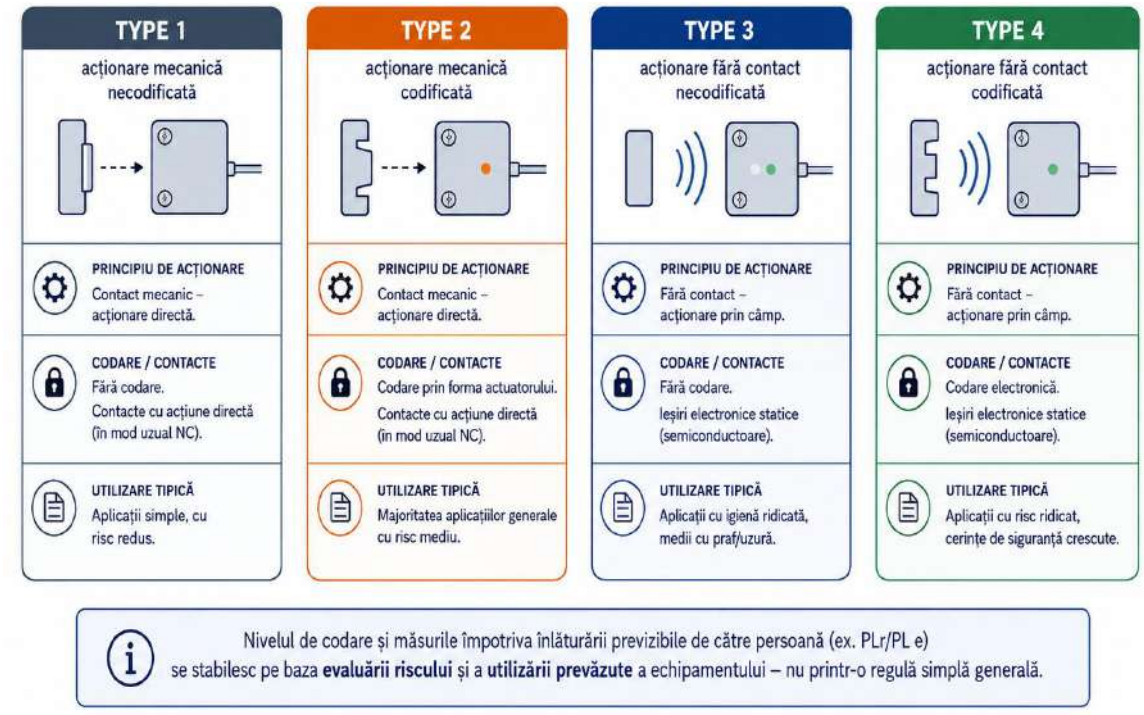


Figura 9.13. Tipuri de dispozitive de interblocare conform ISO 14119:2024: Type 1, mecanic necodificat; Type 2, mecanic codificat; Type 3, fără contact, necodificat; Type 4, fără contact, codificat. Nivelul de codare și măsurile împotriva eludării se aleg din evaluarea riscului și din utilizarea previzibilă; Type 4 nu este obligatoriu prin simpla cerință de PL.

Guard locking este necesar atunci când deschiderea protecției înainte de dispariția pericolului ar permite accesul la o situație periculoasă, de exemplu din cauza timpului de oprire, presiunii, temperaturii sau altor energii reziduale. Necesitatea se stabilește comparând timpul de acces cu timpul de dispariție a pericolului și prin evaluarea riscului; nu rezultă automat din PLr.

În practică · Gard fizic, ESPE sau soluție hibridă

Alegerea protecției se face din risc și funcția de operare. Gardurile oferă separare fizică și pot reține proiectile sau emisii; ESPE permit acces frecvent fără element mobil, dar necesită distanță de separare, integrare safety și validarea câmpului de detecție. În multe celule rezultă o soluție hibridă: gard pe perimetrul fix și ESPE în zona de încărcare/descărcare.

Costul, fiabilitatea, vizibilitatea și ergonomia trebuie evaluate pentru layout-ul real. Nu se folosesc valori comerciale universale sau afirmații de tip «zero defecte electronice».

9.8 Prevenirea pornirii neașteptate: ISO 14118 și LOTO

Intervențiile de mentenanță, curățare, deblocare sau schimbare de format pot expune persoanele la pornire neașteptată sau la eliberarea energiilor stocate. ISO 14118:2017 stabilește cerințe de proiectare pentru prevenirea pornirii neașteptate din surse electrice, hidraulice, pneumatice, energie stocată și influențe externe. Termenul LOTO este folosit în special în practica OSHA 29 CFR 1910.147; cele două cadre sunt complementare, dar nu trebuie prezentate ca fiind același standard [152, 153].

Controlul energiilor periculoase în mentenanță trebuie susținut de proiectarea echipamentului: identificarea surselor, dispozitive de separare/izolare adecvate, posibilitatea de blocare atunci când

este cerută, disiparea sau reținerea energiei stocate și verificarea stării sigure. Procedura organizațională de tip lockout/tagout completează aceste caracteristici constructive; cerințele concrete se stabilesc din ISO 14118, IEC 60204-1, standardele sectoriale și legislația aplicabilă.

9.8.1 Sursele de energie și izolarea lor

Pentru analiza de proiect este util un inventar al tuturor energiilor: electrică, pneumatică, hidraulică, gravitațională, elastică, termică, presiune/vacuum și, după proces, energie chimică ori alte surse. Lista nu este o clasificare universală «în șase forme» impusă de ISO 14118; scopul este să nu fie omisă nicio sursă capabilă să producă mișcare sau expunere periculoasă.

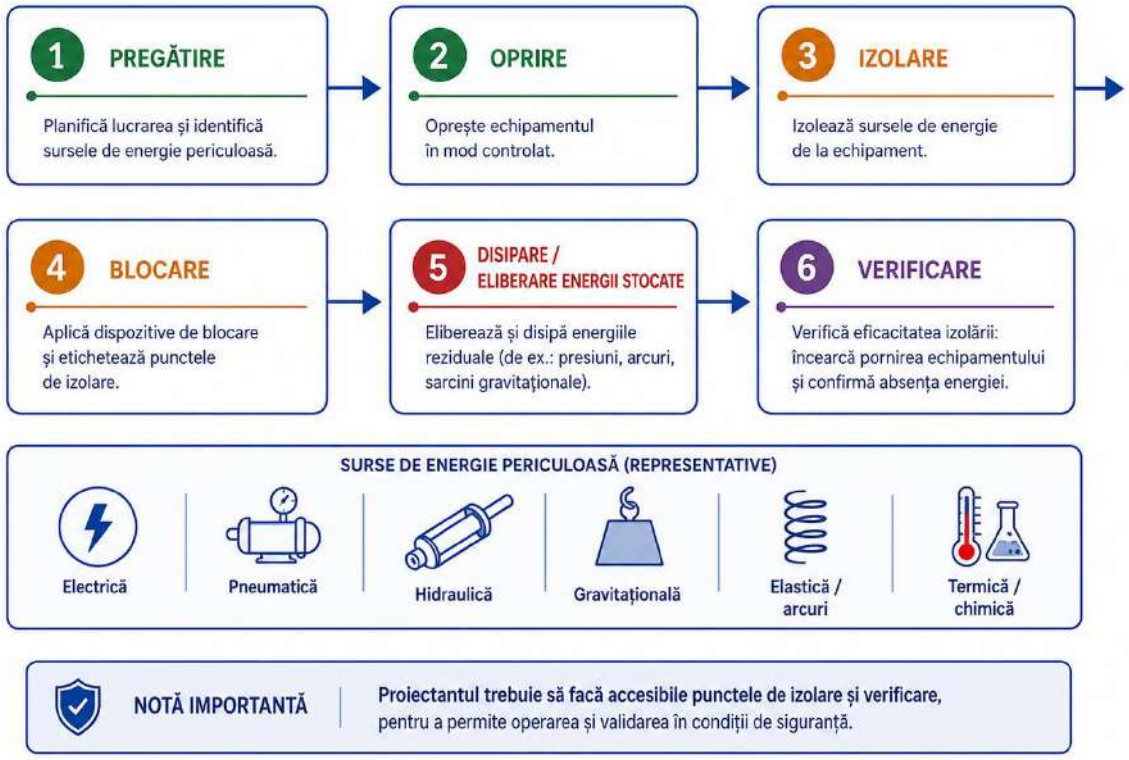


Figura 9.14. Flux didactic în șase pași pentru controlul energiilor periculoase, corelat cu practica LOTO din OSHA 29 CFR 1910.147 și cu principiile de prevenire a pornirii neașteptate din ISO 14118. Nu reprezintă o procedură universală impusă de un singur standard; procedura organizației trebuie adaptată echipamentului și legislației aplicabile [152, 153].

Pentru energia electrică, pneumatică, hidraulică și alte forme de energie se identifică mijloacele de separare/izolare relevante și condițiile în care trebuie să fie accesibile sau blocabile. Configurația nu se presupune universal: proiectantul verifică standardele aplicabile, arhitectura utilităților, energia stocată și scenariile de mentenanță și documentează punctele de izolare în layout și instrucțiuni (Figura 9.14).

Energiile „ascunse” cer aceeași atenție ca alimentările evidente: arcuri preîncărcate, acumulatoare, elemente elastice și mase suspendate sub gravitație pot produce mișcare chiar după separarea sursei principale. Pentru o axă verticală se analizează explicit ce se întâmplă la pierderea energiei și la defectul elementului de reținere. Contragreutatea, frâna spring-applied/power-released, supapele de blocare sau reținerea mecanică pot face parte din soluție, dar efectul lor asupra capacității, mentenanței și defectelor trebuie demonstrat; nu se presupun procente universale de „pierdere de capacitate” sau siguranță absolută.

9.8.2 Procedura LOTO și rolul proiectantului

În practica OSHA, procedurile de control al energiei includ pregătirea, oprirea, izolarea, aplicarea dispozitivelor de lockout/tagout, disiparea sau restrângerea energiei stocate și verificarea izolării, urmate de o procedură controlată de revenire în serviciu. Numărul și denumirea pașilor pot varia în procedura organizației; proiectantul trebuie să asigure fizic puncte de izolare blocabile, mijloace de disipare și posibilitatea verificării stării fără energie.

Rolul proiectantului mecanic este să facă posibilă aplicarea sigură a procedurii prin elemente constructive concrete: (a) identificarea în documentație a surselor de energie și a poziției dispozitivelor de izolare; (b) dispozitive de izolare accesibile și adecvate mediului de mentenanță; (c) posibilitatea blocării cu lacăt/lockout acolo unde procedura o cere; (d) mijloace pentru disiparea sau reținerea energiei stocate, inclusiv purjare, descărcare și reținere mecanică pentru mase suspendate; (e) puncte și indicații care permit verificarea izolării fără expunerea tehnicianului la pericol. Detaliile se stabilesc pentru arhitectura și legislația aplicabile [152, 153].

În practică · LOTO pe axa verticală: proiectarea reținerii mecanice

O eroare frecventă este tratarea frânei motorului ca unic mijloc de protecție pentru lucrul sub o masă suspendată. Unele frâne sunt spring-applied/power-released și se aplică la pierderea tensiunii, dar capacitatea statică, uzura, diagnosticarea și destinația lor trebuie verificate. O frână de menținere nu devine automat dispozitiv de sprijin pentru accesul unei persoane sub sarcină.

Soluția de mentenanță se stabilește din evaluarea riscului: aducerea sarcinii într-o poziție stabilă, izolarea și blocarea surselor de energie, disiparea energiei reziduale și, când este necesar, utilizarea unei proptele, a unui pin/bolt de blocare sau a altui suport mecanic pozitiv. Măsura trebuie să poată fi aplicată și verificată fără expunerea tehnicianului la pericol.

Dimensiunea și costul dispozitivului depind de masă, geometrie, încărcări, frecvența intervențiilor și standardul de tip C. Proiectarea sa în faza de concept este preferabilă adăugării ulterioare, deoarece influențează accesul, structura și procedura de mentenanță.

9.8.3 Resetare manuală și repornire sigură

După declanșarea unei funcții de protecție, resetarea manuală trebuie să confirme că condițiile pentru rearmare sunt îndeplinite și nu trebuie să inițieze prin ea însăși o mișcare periculoasă. Poziția dispozitivului de reset se stabilește astfel încât operatorul să poată verifica zona sau se introduc măsuri echivalente pentru prevenirea prezenței nedetectate. Culoarea butonului nu trebuie prescrisă arbitrar; se aplică standardele de interfață și convențiile mașinii, iar comanda de pornire rămâne distinctă de resetare atunci când evaluarea riscului o cere.

În implementare, logica de resetare verifică eliminarea cauzei opririi și condițiile de rearmare definite pentru funcția de siguranță. Dispozitivul de reset se amplasează astfel încât să nu poată fi acționat din zona periculoasă atunci când aceasta trebuie supravegheată și, după caz, să permită verificarea vizuală a zonei sau să fie completat prin măsuri de detectare a prezenței. Resetarea restabilește disponibilitatea funcției; nu trebuie, prin ea însăși, să inițieze mișcarea periculoasă. Comanda de pornire este tratată separat atunci când evaluarea riscului o cere.

9.9 Aplicații robotice colaborative: ISO 10218:2025 și ISO/TS 15066

Aplicațiile robotice colaborative permit omului și robotului să lucreze într-un spațiu comun numai după evaluarea riscului întregii aplicații: robot, end-effector, piesă, proces, layout și comportament uman previzibil. În 2025 au fost publicate noile ediții ISO 10218-1 și ISO 10218-2; ISO/TS 15066:2016 rămâne, în septembrie 2026, o specificație tehnică publicată și o referință suplimentară pentru colaborare și date biomecanice, deși revizuirea sa este în curs. Siguranța nu rezultă din eticheta comercială «cobot», ci din integrarea și validarea aplicației [12, 13, 154].

9.9.1 Metode de operare colaborativă și măsuri de protecție

ISO 10218-1:2025 și ISO 10218-2:2025 tratează cerințele actuale pentru roboți industriali și aplicațiile/celulele robotice. Conceptele consacrate pentru colaborare includ monitored stop, hand guiding, speed and separation monitoring și power and force limiting. Ele trebuie privite ca metode de reducere a riscului și pot fi combinate pe faze ale ciclului, în funcție de aplicație.

Safety-rated monitored stop: robotul este adus într-o stare oprită monitorizată înainte ca persoana să intre în spațiul colaborativ relevant. Cerințele concrete privind oprirea, monitorizarea și reluarea funcționării se aleg din standard și din funcțiile safety certificate ale robotului/drive-ului; nu se presupune automat o anumită categorie de oprire.

Hand guiding: operatorul comandă mișcarea robotului printr-un dispozitiv de ghidare conceput pentru acest scop. Sunt necesare funcții adecvate de enabling/stop și limitarea mișcării conform aplicației. O limită fixă de 250 mm/s sau un anumit tip de senzor nu trebuie prezentate ca reguli universale fără referința normativă concretă.

Speed and separation monitoring: distanța, viteza robotului, viteza de apropiere a persoanei și timpul de oprire sunt combinate pentru menținerea separării protective. Câmpurile scanerului sau ale altui sistem de detecție trebuie dimensionate și validate din starea reală a robotului și a procesului, nu din raze fixe «verde/galben/roșu» universal aplicabile.

Power and force limiting (PFL): aplicația este proiectată astfel încât contactele previzibile să respecte limitele stabilite pentru regiunea corpului și tipul contactului (Figura 9.15). Evaluarea include masa efectivă, viteză, geometria sculei și piesei, posibilitatea de trapping și măsurători de forță/presiune cu dispozitive adecvate. Un robot industrial poate avea funcții PFL dacă este proiectat și certificat corespunzător; nu se deduce eligibilitatea doar din categoria comercială a robotului.

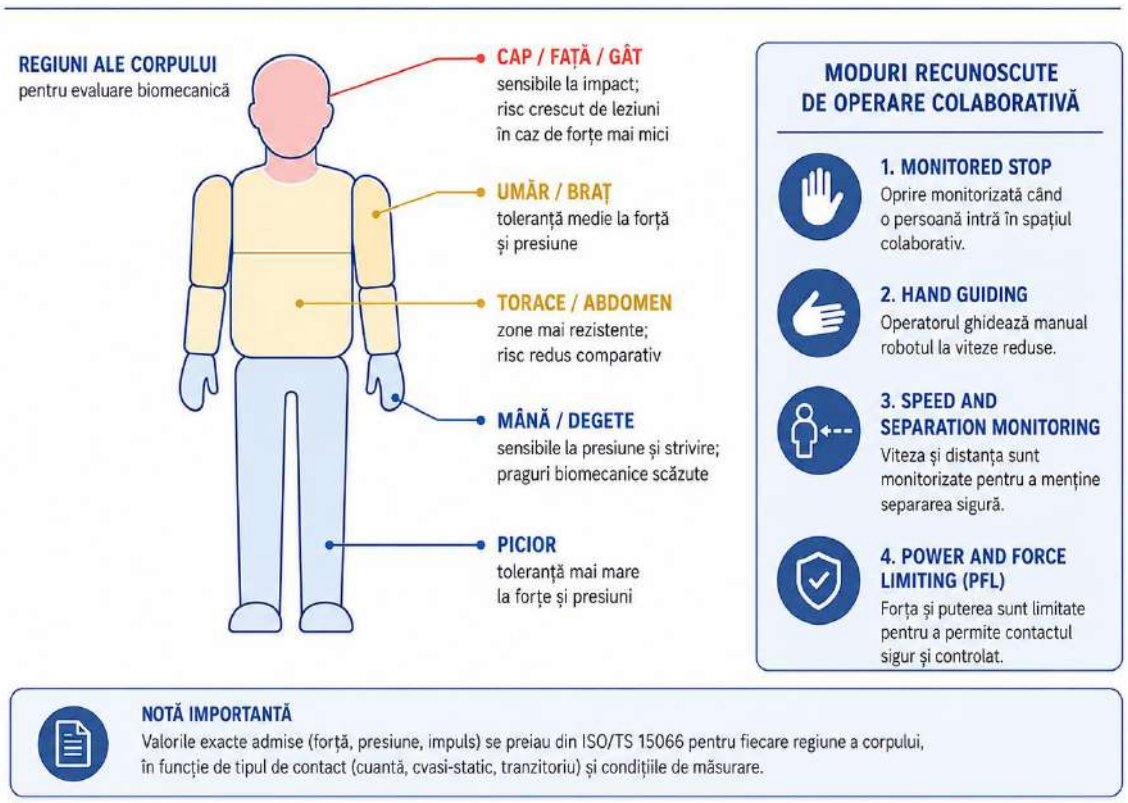


Figura 9.15. Regiuni corporale relevante pentru evaluarea Power and Force Limiting (PFL) conform ISO/TS 15066 și cele patru metode consacrate de operare colaborativă. Valorile biomecanice și combinația măsurilor se stabilesc pentru aplicația concretă și se validează experimental.

9.9.2 Power and Force Limiting: limite biomecanice și validare

Pentru PFL, ISO/TS 15066 furnizează date biomecanice diferențiate pe regiuni ale corpului și pe tipuri de contact. Aceste valori trebuie utilizate împreună cu metodologia și condițiile de măsurare; nu este corectă interpretarea lor ca o singură «forță de impact maximă» și nici echivalarea directă între energie cinetică și forță fără modelul de contact (Tabelul 9.5).

Tabelul 9.5. Parametrii care trebuie evaluați într-o aplicație PFL. Valorile biomecanice exacte și condițiile de măsurare se preiau din ISO/TS 15066 și din cerințele actuale ale aplicației.

Regiune / situație	Mărime de evaluat	Factor de proiectare	Observație
Cap / față / gât	Forță și presiune de contact	Evitarea contactului, suprafețe largi și rotunjite	Zone sensibile; valorile exacte se preiau din standardul aplicabil.
Torace / abdomen	Forță, presiune, trapping	Limitarea energiei și eliminarea punctelor de prindere	Contactul quasi-static poate fi mai critic decât impactul.
Brațe / mâini	Forță, presiune, muchii	Geometrie a sculei, raze, suprafață de contact	End-effectorul poate domina riscul, chiar dacă robotul este colaborativ.
Picioare	Forță, presiune, stabilitate	Traiectorii, distanțe și protecție la strivire	Se verifică inclusiv contactul cu piesa transportată.
Contact tranzitoriu	Forță/impuls și presiune	Viteză și masă efectivă reduse	Validare prin măsurare conform metodei aplicabile.

Regiune / situație	Mărime de evaluat	Factor de proiectare	Observație
Contact quasi-static	Forță și presiune susținută	Eliminarea trapping-ului și limitarea forței	Poate necesita limite mai restrictive.
Scule/piese	Muchii, temperatură, energie proprie	Protecții sau mod colaborativ condiționat	Certificarea robotului nu acoperă automat pericolele sculei/piesei.
Documentare	Rezultate măsurate și configurație	Trasabilitate la tool, payload, software și layout	Orice schimbare relevantă poate necesita revalidare.

Aplicarea practică are trei niveluri: proiectarea mecanică a robotului și end-effectorului pentru reducerea energiei și a presiunilor locale; funcțiile safety ale sistemului de control pentru limitarea și monitorizarea mișcării; validarea aplicației reale cu payload-ul, scula și traiectoriile utilizate. Masa suplimentară, geometriile rigide și punctele de trapping pot modifica radical rezultatul și trebuie reevaluate la orice schimbare de configurație.

9.9.3 Implicații constructive pentru aplicațiile colaborative

Adoptarea colaborării nu se reduce la cumpărarea unui robot declarat colaborativ. O aplicație cu gripper metalic, piesă cu muchii, proces termic sau altă unealtă periculoasă poate necesita separare, monitored stop sau SSM chiar dacă robotul de bază are funcții PFL. Alegerea metodei se face din evaluarea riscului și din măsurători, fără procente universale privind răspândirea unui mod de colaborare.

Deciziile constructive pentru o aplicație colaborativă privesc în primul rând end-effectorul și piesa: se reduc muchiile și punctele de trapping, masa și inerția inutile, se controlează orientarea sculei și se evită traiectoriile care transformă un contact într-o strivire. Vitezele, distanțele de separare și eventualele câmpuri ale scanerului se stabilesc prin evaluarea riscului și prin măsurători/validare pentru configurația reală. Dimensiuni precum raza muchiilor, lățimea suprafeței de contact sau o limită de viteză nu trebuie prezentate ca valori universale dacă standardul și aplicația nu le impun explicit.

> **În practică · Cobot sau robot industrial?**
> Comparația trebuie făcută la nivel de aplicație: frecvența interacțiunii om–robot, payload, viteză, pericolele sculei și piesei, spațiul disponibil, timpul de ciclu, complexitatea validării și mentenabilitatea. Uneori un robot industrial cu garduri și acces bine proiectat este mai productiv și mai simplu de validat; în alte cazuri, colaborarea reduce timpii de acces și flexibilizează linia.
> Nu există praguri universale de suprafață, volum anual, cost sau productivitate care să decidă alegerea. Decizia se documentează prin analiza de risc și analiza tehnico-economică a proiectului concret.

9.10 Hardware safety: controlere, senzori și actuatoare

O funcție de siguranță poate combina senzori/dispozitive de protecție, logică de siguranță, actuatoare și comunicații safety. Controlerele failsafe, releele sau modulele dedicate și protocoalele safety

sunt opțiuni de arhitectură, nu „trei categorii” normative de hardware. Numărul componentelor și topologia se stabilesc din funcțiile de siguranță, I/O, distribuție, diagnostic și cerințele de integrare.

9.10.1 Controlere cu funcții de siguranță integrate

Controlerele cu funcții de siguranță integrate permit implementarea programabilă a funcțiilor safety în aceeași platformă sau într-o platformă coordonată cu controlul standard. Separarea, diagnosticul, execuția redundantă și reacția la defect sunt implementate diferit între producători; proiectantul nu trebuie să presupună o arhitectură internă «două procesoare diversificate» ca regulă universală. Se utilizează certificatul, manualul safety și limitele de utilizare ale produsului.

În proiect se verifică nivelurile revendicate de producător (de exemplu SIL/PL), configurațiile I/O permise, timpii safety, reacțiile la defect, mecanismele de test, versiunile firmware și condițiile de diagnostic. Certificarea unui controler nu certifică automat funcția completă: senzorul, logica, actuarea, cablarea și software-ul aplicației trebuie integrate și validate ca sistem.

9.10.2 Componente utilizate în funcții de siguranță

Componentele utilizate într-o funcție de siguranță trebuie să aibă date și caracteristici adecvate metodei de proiectare folosite (Tabelul 9.6). Pentru multe produse există certificări și date de fiabilitate furnizate de producător, ceea ce simplifică demonstrația; totuși, nu orice element trebuie descris juridic ca «certificat individual de un organism notificat». Esențial este ca utilizarea, arhitectura și datele introduse în calcul să fie justificate și trasabile.

Tabelul 9.6. Exemple de componente utilizate în funcții de siguranță și date care trebuie verificate. PL/SIL nu este o proprietate a denumirii componentei; performanța funcției complete depinde de configurația concretă, integrare și validare, iar datele/certificările de produs se verifică pentru modelul utilizat [131, 145, 146, 148, 155–157].

Componenta	Standard	Parametru cheie	PL maxim atins
Buton E-Stop (ciuperca roșie)	ISO 13850:2015; IEC 60204-1	Configurație contacte, B10d/date safety, montaj	Depinde de arhitectura funcției
Light curtain tip 4	IEC 61496-1:2020 + IEC 61496-2:2020	Tip ESPE, rezoluție, timp răspuns, OSSD	Conform certificatului și integrării
Light curtain tip 2	IEC 61496-1:2020 + IEC 61496-2:2020	Tip ESPE, rezoluție, timp răspuns	Conform certificatului și integrării
Gardian interlocked Type 3	ISO 14119:2024	Fără contact, necodificat; măsuri anti-defeat	PL al funcției depinde de arhitectură
Gardian interlocked Type 4	ISO 14119:2024	Fără contact, codificat; nivel de codare	PL al funcției depinde de arhitectură
Scaner laser safety	IEC 61496-1:2020 + IEC 61496-3:2025	Câmpuri, rezoluție, timp răspuns, condiții de mediu	Conform certificatului și integrării
Contactor force-guided	IEC 60947-5-1:2024 / standarde de produs aplicabile	Contacte oglindă/ghidate, B10d/date producător	Conform arhitecturii și diagnosticului
Releu safety industrial standard	Standarde de produs și certificat safety aplicabil	PL/SIL revendicat, intrări/ieșiri, diagnostic	Conform configurației certificate

Componenta	Standard	Parametru cheie	PL maxim atins
Encoder safety (motion)	IEC 61800-5-2:2016 / certificat producător	Subfuncții motion safety și date PFH	Conform funcției și integrării

9.10.3 Comunicații safety: PROFIsafe, FSoE, CIP Safety, openSAFETY

Protocoalele de comunicație safety permit transportul informațiilor de siguranță printr-un canal de comunicație care nu este presupus sigur («black channel»). Mecanismele de detecție a erorilor (de exemplu coduri de control, numere de secvență, timere și identificatori) sunt definite de profilul concret. Ele protejează împotriva erorilor de comunicație relevante pentru funcțional safety, dar nu trebuie confundate cu autentificarea sau criptarea cybersecurity; acestea sunt tratate separat prin arhitectura IEC 62443 și tehnologiile de securitate adecvate [6, 121].

Alegerea comunicației safety se face în contextul ecosistemului de control și al dispozitivelor disponibile. PROFIsafe, FSoE, CIP Safety și alte profile au modele de integrare și ecosisteme diferite; selecția trebuie să considere compatibilitatea controler–I/O–drive, certificările, timpii necesari, topologia, mentenanța și standardul clientului. Geografia sau o afirmație de tip „protocol dominant” nu constituie singure criterii tehnice.

9.11 Verificarea și validarea funcțiilor de siguranță

Proiectarea funcțiilor de siguranță include definirea PLr/SIL necesar, arhitectura, componentele, logica și diagnosticul. Verificarea urmărește conformitatea rezultatului cu specificația și regulile de proiectare, iar validarea demonstrează că funcția implementată este adecvată utilizării și reducerii riscului prevăzute. Ambele sunt necesare; implementarea corectă a unei cerințe greșit definite nu demonstrează siguranța aplicației.

9.11.1 Dosarul de evaluare a riscului

Raportul de evaluare a riscului este o parte esențială a documentației tehnice. El trebuie să permită trasabilitatea dintre limitele mașinii, pericole, estimarea și evaluarea riscului, măsurile aplicate, riscul rezidual și funcțiile de siguranță rezultate. Forma și numărul de pagini nu sunt standardizate universal; calitatea se măsoară prin completitudine, justificare și legătura cu desenele, calculele și validarea.

9.11.2 Planul de validare, FAT și SAT

Validarea funcțiilor de siguranță se planifică din faza de proiectare și combină analiza documentară cu testele pe sistem, conform standardului aplicabil: pentru ISO 13849, în mod particular ISO 13849-2:2012, care rămâne ediția publicată curentă în 2026, cu o nouă ediție în dezvoltare. FAT și SAT sunt momente utile pentru executarea și documentarea testelor, dar validarea nu este definită exclusiv ca «SAT safety». Se verifică funcția, reacția la defecte relevante, resetarea/restartul, timpii de oprire și condițiile de mediu/operare prevăzute [158].

Măsurătorile critice, în special timpii de oprire utilizați la poziționarea protecțiilor, se realizează cu echipamente adecvate și trasabile metrologic. Neconformitățile descoperite la FAT/SAT conduc la corectarea soluției și repetarea testelor afectate. Protocolul trebuie să precizeze criteriul de acceptare, configurația testată, instrumentul și rezultatul, nu doar «pass/fail».

9.12 Tendințe: AI, cybersecurity și safety

AI/ML și cybersecurity influențează tot mai mult arhitectura mașinilor conectate. Regulamentul (UE) 2023/1230 tratează inclusiv anumite aspecte legate de software, comportament auto-evolutiv și protecția funcțiilor relevante pentru siguranță; AI Act stabilește separat cadrul juridic pentru sisteme AI, iar Cyber Resilience Act introduce cerințe de cybersecurity pentru produsele cu elemente digitale aflate în domeniul său. Aplicabilitatea și calendarul se verifică pentru produsul și rolul concret [143, 159].

9.12.1 AI și funcțiile de siguranță

Regulamentul (UE) 2023/1230 tratează explicit mașinile și componentele de siguranță cu comportament complet sau parțial auto-evolutiv. Anexa I, partea A, include componentele și sistemele cu machine learning care asigură funcții de siguranță, pentru care procedura de conformitate este mai strictă. Regulamentul nu impune însă textual o arhitectură universală «AI controller + F-CPU» pentru orice algoritm AI. Arhitectura trebuie să asigure că funcțiile de siguranță rămân determinate, verificabile și protejate de comportamentele necontrolate ale funcțiilor adaptive.

O arhitectură robustă poate separa funcția de optimizare/adaptare de limitele safety certificate, de exemplu printr-un strat safety independent care limitează viteza, poziția sau energia. Aceasta este o soluție de proiectare frecvent adecvată, dar trebuie formulată ca rezultat al evaluării riscului și al cerințelor funcției, nu ca obligație de marcă sau topologie. Pentru sisteme cu machine learning în funcții safety se analizează suplimentar trasabilitatea datelor, comportamentul în afara domeniului și controlul modificărilor modelului.

Pentru AI relevant safety este necesară o strategie de trasabilitate și management al configurației: versiunea modelului, datele/parametrii relevanți, limitele de operare și modificările trebuie documentate suficient pentru verificare și investigarea incidentelor. ISO/IEC TR 5469:2024 oferă îndrumare privind AI și functional safety. Nu se prescrie aici o perioadă universală de 5–10 ani pentru logurile AI; retenția se stabilește din legislația aplicabilă, politica organizației și necesitatea de trasabilitate [160].

9.12.2 Cybersecurity: Cyber Resilience Act și IEC 62443

Cybersecurity-ul a devenit o cerință de conformitate relevantă pentru numeroase produse conectate. Regulamentul (UE) 2024/2847 (Cyber Resilience Act) se aplică, în principal, de la 11 decembrie 2027, iar obligațiile de raportare din articolul 14 se aplică de la 11 septembrie 2026. CRA cere gestionarea vulnerabilităților pe o perioadă de suport determinată de utilizarea așteptată a produsului, cu un minim de cinci ani atunci când durata de utilizare nu este mai scurtă; include și întocmirea unui SBOM cel puțin pentru dependențele de nivel superior. Aceste cerințe trebuie analizate împreună cu domeniul Regulamentului pentru mașini și cu celelalte acte aplicabile [143].

Seria IEC 62443 este referința tehnică majoră pentru cybersecurity în sisteme industriale de automatizare și control. Security Level-urile descriu rezistența la clase crescătoare de capabilități ale atacatorului, însă un nivel țintă nu se alege prin regula «SL 2 minim pentru orice mașină». Se efectuează o evaluare a riscului cybersecurity și se stabilesc zone, conduits și cerințe de securitate potrivite activelor și amenințărilor.

Măsurile uzuale includ segmentarea rețelei și controlul fluxurilor între zone, gestionarea identităților și rolurilor, jurnalizare, hardening, managementul actualizărilor, backup/recovery, controlul accesului de service și utilizarea protocoalelor securizate acolo unde sunt disponibile. Criptarea sau TLS 1.3 nu

sunt posibile ori obligatorii pe toate magistralele și dispozitivele; cerința este reducerea riscului printr-o arhitectură coerentă și verificabilă.

> **În practică · Interfața cybersecurity–safety**
>
> Erorile de comunicație tratate de protocoalele funcțional-safety și atacurile intenționate sunt probleme diferite. Un protocol precum PROFIsafe, FSoE sau CIP Safety poate detecta anumite erori ale canalului fără ca acel canal să fie considerat sigur; aceasta nu echivalează automat cu autentificare, control al accesului sau criptare împotriva unui atacator.
>
> Proiectarea modernă trebuie să prevină ca un incident cyber să poată modifica parametri safety, firmware, logică sau diagnostice fără autorizare. Măsurile se stabilesc din evaluarea de risc și din IEC 62443, în coordonare cu cerințele Regulamentului pentru mașini și CRA.

9.13 Studiu de caz integrat: funcțiile de siguranță ale stației SAP

În această secțiune, configurația conceptuală SAP (tub–carcasă, presare Z electrică, fixare pneumatică CL1/CL2) este utilizată pentru a arăta cum se pornește de la identificarea pericolelor către specificația funcțiilor de siguranță (Figura 9.16). Tabelul 9.7 este un registru didactic preliminar, nu o evaluare de risc ISO 12100 completă. Nivelurile PLr, arhitectura SRP/CS, timpii de oprire, mijloacele de protecție și datele componentelor sunt încă de stabilit; nu se afirmă existența unui dosar CE ori a unui calcul SISTEMA verificat pentru această stație.



Figura 9.16. Arhitectură conceptuală a funcțiilor de siguranță pentru SAP: exemple de lanțuri funcționale pentru acces, fixarea pneumatică CL1/CL2 și oprirea de urgență. Starea sigură a axei verticale Z, măsurile pentru energia pneumatică și parametrii PLr/PL, timpii de oprire și validarea se stabilesc separat pentru fiecare funcție.

9.13.1 Evaluarea riscului: scenariu didactic

Pentru SAP de referință se examinează preliminar (Tabelul 9.7): (1) strivirea în zona de contact dintre poanson, tub și carcasă în timpul mișcării axei electrice Z; (2) prinderea la cilindrii pneumatici de fixare

CL1/CL2 și la eventualele mecanisme auxiliare; (3) pericolele electrice la alimentare, tabloul electric și intervenții; (4) evacuarea aerului și energia pneumatică reziduală; (5) eventualele substanțe de proces, numai dacă sunt prevăzute efectiv; (6) căderea ori deplasarea sculelor la mentenanță și energia stocată în axă. Aceasta este o listă de verificare, nu constatarea unor pericole cuantificate pe o mașină construită. Parametrii de risc și măsurile se stabilesc în documentația de proiect, inclusiv pentru utilizarea previzibilă și condițiile de defect.

Tabelul 9.7. Registru preliminar didactic al pericolelor pentru SAP de referință. Măsurile sunt propuneri de analizat; parametrii riscului, funcțiile de protecție și nivelurile PLr nu sunt încă determinați și validați.

Pericol	Situație periculoasă / factori de evaluat	Măsuri de analizat (ordine ISO 12100)	Statutul evaluării / dovezi lipsă
Presare Z electrică (ipoteză F_{max} = 8 kN)	Acces la zona poanson–tub–carcasă; expunere, severitate și posibilitate de evitare TBD	Analiza geometriei și a accesului; reducere intrinsecă; protecții și funcții safety de stabilit; E-STOP ca funcție complementară	PLr și reducerea riscului: TBD după evaluare și validare.
Fixare pneumatică CL1/CL2	Puncte de prindere, mișcări neașteptate și energie pneumatică reziduală	Geometrie de dispozitiv sigură; protecție/interblocare după caz; izolare și evacuare controlată a energiei	Reacția la pierderea aerului, funcțiile relevante și testele: TBD.
Energie electrică	Contact direct/indirect în operare și la mentenanță; alimentarea concretă încă TBD	Separare, protecție electrică și legare de protecție conform proiectului; acces și izolare la mentenanță	Încercări electrice și documentația de specialitate: TBD; nu se atribuie automat PL.
Evacuare aer / zgomot	Nivel sonor și jet de aer dependente de circuit, fără date măsurate	Silențiere, orientare evacuare, dimensionare și eventual evaluarea expunerii	Măsurare/verificare în condițiile proiectului: TBD; nu se atribuie automat PL.
Substanțe de proces (dacă există)	Lubrifiant, agent de curățare sau alt produs chimic numai dacă este utilizat efectiv	Identificare substanță; fișă cu date de securitate; substituție și control expunere după caz	Nu se presupune prezența substanței; evaluarea se face doar pentru procesul definit.
Schimbare sculă / mentenanță	Căderea sculei sau mișcarea neașteptată a axei Z; energie stocată	Reținere/susținere după caz; mijloace de izolare, verificarea absenței energiei, procedură sigură	Masa sculei, retenția, scenariile de defect și validarea: TBD.

9.13.2 Arhitectura safety propusă

Arhitectura conceptuală din Figura 9.16 pornește de la trei situații care necesită specificații distincte: accesul în zona de presare, prinderea la dispozitivele pneumatice CL1/CL2 și solicitarea opririi de urgență. Dispozitivele de protecție, controlerul și interfețele safety, elementele finale de comandă și feedback-ul se selectează prin evaluarea riscului și proiectare de detaliu. Pentru axa verticală Z, funcția STO singură nu asigură frânarea ori reținerea sarcinii gravitaționale; necesitatea și realizarea opririi controlate, a frânei sau a retenției mecanice se stabilesc și se verifică în proiect. La CL1/CL2, depresurizarea nu este declarată implicit stare sigură, deoarece poate genera deplasarea sau căderea piesei. Numărul

canalelor, categoria, PLr/PL, timpii de oprire, protecțiile și condițiile de reset/repunere în funcțiune rămân de definit și validat pentru fiecare funcție. Figura este o arhitectură de principiu, nu o schemă certificată sau de execuție.

9.13.3 Modelarea în SISTEMA: metodă și interpretare

Pentru o funcție de siguranță definită prin evaluarea riscului, SISTEMA poate modela lanțul senzor/dispozitiv de protecție–logică–element final folosind configurația și datele reale ale componentelor. Se introduc nivelul PLr cerut, arhitectura, MTTFd/B10d unde sunt aplicabile, DCavg și măsurile CCF; rezultatul și cerințele sistematice se verifică și funcția completă se validează conform standardelor aplicabile. În lipsa proiectului electric final și a evaluării de risc pentru SAP, nu atribuim nici PLr, nici PL atins, nici o valoare PFHd stației conceptuale.

> **În practică · Lecția studiului de caz SAP**
>
> Cea mai valoroasă intervenție a proiectantului este reducerea riscului la sursă: forță și cursă limitate la necesarul procesului, eliminarea accesului la puncte de strivire, stabilitate mecanică și layout care favorizează protecțiile. Abia apoi se dimensionează SRP/CS.
>
> Nu se atribuie economii fixe sau un anumit PL doar pentru că s-a redus forța de presare. Efectul asupra PLr se reevaluează prin parametrii de risc, iar costul hardware se calculează din BOM-ul real.

9.14 Probleme propuse cu răspunsuri

Cele patru probleme de mai jos consolidează conceptele tratate în capitol prin aplicare pe situații reprezentative din proiectarea echipamentelor de fabricație. Sunt structurate gradual: prima problemă exersează metoda ISO 13855 pentru poziționarea unei perdele optice, a doua aplică graful de risc S–F–P pentru selectarea PLr, a treia tratează definirea stării sigure pentru o axă verticală, iar a patra integrează mai multe subteme într-un scenariu didactic de aplicație robotizată colaborativă.

Problema 9.1. Poziționarea unei perdele optice la o presă pneumatică

Enunț.

Să se determine, ca exercițiu didactic, distanța de separare pentru o perdea optică verticală la o presă, dacă timpul total de oprire măsurat este T = 0,220 s. Pentru geometria aleasă se presupune, după consultarea metodei ISO 13855:2024, K = 2000 mm/s și C = 0 mm. Se va discuta și necesitatea verificării reach-over și a timpului real de oprire.

Rezolvare.

Pentru ipotezele exercițiului: S = K·T + C = 2000 × 0,220 + 0 = 440 mm. Se adoptă o valoare de proiectare mai mare numai dacă rezultă din toleranțe, măsurarea timpului, cerințe geometrice suplimentare sau politica de proiect; nu se aplică un «factor de siguranță 1,15» ca regulă normativă universală. La validare se măsoară timpul de oprire și se recalculează distanța cu metoda ISO 13855:2024 aplicabilă.

- S: distanța de separare rezultată pentru cazul și geometria analizate [mm].
- K: termenul de viteză de apropiere selectat din metoda ISO 13855:2024 aplicabilă. În acest exercițiu didactic se utilizează K = 2000 mm/s, conform ipotezei enunțate.

- T: timpul total relevant al funcției de protecție și al opririi mașinii; în exercițiu T = 0,220 s, iar în validare se folosește valoarea măsurată în condiția cea mai defavorabilă.
- C: termenul suplimentar asociat intruziunii/penetrării și geometriei dispozitivului. În exercițiu C = 0 mm este o ipoteză explicită; proiectul real trebuie verificat cu condițiile, tabelele și verificările suplimentare din ISO 13855:2024, inclusiv reach-over atunci când este posibil.

Problema 9.2. Determinarea PLr pentru o zonă de presare ergonomică

Enunț.

O stație de asamblare prin presare manuală cere operatorului să introducă componente în zona de acționare a unui cilindru pneumatic cu forță 5 kN, cursa 50 mm, viteza maximă 200 mm/s. Operatorul execută aproximativ 240 cicluri pe oră (un ciclu la 15 secunde), cu introducerea mâinii în zonă la fiecare ciclu. Să se determine PLr pentru funcția de siguranță care trebuie să prevină închiderea presei cu mâna operatorului în zonă.

Rezolvare.

Aplicăm risk graph-ul ISO 13849-1, documentând separat severitatea S, frecvența/durata expunerii F și posibilitatea de evitare P. Forța de 5 kN și cursa de 50 mm indică un pericol de strivire sever, dar energia cinetică nu se calculează ca F×cursă. Parametrul P nu se stabilește numai dintr-un prag de 250 mm/s; se analizează viteza, accelerația, avertizarea, spațiul de retragere și posibilitatea reală de evitare. Într-o configurație cu expunere la fiecare ciclu și strivire severă, rezultatul poate conduce la PLr d sau e, în funcție de justificarea lui P și de standardul de tip C.

- Severitate (S): se analizează consecința posibilă a strivirii produse de forța de 5 kN, cursa de 50 mm și geometria sculei. Pentru o mână/degete prinse între elemente rigide, o clasificare S2 poate fi justificată; argumentul se documentează prin consecința leziunii, nu prin produsul forță × cursă prezentat drept energie cinetică.
- Frecvență/durată a expunerii (F): accesul mâinii la fiecare ciclu indică o expunere frecventă. Încadrarea F1/F2 se justifică folosind definițiile și notele ediției aplicabile ISO 13849-1 și, dacă există, standardul de tip C al presei; nu se introduce un prag universal de „10 expuneri/oră”.
- Posibilitate de evitare (P): se analizează viteza și accelerarea mișcării, avertizarea, vizibilitatea, spațiul de retragere și caracterul previzibil al pornirii. Viteza de 200 mm/s este o informație relevantă, dar nu determină singură P1 sau P2 printr-un prag universal de 250 mm/s.

Scenariul se documentează în risk graph. Pentru ipoteze justificate de tip S2 + F2 + P1, rezultatul orientativ este PLr d; dacă posibilitatea de evitare trebuie apreciată P2, rezultatul devine PLr e. Standardul de tip C, dacă există pentru mașina respectivă, are prioritate pentru cerințe specifice.

Măsura de reducere a riscului se alege după ierarhia ISO 12100. O comandă bimanuală conform ISO 13851 este o măsură de protecție/safeguarding și trebuie ea însăși proiectată la nivelul de performanță cerut; nu este o metodă de a „coborî” automat PLr prin schimbarea artificială a parametrului P [161].

Problema 9.3. Proiectarea fail-safe state pentru o axă verticală pneumatică

Enunț.

O axă verticală acționată pneumatic ridică și coboară o sculă de presare cu masa de 12 kg (greutate 118 N). Cilindrul pneumatic are diametru 50 mm (secțiune 19,6 cm^2) și lungime cursă 200 mm.

Tehnicieni intervin săptămânal pentru schimbarea sculei la nivelul de jos al axei. Să se proiecteze fail-safe state corect pentru această axă, considerând toate scenariile de defectare.

Rezolvare.

Identificăm scenariile de defectare și starea sigură asociată fiecăruia:

- Scenariul 1. Pierderea alimentării electrice: comportamentul rezultat depinde de arhitectura valvei, a frânei/reținerii și de poziția sarcinii. O valvă cu poziție de bază trebuie aleasă astfel încât trecerea fără energie să nu genereze un pericol nou; pentru o sarcină verticală, simpla închidere a căilor pneumatice nu constituie singură o garanție de reținere pe termen nelimitat.
- Scenariul 2. Pierderea alimentării pneumatice: dacă arhitectura nu include reținere adecvată, sarcina poate coborî sub gravitație. Ca limită didactică, pentru o cădere liberă idealizată pe 0,20 m, o masă de 12 kg ar ajunge la aproximativ 2 m/s și 24 J; sistemul real va avea frecări și restricții, dar acestea nu trebuie creditate ca funcții de siguranță fără justificare și validare.
- Scenariul 3. Defect al distribuitorului sau al elementului de comandă: se analizează dacă defectul poate provoca coborârea necomandată. Detectarea, redundanța, blocarea sarcinii și arhitectura SRP/CS se stabilesc din PLr; un simplu senzor conectat la PLC-ul standard nu este, prin el însuși, o măsură safety suficientă.

Decizia constructivă trebuie să separe operarea de mentenanță. În operare, axa are nevoie de o soluție de menținere a sarcinii la pierderea energiei (de exemplu valvă de blocare/counterbalance ori frână adecvată). Pentru intervenții sub sarcină, izolarea energiei trebuie completată cu o măsură mecanică pozitivă (proptea, pin sau suport) atunci când evaluarea riscului o cere. Un acumulator pneumatic care menține presiunea nu este substitut pentru izolarea LOTO.

Soluția de proiect se documentează prin procedura de izolare: oprire normală, separarea și blocarea sursei pneumatice, disiparea controlată a presiunii, aducerea sarcinii într-o poziție stabilă și aplicarea dispozitivului mecanic de reținere înainte de acces. Costul unei asemenea măsuri nu este universal și nu se folosește ca argument normativ.

Recomandare de proiect: pe schemele cu axe verticale se indică explicit punctele de izolare, dispozitivele de reținere mecanică utilizate la mentenanță și secvența de aducere într-o stare stabilă înainte de acces. Documentația pentru utilizator trebuie să descrie măsurile necesare pentru eliminarea sau controlul energiei stocate și al sarcinilor suspendate, în acord cu evaluarea riscului și cerințele legale aplicabile.

Problema 9.4. Selecția modului colaborativ pentru o aplicație robotizată colaborativă de paletizare

Enunț.

Să se decidă modul colaborativ ISO 10218 + ISO/TS 15066 corect pentru următoarea aplicație: cobot 10 kg sarcină utilă + gripper pneumatic cu două degete metalice (greutate 1,2 kg, vârfuri rotunjite raza 3 mm) ridică și paletizează cutii de carton (1,5 kg fiecare). Operatorul interacționează cu cobotul de aproximativ 12 ori/oră pentru alimentarea cu cutii goale la intrarea zonei și descărcarea paleților plini la ieșirea zonei. Viteza maximă a cobotului în operare automată este 1,2 m/s.

Rezolvare.

Analiza aplicației nu se poate reduce la energia cinetică totală și la o formulă simplificată de «forță de impact». Se identifică punctele de trapping, regiunile corpului expuse, masa efectivă în direcția contactului, geometria degetelor gripperului și piesei, viteza și timpul de oprire. Pentru PFL, conformitatea

se verifică prin metoda de măsurare și limitele aplicabile; pentru SSM, separarea se calculează din poziția și viteza persoanei/robotului și performanța sistemului de detecție.

- Date necesare pentru PFL: masa efectivă a ansamblului pe direcția posibilului contact, viteza și accelerația, geometria gripperului și a piesei, regiunea corpului expusă și posibilitatea de trapping. Masa nominală a robotului nu se însumează simplu cu sarcina utilă pentru a obține masa efectivă de impact.
- Date necesare pentru SSM: poziția și viteza robotului, viteza de apropiere a persoanei, incertitudinile sistemului de detectare, timpul de reacție și distanța reală de oprire. Separarea protectivă se calculează pentru configurația reală și se validează experimental.
- Decizia privind PFL nu se poate lua dintr-o relație simplificată energie–forță și nici dintr-o singură limită de forță. Se folosesc limitele și metodologia aplicabile contactului respectiv, iar măsurarea se realizează cu echipamente și proceduri adecvate. Până la demonstrarea conformității PFL, aplicația cu gripper metalic și viteză ridicată trebuie tratată conservator.

Pentru această aplicație, gripperul metalic și viteza de 1,2 m/s fac prudentă alegerea unei strategii de speed and separation monitoring sau a unei celule hibride, până când măsurătorile PFL demonstrează contrariul. Zonele și vitezele nu se fixează la raze universale de 1,5 m/0,5 m sau la 250 mm/s; ele se calculează din configurația reală, timpul de oprire și caracteristicile sistemului de detecție.

Pentru accesul periodic al operatorului, o soluție posibilă este speed and separation monitoring: sistemul reduce viteza și, dacă separarea protectivă nu mai poate fi menținută, comandă starea sigură. Numărul zonelor, limitele de viteză și distanțele nu se preiau dintr-o schemă universală „verde/galben/roșu”; ele rezultă din calculul și validarea aplicației și din performanța funcției de siguranță.

Verificările suplimentare includ: geometria gripperului și existența muchiilor/punctelor de trapping; comportamentul piesei transportate la pierderea prinderii; toate traiectoriile și configurațiile robotului; accesul persoanei și posibilitatea de ocolire a câmpurilor de detectare; timpii reali de oprire. Raza muchiilor sau masa redusă a piesei pot ajuta la reducerea riscului, dar nu conferă automat conformitate PFL.

Comparația cu o celulă gardată se face printr-o analiză tehnico-economică pe date reale: timp de ciclu, frecvența accesului operatorului, cost de integrare, spațiu, mentenanță și efort de validare. Nu se atribuie costuri, procente de productivitate sau perioade de amortizare universale.

9.15 Concepte cheie și întrebări de reflecție

9.15.1 Recapitulare: conceptele de bază

- Marcajul CE se aplică produselor din domeniul legislației UE relevante; pentru mașini, Directiva 2006/42/CE este înlocuită de Regulamentul (UE) 2023/1230 de la 20 ianuarie 2027. Procedura de conformitate depinde de categoria mașinii și de legislația aplicabilă.
- Evaluarea și reducerea riscului conform ISO 12100 sunt iterative: se stabilesc limitele mașinii, se identifică pericolele, se estimează și se evaluează riscurile, apoi se aplică metoda în trei trepte (proiectare intrinsec sigură, protecții/safeguarding, informații pentru utilizator) până când riscul rezidual este justificat.

- Performance Level conform ISO 13849-1 are nivelurile a–e și intervale PFH definite; PLr se stabilește prin evaluarea riscului și standardul de tip C, iar PL atins se demonstrează prin arhitectură, fiabilitate, diagnostic, CCF și cerințe sistematice.
- Categoriile B, 1, 2, 3 și 4 descriu comportamentul arhitectural la defecte. Categoria singură nu determină PL; rezultatul depinde și de MTTFd, DCavg, CCF și cerințele sistematice/software.
- Categoriile de oprire IEC 60204-1 descriu modul de oprire: Cat. 0, îndepărtarea imediată a energiei, fără control al opririi; Cat. 1, oprire controlată urmată de îndepărtarea energiei; Cat. 2, oprire controlată cu energia menținută. Alegerea rezultă din funcție și evaluarea riscului.
- Starea sigură se definește pentru fiecare actuator din consecința pericolului, nu dintr-o rețetă universală. La pneumatică/hidraulică se analizează evacuarea, blocarea și reținerea sarcinii; la acționări electrice se combină funcțiile de drive certificate (de exemplu STO/SS1/SBC, după caz) cu frâne sau rețineri mecanice. Pentru axe verticale și sarcini suspendate se evaluează explicit efectul gravitației și măsurile necesare pentru mentenanță/LOTO.
- Poziționarea protecțiilor se realizează conform ISO 13855:2024, folosind metoda specifică dispozitivului și geometriei. Timpul de oprire se verifică pe mașină reală; K, C și celelalte condiții nu sunt valori universale.
- Protecțiile fixe și mobile se proiectează conform ISO 14120, iar distanțele pentru prevenirea accesului la zone periculoase se verifică în ISO 13857:2019 pentru geometria reală: reach-through, reach-over, acces al membrelor inferioare și alte căi previzibile. Valorile tabelare nu se înlocuiesc cu o regulă antropometrică unică.
- ISO 14118:2017 tratează prevenirea pornirii neașteptate și izolarea energiilor; LOTO este termenul procedural consacrat în special de OSHA. Proiectarea trebuie să permită izolare, blocare, disipare/reținere și verificare.
- Aplicațiile robotice colaborative se proiectează conform ISO 10218-1/-2:2025, cu ISO/TS 15066 ca referință suplimentară. Colaborarea este proprietatea aplicației integrate, nu a etichetei comerciale a robotului.
- Hardware safety: controlerele, senzorii, elementele finale și comunicațiile trebuie selectate din datele certificate și integrate pentru funcția concretă. Certificarea unei componente nu conferă automat PL/SIL întregii funcții.
- AI relevant pentru siguranță trebuie tratat prin arhitectură verificabilă și managementul schimbării; Regulamentul (UE) 2023/1230 impune cerințe speciale pentru sisteme auto-evolutive care asigură funcții safety. CRA introduce obligații cybersecurity etapizat din 2026/2027; IEC 62443 oferă cadrul tehnic, fără un SL minim universal.

9.15.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipa; răspunsurile sintetice apar după fiecare întrebare.

Q1. De ce se aplică ierarhia ISO 12100 în ordinea proiectare intrinsec sigură → protecții/safeguarding → informații pentru utilizator? Pentru că prima treaptă urmărește eliminarea sau reducerea pericolului la sursă; protecțiile tratează riscul rezidual, iar informațiile pentru utilizator tratează ceea ce nu a putut fi redus suficient prin primele două trepte. Evaluarea se reia iterativ și justifică măsurile rămase.

Q2. Ce risc suplimentar trebuie analizat la o oprire de categoria 2? Energia rămâne disponibilă pentru actuatoare după oprirea controlată, deci menținerea stării oprite depinde de funcțiile care o

monitorizează. Categoria 2 nu este „interzisă la PL d/e” printr-o regulă universală; se utilizează numai când funcția, standardul aplicabil și evaluarea riscului justifică păstrarea energiei. Pentru funcția de oprire de urgență se aplică cerințele specifice ISO 13850 și IEC 60204-1.

Q3. Este suficientă frâna motorului pentru reținerea unei axe verticale în timpul mentenanței? Nu se presupune automat. Unele frâne sunt spring-applied/power-released și se aplică la pierderea tensiunii, dar capacitatea, uzura, diagnosticarea și destinația lor trebuie verificate. Pentru acces sub o sarcină suspendată, evaluarea riscului poate impune o reținere mecanică pozitivă și o procedură de izolare independentă de comanda normală.

Q4. Cum alegem între speed and separation monitoring și power and force limiting într-o aplicație colaborativă? Se analizează procesul complet: end-effector, piesă, trapping, masa efectivă, viteza, zonele corpului, frecvența accesului și timpul de oprire. PFL este acceptabil numai dacă măsurătorile și condițiile de contact respectă limitele aplicabile; SSM este util când separarea poate fi măsurată și menținută. Nu există o viteză sau o rază universală care decide alegerea.

Q5. De ce un PL e demonstrat pentru o funcție de siguranță nu elimină necesitatea măsurilor mecanice la mentenanță? PL caracterizează performanța funcției SRP/CS în condițiile și arhitectura evaluate; nu transformă sistemul într-o protecție absolută și nu înlocuiește controlul energiei stocate, izolarea sau reținerea sarcinilor. Dacă accesul pentru mentenanță expune persoana la o masă suspendată ori la energie reziduală, măsurile LOTO și reținerea mecanică se stabilesc separat din evaluarea riscului.

Q6. Cum se tratează AI/ML atunci când poate influența o funcție relevantă pentru siguranță? Se definește o arhitectură verificabilă care împiedică modificările necontrolate să compromită funcția de siguranță. Regulamentul (UE) 2023/1230 conține cerințe speciale pentru componente/sisteme cu comportament auto-evolutiv care asigură funcții de siguranță. Separarea sau supravegherea printr-un strat safety independent poate fi o soluție de arhitectură, dar nu este o topologie unică obligatorie pentru orice utilizare a AI.

Q7. De ce este util SISTEMA în proiectarea conform ISO 13849-1? Pentru că structurează funcția de siguranță, subsistemele și datele de fiabilitate/diagnostic și generează un raport reproductibil al evaluării PL. Utilitatea sa depinde de calitatea datelor introduse și de modelarea corectă a arhitecturii; raportul nu conferă automat conformitate juridică și nu înlocuiește validarea conform ISO 13849-2 și responsabilitatea proiectantului.

10 Documentația tehnică și marcajul CE

Documentația tehnică, declarația UE de conformitate, standarde armonizate, ECAD/MCAD

Despre acest capitol

Echipamentul de fabricație proiectat în Capitolele 2–9 trebuie să fie susținut de o demonstrație documentată a conformității. Capitolul 10 tratează documentația tehnică din Anexa IV a Regulamentului (UE) 2023/1230, declarația UE de conformitate din Anexa V, utilizarea standardelor armonizate, integrarea ECAD/MCAD și furnizarea informațiilor în format digital.

O atenție specială este acordată diferenței dintre cerințele juridice și structurile interne de proiect: gruparea A–G și fluxul în 10 pași sunt instrumente didactice de management, nu structuri impuse textual de regulament. Capitolul se încheie cu un studiu de caz SAP și un exemplu de declarație pentru o livrare ulterioară datei de 20 ianuarie 2027.

Standarde și referințe normative aplicabile

Regulamentul (UE) 2023/1230: Anexa III (EHSR), Anexa IV (documentație tehnică), Anexa V (declarații), Anexa I/art. 25 (evaluarea conformității).

ISO 12100:2010; ISO 13849-1:2023; IEC 62061: evaluarea riscului și funcțiile de comandă legate de siguranță.

IEC 60204-1:2016+A1:2021, echipamentul electric al mașinilor.

ISO 13855:2024; ISO 13857:2019; ISO 14119:2024; ISO 14120:2015, protecții, interblocări și distanțe.

IEC 61082-1:2014; IEC 81346-1:2022, documente electrotehnice și identificare de referință.

IEC/IEEE 82079-1:2019, informații de utilizare.

ISO 16092-2:2019 / ISO 16092-3:2017, exemple Tip C pentru prese mecanice/hidraulice.

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să explice rolul documentației tehnice și responsabilitățile producătorului în procesul de marcare CE;
- să structureze dosarul tehnic al unui echipament de fabricație;
- să redacteze și să verifice o declarație UE de conformitate;
- să utilizeze ierarhia standardelor armonizate A / B / C pentru a demonstra prezumția de conformitate;
- să planifice procesul integrat de pregătire a marcajului CE, inclusiv cerințele pentru documentația digitală din Regulamentul (UE) 2023/1230.

Cunoștințe prealabile

Se presupun cunoscute cadrul legal și evaluarea riscului din Capitolul 9, precum și documentația de proiectare produsă în Capitolele 2–8.

Glosar de termeni și acronime

Acronimele și termenii tehnici utilizați pe parcursul capitolului sunt definiți la prima apariție și recapitulați în tabelul de mai jos pentru consultare rapidă.

Termen	Definiție
Caiet de sarcini (Lastenheft)	Documentul redactat de beneficiar care definește ce trebuie realizat: cerințele funcționale și non-funcționale, independent de soluție; bază pentru ofertă și acceptare (în germană, Lastenheft).
Dosar tehnic	Ansamblul informațiilor care demonstrează conformitatea. În Regulamentul (UE) 2023/1230, conținutul legal este în Anexa IV, Partea A; gruparea A–G din capitol este didactică. Păstrare: cel puțin 10 ani conform obligațiilor producătorului.
Specificație tehnică de realizare (Pflichtenheft)	Răspunsul tehnic al furnizorului la caietul de sarcini: descrie cum va fi satisfăcută fiecare cerință, arhitectură, componente, calcule, interfețe, parametri și metode de verificare (în germană, Pflichtenheft).
Technical File	Termen utilizat curent în industrie pentru documentația tehnică; în Regulamentul (UE) 2023/1230 se utilizează noțiunea de technical documentation.
DoC	Declarația UE de conformitate (EU Declaration of Conformity): modelul pentru mașini/produse asociate este în Anexa V, Partea A și conține 10 elemente, unele condiționale.
EHSR	Essential Health and Safety Requirements, cerințele esențiale de sănătate și securitate din Anexa III a Regulamentului (UE) 2023/1230.
Anexa IV	Anexa Regulamentului (UE) 2023/1230 privind documentația tehnică: Partea A pentru mașini și produse asociate, Partea B pentru mașini parțial finalizate. Nu este lista categoriilor cu risc ridicat.
Notified Body	Organism notificat desemnat pentru procedurile de evaluare a conformității pentru care legislația prevede intervenție terță. Necesitatea implicării sale se stabilește conform art. 25 și Anexei I.
Marcaj CE	Marcaj prin care producătorul indică faptul că produsul este conform cu cerințele aplicabile ale legislației de armonizare a Uniunii care prevede aplicarea sa.

Termen	Definiție
Standarde armonizate	Standarde ale căror referințe sunt publicate în Jurnalul Oficial al UE; aplicarea lor poate conferi prezumția de conformitate pentru cerințele acoperite.
Standard Tip A	Standard de bază pentru concepte, principii de proiectare și aspecte generale; ISO 12100 este reperul fundamental pentru evaluarea și reducerea riscului la mașini.
Standard Tip B	Standard generic care tratează un aspect de siguranță sau un tip de mijloc/dispozitiv de protecție aplicabil mai multor categorii de mașini.
Standard Tip C	Standard cu cerințe de siguranță pentru o categorie specifică de mașini; are prioritate pentru aspectele tratate atunci când cerințele sale diferă de cele Tip A/B.
OJEU / JOUE	Official Journal of the European Union / Jurnalul Oficial al UE, publicație oficială unde apar legislația și referințele standardelor armonizate.
EPLAN Electric P8	Platformă ECAD orientată pe date; poate genera scheme și rapoarte precum BOM, liste de dispozitive, diagrame de borne și liste de cabluri, în funcție de configurarea proiectului.
BOM	Bill of Materials: listă structurată de materiale/componente pentru configurația controlată; conținutul și nivelul de detaliu depind de procesul organizației.
ECAD	Electrical Computer-Aided Design, software pentru proiectarea și gestionarea documentației electrotehnice; complementar, nu alternativ în sens funcțional, față de MCAD.
MCAD	Mechanical Computer-Aided Design, software pentru modelare/proiectare mecanică 3D și generarea desenelor/BOM-urilor mecanice; poate fi integrat cu ECAD și PDM/PLM.
IEC 81346	Serie de standarde pentru structurarea sistemelor și desemnările de referință; nu se reduce la o listă universală de litere K, KM, F, S.
IEC 82079-1	IEC/IEEE 82079-1:2019, principii și cerințe generale pentru pregătirea informațiilor de utilizare ale produselor.
ISO 7010	ISO 7010:2019, semne de securitate înregistrate; ediția are amendamente publicate, inclusiv Amd 11:2026 la data auditului. Se verifică simbolul și amendamentele aplicabile, nu se tratează standardul ca o listă generică de „pictograme de avertizare”.
Documentație digitală	Furnizarea digitală a instrucțiunilor/informațiilor și, după caz, a declarației, în condițiile Regulamentului (UE) 2023/1230 privind accesul, descărcarea/tipărirea și disponibilitatea în timp.
DPP	Digital Product Passport, infrastructură de informații introdusă prin ESPR și acte sectoriale/delegate pentru grupuri de produse; nu este automat obligatorie pentru toate mașinile industriale în 2026.
SAT	Site Acceptance Test, verificări/acceptanță după instalarea la client; nu definește prin el însuși momentul juridic al introducerii pe piață.
FAT	Factory Acceptance Test, verificări/acceptanță efectuate la producător; utile contractual și ca dovezi de verificare, fără a reprezenta o secțiune juridică obligatorie a Anexei IV.
QMS	Quality Management System, sistemul de management al calității organizației; poate include controlul documentelor, aprobările, arhivarea și trasabilitatea declarațiilor și a dosarelor.
Auto-certificare	Formulare informală pentru situațiile în care procedura aplicabilă permite controlul intern al producției; eligibilitatea se stabilește conform art. 25 și Anexei I, nu printr-un procent general de piață.
Third-party assessment	Evaluare a conformității cu implicarea unui organism notificat, atunci când procedura prevăzută de legislație o cere.

Termen	Definiție
IQ / OQ / PQ	Installation Qualification / Operațional Qualification / Performance Qualification, protocoale utilizate în calificarea/validarea echipamentelor în contexte reglementate, atunci când sunt cerute de proces, QMS/GMP sau specificațiile proiectului.
GMP	Good Manufacturing Practice, cerințe și practici de bună fabricație pentru domenii reglementate; impactul asupra calificării și documentației echipamentului se stabilește în contextul procesului.
FDA	U.S. Food and Drug Administration, agenția americană de reglementare alimentară și farmaceutică; cerințe specifice pentru echipamente livrate în piața SUA.
UKCA	Regim de marcare/conformitate pentru piața Regatului Unit, supus regulilor britanice în vigoare la data introducerii pe piață; nu trebuie tratat ca un simplu „echivalent funcțional” universal al CE.
Reg. 2023/1230	Regulamentul (UE) 2023/1230 privind mașinile; se aplică, în principal, de la 20 ianuarie 2027 și înlocuiește Directiva 2006/42/CE.
EUR-Lex	Baza de date oficială a UE: legislație, jurisprudență, hotărâri; accesibilă gratuit la eur-lex.europa.eu; cuprinde și lista standardelor armonizate cu referință în OJEU.

Harta capitolului

Parcursul capitolului: §10.1 Documentația tehnică, rol și responsabilități; §10.2 Structurarea practică a documentației tehnice, corespondența cu Anexa IV; §10.3 Declarația UE de conformitate; §10.4 Standardele armonizate, ierarhia A / B / C; §10.5 Instrumente de proiectare și automatizarea documentației; §10.6 Documentația digitală, Regulamentul (UE) 2023/1230; §10.7 Proces integrat pentru pregătirea marcajului CE; §10.8 Studiu de caz didactic, documentația tehnică pentru stația SAP; §10.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție.

10.1 Documentația tehnică: rol și responsabilități

Capitolul 9 a tratat cadrul legal al siguranței mașinilor și proiectarea funcțiilor de siguranță. Capitolul de față mută accentul de la proiectarea sigură la demonstrarea documentată a conformității. Pentru produsele introduse pe piață înainte de 20 ianuarie 2027 rămâne relevantă Directiva 2006/42/CE; de la 20 ianuarie 2027 se aplică Regulamentul (UE) 2023/1230. În noul regulament, cerințele esențiale de sănătate și securitate sunt în Anexa III, documentația tehnică este definită în Anexa IV, iar declarația UE de conformitate în Anexa V [28, 31].

Capitolul este structurat în șase registre: (1) documentația tehnică, conținutul legal din Anexa IV și o structurare internă, didactică, pentru gestionarea proiectului; (2) declarația UE de conformitate, conținutul cerut de Anexa V; (3) standardele armonizate, ierarhia Tip A/B/C și prezumția de conformitate pentru cerințele acoperite; (4) instrumentele ECAD/MCAD și managementul datelor inginerești; (5) documentația digitală permisă de Regulamentul (UE) 2023/1230 și relația sa cu inițiativele de tip Digital Product Passport; (6) un flux integrat, didactic, pentru pregătirea marcajului CE. Structura A–G utilizată în continuare este o convenție de lucru a acestui manual, nu o împărțire juridică impusă de Anexa IV.

Capitolul se încheie cu un studiu de caz didactic pentru stația SAP și cu un exemplu de structurare a unei declarații UE de conformitate. Scopul este ca proiectantul să poată organiza dovezile tehnice produse pe parcursul proiectării, să identifice documentele cerute de legislația aplicabilă și să pregătească un pachet coerent pentru introducerea pe piață sau punerea în funcțiune (Figura 10.1).

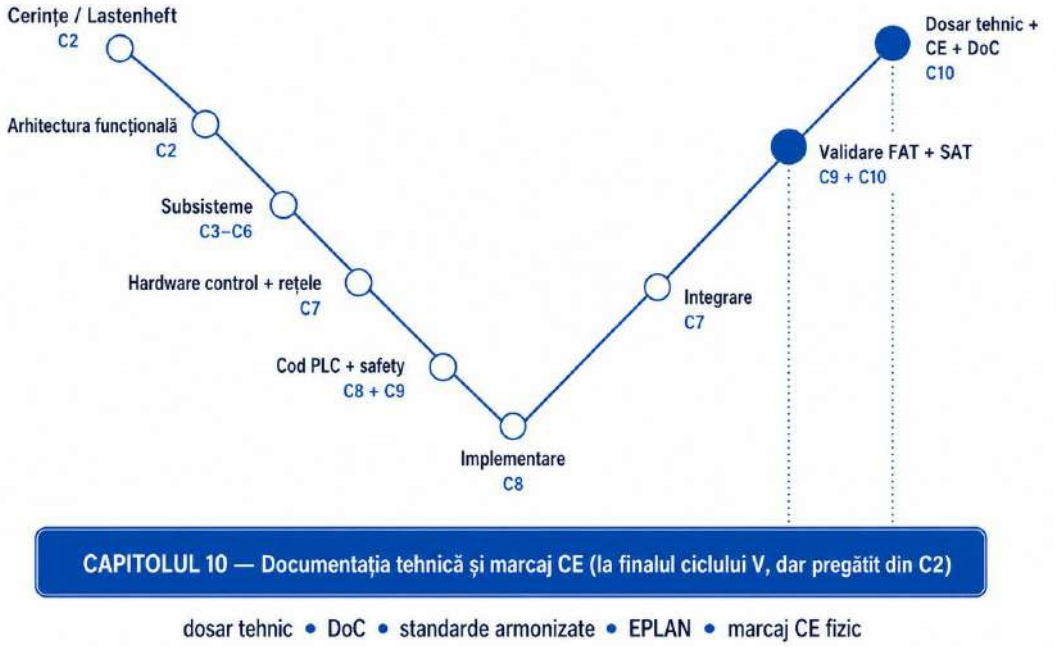


Figura 10.1. Poziționarea Capitolului 10 în ciclul V de proiectare. Documentația tehnică se constituie pe întreg ciclul proiectului: cerințele, evaluarea riscurilor, desenele, calculele, rapoartele de verificare și instrucțiunile sunt generate progresiv și sunt compilate înainte de introducerea pe piață sau punerea în funcțiune.

10.1.1 Definiția și rolul juridic al documentației tehnice

Documentația tehnică reprezintă ansamblul informațiilor prin care producătorul demonstrează conformitatea mașinii sau a produsului asociat cu cerințele legale aplicabile. Pentru Regulamentul (UE) 2023/1230, conținutul este stabilit în Anexa IV, Partea A pentru mașini și produse asociate și în Partea B pentru mașini parțial finalizate. Producătorul trebuie să păstreze documentația tehnică și declarația UE de conformitate la dispoziția autorităților de supraveghere a pieței timp de cel puțin 10 ani după introducerea pe piață sau punerea în funcțiune a produsului vizat, conform cerințelor regulamentului [28].

Rolul documentației tehnice este de a face trasabilă demonstrația de conformitate. Ea permite autorităților să verifice modul în care au fost identificate cerințele aplicabile, pericolele și măsurile de reducere a riscului, precum și legătura dintre proiect, calcule, verificări, instrucțiuni și declarația de conformitate. Pentru client și pentru producător, același set documentar constituie și o bază tehnică pentru mentenanță, modificări și investigarea incidentelor, fără a confunda însă obligațiile legale cu documentele contractuale de proiect.

Lipsa sau insuficiența documentației poate conduce la constatarea neconformității, solicitarea unor măsuri corective și, după caz, restricționarea, retragerea sau rechemarea produsului. Regimul sancțiunilor administrative, civile sau penale este stabilit de legislația națională a statului membru competent; de aceea nu este corect să se atribuie automat aceleași consecințe penale sau de asigurare în toate statele UE. Din perspectivă inginerească, obiectivul este prevenirea unei astfel de situații prin trasabilitate, controlul reviziilor și verificarea completitudinii înainte de livrare.

10.1.2 Responsabilitatea: producător, integrator și modificator

În sensul Regulamentului (UE) 2023/1230, responsabilitatea trebuie stabilită pornind de la rolul economic și tehnic real al organizației. Un integrator care proiectează și realizează o linie sau o celulă care,

ca ansamblu, constituie o mașină nouă poate avea obligațiile producătorului pentru ansamblul rezultat. Documentele componentelor și ale mașinilor parțial finalizate sunt intrări în această demonstrație, dar nu transferă automat responsabilitatea pentru integrarea finală [28].

O situație distinctă este modificarea substanțială a unei mașini după introducerea pe piață sau punerea în funcțiune. Regulamentul definește această situație prin efectul modificării fizice sau digitale asupra siguranței: apariția unui pericol nou ori creșterea unui risc existent, astfel încât devin necesare noi protecții sau măsuri de protecție. Nu există un prag universal de tip „+20 % forță/viteză” și nici o listă simplă de modificări care decid automat cazul. Evaluarea trebuie făcută pe configurația concretă; persoana care efectuează o modificare substanțială poate prelua obligațiile producătorului pentru produsul modificat [28].

În contractele industriale este recomandată delimitarea explicită a responsabilităților privind proiectarea, integrarea, documentele de conformitate, verificarea și păstrarea fișierelor. Pentru mașinile parțial finalizate se utilizează declarația UE de încorporare și instrucțiunile de asamblare prevăzute de regulament. Componentele electrice sau electronice uzuale (de exemplu drive-uri, F-CPU, bariere optice sau HMI) nu sunt automat „mașini parțial finalizate”; statutul lor juridic depinde de definiția produsului și de legislația aplicabilă [28].

10.1.3 Volumul și organizarea documentației

Volumul documentației crește cu numărul de funcții, variante, interfețe și riscuri, dar numărul de pagini nu este un criteriu de conformitate. O stație compactă poate necesita un set relativ restrâns, în timp ce o linie complexă poate genera sute sau mii de pagini de scheme, desene, rapoarte, instrucțiuni și certificate. Valorile cantitative prezentate în acest capitol trebuie interpretate ca exemple didactice de dimensionare a efortului, nu ca praguri normative. Pentru proiecte mari, utilizarea unui sistem de management al documentelor/PDM-PLM și a unui control riguros al reviziilor devine esențială.

> **În practică · Cine constituie documentația: repartizarea muncii în echipă**
>
> Documentația tehnică este un rezultat colectiv. Inginerul mecanic furnizează descrieri, desene, materiale și calcule; inginerul electric/automation: scheme, liste I/O și rapoarte; specialistul safety: evaluarea riscului, funcțiile de siguranță și validarea; technical writer-ul/inginerii de proces: informațiile pentru utilizator; project manager-ul/compliance manager-ul: indexarea, controlul reviziilor și verificarea completitudinii.
>
> Nu există un procent legal de ore-om alocat documentării. Efortul trebuie estimat din complexitatea proiectului și bugetat explicit, cu milestones pentru actualizarea documentelor „as-built”.

10.2 Structurarea practică a documentației tehnice: corespondența cu Anexa IV

Anexa IV a Regulamentului (UE) 2023/1230 stabilește elementele care trebuie incluse în documentația tehnică; ea nu impune șapte capitole juridice denumite A–G. Pentru claritate didactică și pentru managementul proiectului, acest manual grupează elementele Anexei IV în șapte module interne A–G (Figura 10.2): A, descriere și identificare; B, desene și scheme; C, evaluarea riscurilor; D, calcule, verificări și teste; E, informații și instrucțiuni pentru utilizator; F, legislație, standarde și specificații aplicate;

G, înregistrări de verificare/validare, FAT/SAT și alte dovezi contractuale relevante. La audit trebuie să existe o matrice de corespondență între aceste module și elementele efective din Anexa IV. Textul consolidat al Regulamentului (UE) 2023/1230 la 27 iulie 2026 include modificările aduse prin Regulamentul (UE) 2026/1744 în principal la interfața cu sistemele de IA cu grad ridicat de risc; acesta nu instituie un regim general de „documentație tehnică simplificată" a Anexei IV pentru IMM-uri, start-up-uri sau small mid-caps în cadrul legislației privind mașinile. Formulările privind un formular simplificat de documentație tehnică din Regulamentul (UE) 2026/1744 se referă la documentația sistemelor de IA din Regulamentul (UE) 2024/1689 și nu trebuie transferate asupra documentației tehnice a mașinii [28, 162].



Figura 10.2. Structurare didactică A–G a documentației tehnice și corespondența ei cu elementele Anexei IV, Partea A. Gruparea A–G este o convenție de lucru a manualului; conformitatea se verifică față de conținutul legal al Anexei IV, nu față de numărul de secțiuni interne.

10.2.1 Modul A: Descrierea generală și identificarea

Modulul A oferă o imagine de ansamblu suficientă pentru identificarea fără ambiguitate a mașinii și pentru înțelegerea funcțiilor, limitelor și configurației sale. Conținutul poate include descrierea generală, fotografii, desene de ansamblu, variante/configurații, utilizarea prevăzută și utilizările necorespunzătoare rezonabil previzibile, condiții de mediu și principalele caracteristici tehnice. Detaliul trebuie corelat cu complexitatea produsului și cu informațiile cerute de Anexa IV.

10.2.2 Modul B: Desene, scheme și date de proiectare

Modulul B reunește documentele tehnice necesare pentru înțelegerea proiectului și a funcționării: desene de ansamblu și de detaliu, scheme electrice, pneumatice și hidraulice, liste de componente, descrieri ale circuitelor de comandă și, unde este relevant, fișiere sau informații de proiectare necesare

pentru demonstrarea conformității (Tabelul 10.1). IEC 61082-1 poate fi utilizat pentru documentele electrotehnice, iar sistemele de referință și identificare pot fi structurate conform seriei IEC 81346 [51, 163].

Componenta mecanică a modulului B trebuie să asigure trasabilitatea de la ansamblu la subansamblu și piesă, fără a transforma documentația tehnică într-o arhivă necontrolată de fișiere CAD. Desenele de fabricație, specificațiile de material, toleranțele, tratamentele și procedurile speciale se includ în măsura în care sunt relevante pentru conformitate, siguranță, reproducibilitate și mentenanță. Pentru piese sau îmbinări critice, certificatele și rapoartele de proces pot fi păstrate în modulul D sau într-o anexă controlată.

Tabelul 10.1. Categorii de desene mecanice utilizate frecvent în modulul B și standarde de prezentare relevante.

Categorie desen	Standarde aplicabile	Volum tipic	Corespondență internă
Ansamblu general (GA)	ISO 7200 (cartuș), ISO 5455 (scări), ISO 128 (linii), ISO 129 (cotare)	1-3 pag	Modulul B
Subansamblu (vederi + secțiuni)	ISO 128, ISO 129, ISO 5456 (proiecții)	5-30 pag/modul	Modulul B
Piesă individuală	ISO 1101 (GD&T), ISO 286 (toleranță dimensională), ISO 1302 (rugozitate), ISO 4885 (tratament termic)	30-150 pag	Modulul B
Sudura	ISO 2553 (simboluri), ISO 5817 (calitate), ISO 17659 (terminologie)	5-20 pag	Modulul B + D (WPS/PQR)
Listă materiale	EN 10025 (oțel structural), EN 573 (Al), ISO 683 (oțel îmbunătățit)	1-5 pag	Modulul B + D (certificate)

Două aspecte merită controlate explicit: (1) specificațiile materialelor și starea de livrare trebuie definite suficient pentru funcția piesei și pentru trasabilitate; certificatele de material se solicită acolo unde evaluarea riscului, contractul sau standardul aplicabil o justifică; (2) tratamentele termice, acoperirile și cerințele speciale de fabricație trebuie indicate pe desene/specificații atunci când influențează performanța sau siguranța. Nu toate piesele necesită certificate 3.1 sau proceduri speciale; cerința trebuie legată de criticitatea funcțională și de standardele aplicabile.

10.2.3 Modul C: Evaluarea riscurilor

Modulul C conține evaluarea și reducerea riscurilor conform ISO 12100, cu limitele mașinii, identificarea pericolelor, estimarea/evaluarea riscului și măsurile de reducere aplicate iterativ. ISO 12100 nu impune o singură formulă universală S×F×P. Pentru funcțiile de comandă legate de siguranță se determină separat nivelul de performanță necesar (PLr) conform ISO 13849-1 sau nivelul de integritate cerut conform IEC 62061, după metoda aleasă. Documentația trebuie să arate clar legătura dintre pericol, măsura de reducere, funcția de siguranță și verificarea/validarea acesteia [3, 4, 27].

10.2.4 Modul D: Calcule, verificări și teste

Modulul D reunește dovezile cantitative și rezultatele verificărilor: calcule pentru funcțiile de siguranță (de exemplu rapoarte SISTEMA atunci când se aplică ISO 13849-1), calcule mecanice și termice, rapoarte EMC acolo unde legislația EMC este aplicabilă, rezultate FEA/CFD, măsurări ale timpilor de oprire, verificări electrice și certificate de calibrare ale instrumentelor utilizate la încercări. Conținutul

se stabilește din evaluarea riscului, cerințele EHSR, standardele aplicate și planul de verificare; nu există un set unic de teste valabil pentru orice mașină.

10.2.5 Modul E: Informații pentru utilizator și instrucțiuni

Instrucțiunile sunt o componentă esențială a demonstrației de conformitate și trebuie să acopere informațiile cerute de Regulamentul (UE) 2023/1230, Anexa III. IEC/IEEE 82079-1:2019 oferă principii și cerințe generale pentru pregătirea informațiilor de utilizare, dar nu impune o structură universală în exact șapte sau opt capitole. Manualul trebuie adaptat utilizatorilor și ciclului de viață: instalare, operare, reglare, mentenanță, depanare, riscuri reziduale, piese de schimb și dezafectare, în măsura în care acestea sunt relevante [28, 164].

10.2.6 Modul F: Legislație, standarde și specificații aplicate

Modulul F păstrează evidența legislației, standardelor armonizate, specificațiilor comune și altor specificații tehnice utilizate. Pentru fiecare standard se consemnează ediția efectiv aplicată și, atunci când se urmărește prezumția de conformitate, statutul/referința relevantă din Jurnalul Oficial al UE. Aplicarea unui standard numai parțial trebuie identificată suficient de precis. Ediția „cea mai nouă” și ediția care conferă prezumție de conformitate nu sunt întotdeauna același lucru; verificarea statutului trebuie făcută la data declarației [28].

10.2.7 Modul G: Înregistrări de verificare și validare

FAT și SAT sunt instrumente industriale utile pentru verificarea funcțională, integrare și acceptanță contractuală, dar nu constituie o „secțiune G” impusă de Anexa IV. Rapoartele lor pot furniza dovezi relevante pentru verificarea și validarea cerințelor de siguranță și de performanță. În domenii reglementate, protocoale suplimentare precum IQ/OQ/PQ pot fi cerute de sistemul de calitate, de procesul validat sau de cerințele clientului; ele nu sunt universal obligatorii pentru orice echipament destinat industriei farmaceutice.

> **În practică · Constituirea cronologică a documentației**
>
> Documentația nu se redactează eficient „în ultima săptămână”. Descrierea, limitele și evaluarea riscului apar devreme; desenele, schemele și lista standardelor se maturizează odată cu proiectul; calculele și verificările sunt legate de design freeze; instrucțiunile se finalizează pe baza HMI-ului și a configurației reale; FAT/SAT furnizează înregistrări de verificare.
>
> Înainte de emiterea declarației, proiectul trebuie să aibă o revizie „as-built” controlată și o matrice de completitudine față de Anexa IV.

10.3 Declarația UE de conformitate

Declarația UE de conformitate este documentul prin care producătorul își asumă responsabilitatea pentru conformitatea mașinii sau produsului asociat cu legislația de armonizare aplicabilă. Ea este distinctă de documentația tehnică: documentația conține dovezile, iar declarația sintetizează identificarea produsului, legislația și standardele/specificațiile utilizate, precum și semnătura persoanei împuternicite. Pentru Regulamentul (UE) 2023/1230, modelul este stabilit în Anexa V, Partea A [28].

10.3.1 Cele 10 elemente ale declarației UE de conformitate

Anexa V, Partea A a Regulamentului (UE) 2023/1230 enumeră 10 elemente care trebuie avute în vedere în declarația UE de conformitate (Figura 10.3). Unele se aplică numai în situații specifice, de exemplu adresa locului de utilizare pentru anumite mașini de ridicat instalate permanent sau datele organismului notificat atunci când acesta a participat la procedura de evaluare. Structura trebuie completată pentru produsul și procedura de conformitate concrete, fără a importa mecanic câmpuri din vechea Directivă 2006/42/CE [28].

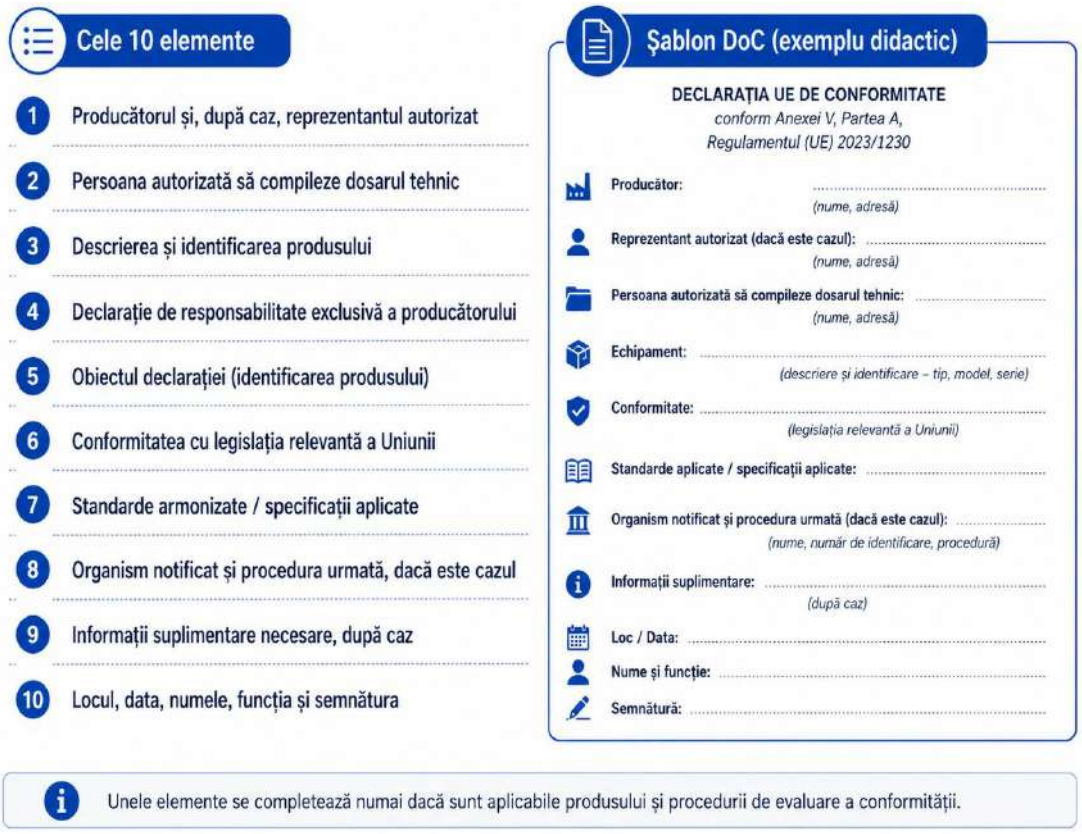


Figura 10.3. Structura declarației UE de conformitate conform Anexei V, Partea A a Regulamentului (UE) 2023/1230. Declarația trebuie corelată cu produsul, legislația aplicabilă, standardele/specificațiile utilizate și procedura de evaluare a conformității.

Cele 10 elemente pot fi sintetizate astfel: (1) identificarea mașinii/produsului asociat, produs, tip, model, lot sau număr de serie; (2) numele și adresa producătorului și, dacă este cazul, ale reprezentantului autorizat; (3) pentru categoriile de mașini de ridicat instalate permanent într-o clădire sau structură, adresa locului de utilizare; (4) mențiunea că declarația este emisă sub responsabilitatea exclusivă a producătorului; (5) obiectul declarației, descris astfel încât să permită trasabilitatea, inclusiv o imagine atunci când este necesară pentru identificare.

(6) legislația de armonizare relevantă a Uniunii cu care produsul este declarat conform; (7) referințele standardelor armonizate sau ale specificațiilor comune aplicate și, după caz, ale altor specificații tehnice, inclusiv datele cerute de modelul din Anexa V; dacă aplicarea este parțială, trebuie precizate părțile aplicate; (8) dacă este cazul, datele organismului notificat și ale certificatului emis în procedura de evaluare a conformității [28].

(9) dacă este cazul, mențiunea referitoare la procedura de control intern al producției pentru categoria de produs pentru care regulamentul o solicită în modelul declarației; (10) informații suplimentare,

urmate de locul și data emiterii, numele, funcția și semnătura persoanei care semnează pentru și în numele producătorului. Persoana autorizată să compileze documentația tehnică (câmp cunoscut din vechea Directivă 2006/42/CE) nu trebuie confundată cu structura noii declarații din Anexa V.

Dacă evaluarea conformității implică un organism notificat, declarația trebuie să reflecte procedura efectivă și identificarea organismului/certificatului. Regulamentul nu operează cu regula simplă „Anexa IV = organism notificat". Pentru categoriile din Anexa I, Partea A sunt prevăzute proceduri cu intervenție terță; pentru Partea B, controlul intern al producției este posibil numai în condițiile stabilite de art. 25, altfel se utilizează proceduri cu organism notificat. Produsele care nu sunt enumerate în Anexa I pot urma controlul intern al producției, dacă sunt îndeplinite cerințele aplicabile [28].

10.3.2 Limbi, format și reguli practice

Declarația UE de conformitate trebuie redactată sau tradusă în limba ori limbile cerute de statul membru în care mașină/produsul este introdus pe piață sau pus în funcțiune. Pentru proiectant, regula practică este verificarea cerinței lingvistice pentru piața de destinație și menținerea unei versiuni controlate a declarației; limba engleză nu poate fi presupusă universal suficientă doar pentru că livrarea este B2B [28].

Regulamentul permite ca declarația UE de conformitate să însoțească mașină sau, alternativ, ca instrucțiunile și informațiile prevăzute să indice adresa de internet ori codul citibil automat prin care declarația poate fi accesată. Atunci când este furnizată digital, declarația trebuie să rămână accesibilă online pe durata de viață estimată a produsului și, în orice caz, cel puțin 10 ani de la introducerea pe piață sau punerea în funcțiune. Semnătura poate fi gestionată în cadrul sistemului de control documentar al organizației; forma concretă trebuie să respecte legislația aplicabilă documentului electronic [28].

În practică se utilizează șabloane controlate prin QMS/PDM, dar fiecare declarație trebuie verificată față de configurația și legislația valabile la data emiterii. Se verifică în special identificarea produsului, actele legislative aplicabile, edițiile efectiv utilizate ale standardelor și statutul lor de armonizare. Copierea unei declarații vechi fără revalidarea acestor elemente este o sursă frecventă de neconformitate documentară.

> **În practică · Mașini parțial finalizate și declarația UE de încorporare**
>
> Pentru o mașină parțial finalizată se întocmesc documentația tehnică din Anexa IV, Partea B, instrucțiunile de asamblare și declarația UE de încorporare din Anexa V, Partea B. Produsul nu trebuie pus în funcțiune ca mașină finală înainte ca ansamblul în care este încorporat să fie declarat conform.
>
> Nu orice componentă este „partly completed machinery". Drive-urile, F-CPU-urile, barierele optice, HMI-urile sau electrovalvele pot fi componente/safety components/produse electrice supuse propriilor acte. Încadrarea se face după definiția legală și funcția produsului, nu după faptul că este integrat într-o mașină.

10.4 Standardele armonizate: ierarhia A / B / C

Standardele armonizate sunt un instrument central pentru demonstrarea conformității. Atunci când referința unui standard este publicată în Jurnalul Oficial al UE și standardul este aplicat corespunzător, produsul beneficiază de prezumția de conformitate pentru cerințele esențiale acoperite de acel

standard. EHSR pentru Regulamentul (UE) 2023/1230 sunt în Anexa III. Prezumția nu elimină evaluarea riscului și nu înseamnă că orice utilizare parțială a unui standard acoperă automat toate cerințele legale [28].

10.4.1 Cele trei tipuri de standarde de siguranță a mașinilor

În familia standardelor pentru siguranța mașinilor, CEN Guide 414:2017 și ISO Guide 78:2012 utilizează clasificarea Tip A/B/C (Figura 10.4). Tip A stabilește concepte, principii de proiectare și aspecte generale aplicabile unei game largi de mașini; ISO 12100:2010 este standardul de bază utilizat pentru evaluarea și reducerea riscului. La data auditului, ISO Guide 78:2012 rămâne ediția publicată, dar este în revizuire. Clasificarea A/B/C descrie nivelul de generalitate al standardului, nu o ierarhie juridică independentă de statutul de armonizare [27, 165, 166].

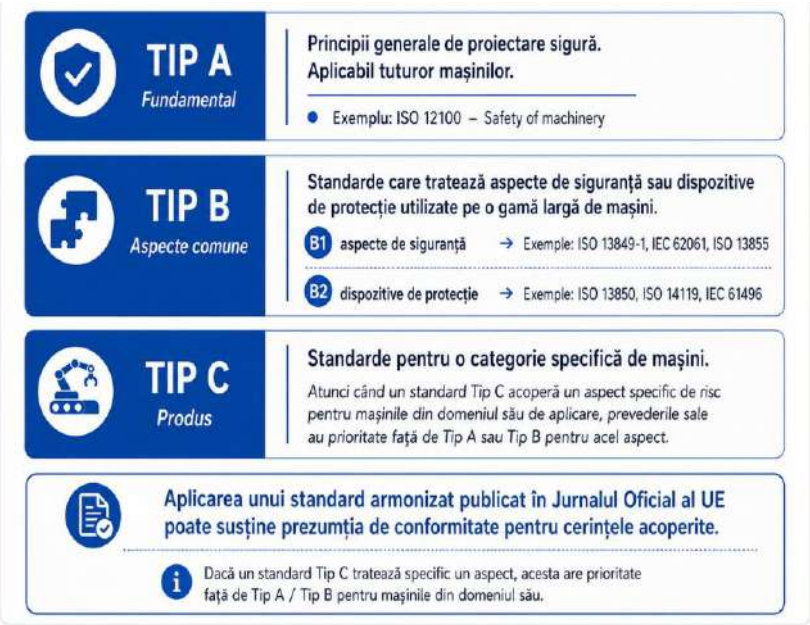


Figura 10.4. Relația dintre standardele Tip A, Tip B și Tip C. Standardele Tip C conțin cerințe pentru o categorie specifică de mașini și au prioritate pentru aspectele pe care le tratează atunci când prevederile lor diferă de standardele Tip A sau B.

Tip B acoperă fie aspecte de siguranță aplicabile mai multor categorii de mașini (de exemplu părți ale sistemelor de comandă legate de siguranță, distanțe, ergonomie), fie tipuri de mijloace/dispozitive de protecție (de exemplu interblocări, protecții, dispozitive electro-sensibile). Exemple actuale relevante includ ISO 13849-1:2023, IEC 62061, ISO 13855:2024, ISO 13857:2019, ISO 14119:2024, ISO 14120:2015 și IEC 60204-1 în ediția consolidată 2016+A1:2021 [3, 4, 29, 145, 149–151].

Tip C acoperă o categorie specifică de mașini. Când există un standard Tip C aplicabil, el trebuie analizat primul, deoarece poate conține cerințe specifice care prevalează pentru aspectele acoperite. Exemple actuale includ seria ISO 16092 pentru prese (ISO 16092-2:2019 pentru prese mecanice și ISO 16092-3:2017 pentru prese hidraulice) și ISO 10218-1/-2:2025 pentru roboți industriali și aplicații robotizate. Referințele vechi EN 692/EN 693 nu trebuie reutilizate fără verificarea statutului curent [12, 154, 167, 168].

10.4.2 Strategia practică de selecție a standardelor

Pasul 1 este identificarea standardelor Tip C care se aplică efectiv mașinii și verificarea statutului lor în Jurnalul Oficial al UE. Dacă există un standard Tip C, proiectantul îl utilizează ca referință principală pentru pericolele și situațiile acoperite de domeniul său. Aceasta nu înseamnă că toate celelalte standarde dispar din dosar; standardul Tip C poate trimite normativ la standarde Tip A/B, iar aspectele neacoperite trebuie tratate separat.

Pasul 2 este completarea cu ISO 12100 și cu standardele Tip B relevante pentru arhitectura reală a echipamentului: sisteme de comandă legate de siguranță, echipament electric, oprire de urgență, interblocări, poziționarea protecțiilor, acces și ergonomie. Lista nu se stabilește printr-un șablon fix de 8–12 standarde, ci prin domeniul de aplicare, evaluarea riscului și legislația aplicabilă.

Pasul 3 este tratarea aspectelor pentru care nu există standarde armonizate aplicabile. Pot fi utilizate standarde internaționale nearmonizate, specificații tehnice, rapoarte tehnice sau bune practici, dar conformitatea cu EHSR trebuie demonstrată prin argumente și dovezi adecvate. Faptul că o tehnologie este nouă, de exemplu AI sau conectivitate avansată, nu justifică omiterea standardelor de siguranță tradiționale care rămân aplicabile funcțiilor mecanice, electrice și de comandă.

10.4.3 Unde verificăm standardele armonizate

Textele standardelor sunt, în mod obișnuit, accesate prin organismele de standardizare sau prin abonamente instituționale. Costurile și modelele de licențiere diferă semnificativ în funcție de furnizor și de pachet, astfel încât nu este recomandată folosirea în manual a unor prețuri „tipice” ca valori de proiect. Pentru conformitate este esențial să se lucreze cu textul ediției efectiv aplicate și să se păstreze trasabilitatea versiunii utilizate.

Sursa oficială pentru verificarea prezumției de conformitate este Jurnalul Oficial al Uniunii Europene și actele Comisiei care publică sau actualizează referințele standardelor armonizate. Bibliotecile universitare și bazele de date naționale sunt utile pentru consultarea standardelor, însă statutul de armonizare trebuie verificat separat la data emiterii declarației. În proiect se consemnează atât standardul utilizat, cât și motivul aplicării sale [169].

Situație de tranziție la 26 septembrie 2026. Pagina oficială a Comisiei pentru standardele armonizate în domeniul mașinilor publică încă lista aferentă Directivei 2006/42/CE și precizează că prima decizie cu lista de standarde armonizate în temeiul Regulamentului (UE) 2023/1230 este în pregătire, fiind așteptată înainte de sfârșitul anului 2026. În consecință, pentru o mașină care va fi introdusă pe piață după 20 ianuarie 2027 nu trebuie presupus automat că statutul de armonizare din Directivă se transferă neschimbat; lista și eventualele limitări publicate pentru noul regulament trebuie reverificate la data declarației [169].

10.4.4 Standarde mecanice și fluidice frecvent omise

Dosarele tehnice tind uneori să privilegieze standardele safety-electrice, deși integritatea mecanică, accesul, protecțiile fixe și sistemele fluidice pot genera riscuri la fel de importante. Pentru proiectantul mecanic/mecatronic, lista de standarde trebuie derivată din subsistemele reale și din pericolele identificate. Tabelul 10.2 sintetizează câteva referințe frecvențe; statutul de armonizare și ediția aplicabilă trebuie verificate înainte de utilizarea lor în declarația de conformitate [27, 52, 78, 79, 150–152, 170].

Tabelul 10.2. Standarde tehnice cu impact direct asupra subsistemelor mecanice și fluidice.

Standard	Obiect	Impact în dosar
ISO 12100:2010, Anexa B	Taxonomia pericolelor și situațiilor periculoase	Modul C: listă sistematică de pericole; evaluatorul documentează relevanța/irelevanța pentru configurația concretă.
ISO 14120:2015	Proiectarea și construcția protecțiilor fixe și mobile	Modulele B/C/D: alegerea, rezistența, fixarea și integrarea protecțiilor; dimensiunile se corelează cu ISO 13857 și evaluarea riscului.
ISO 13857:2019	Distanțe de siguranță pentru prevenirea accesului membrelor	Modul C/B: distanțele se selectează din tabelele standardului în funcție de geometria accesului și de populația relevantă.
ISO 14122, părțile 1–4	Mijloace permanente de acces la mașini	Modulele B/C: platforme, scări și balustrade se dimensionează conform părții aplicabile; nu se folosesc valori unice în afara contextului standardului.
ISO 14118:2017	Prevenirea pornirii neașteptate	Modulele C/E: strategii de izolare și prevenire a pornirii; procedurile LOTO ale organizației pot completa cerințele tehnice.
ISO 4413:2010	Sisteme și componente hidraulice: reguli generale și cerințe de siguranță	Modulele B/C/D: schema, limitarea presiunii, stări sigure, retenția sarcinii și verificările se stabilesc conform aplicației.
ISO 4414:2010	Sisteme și componente pneumatice: reguli generale și cerințe de siguranță	Modulele B/C/D: schema, evacuarea energiei, mișcarea la pierderea presiunii, comanda și verificarea se corelează cu riscul.
ISO 14738:2002	Cerințe antropometrice pentru proiectarea posturilor la mașini	Modulele B/C/E: geometria postului și accesul operatorului; valorile se preiau din standard și din populația de utilizatori, nu din praguri universale.

Implicația practică este simplă: fiecare subsistem mecanic sau fluidic relevant trebuie asociat cu cerințele EHSR și cu standardele/specificațiile care oferă o metodă verificabilă de proiectare. Aplicarea unui standard nu elimină necesitatea justificării interfețelor dintre subsisteme, iar absența unui standard armonizat nu face automat proiectul neconform; crește însă nevoia de demonstrație tehnică proprie.

10.5 Instrumente de proiectare și automatizarea documentației

Volumul și interdependența datelor justifică utilizarea instrumentelor ECAD, MCAD și PDM/PLM. Valoarea lor nu constă doar în „desenare”, ci în gestionarea coerentă a obiectelor, referințelor, listelor și reviziilor. Gradul real de automatizare depinde de maturitatea bibliotecilor, regulile interne de proiectare, integrarea cu ERP/PLC și disciplina de control al datelor; procentele universale de reducere a efortului nu sunt transferabile de la o organizație la alta.

10.5.1 ECAD: schema electrică drept sursă structurată de date

EPLAN Electric P8 este un exemplu de platformă ECAD utilizată pentru proiectarea electrotehnică orientată pe date. Un dispozitiv poate fi asociat cu proprietăți, articole, conexiuni și referințe, iar proiectul poate genera rapoarte precum liste de materiale, diagrame de borne, liste de cabluri și alte evaluări.

Această abordare reduce riscul de inconsistență atunci când rapoartele sunt generate din aceeași bază de proiect, dar rezultatul depinde de configurarea și validarea datelor de intrare [134].

Într-un flux bine configurat, ECAD poate genera sau actualiza scheme, BOM, liste de dispozitive, diagrame de borne, liste de cabluri și date de I/O. Nu toate aceste documente sunt „automat conforme" prin simpla folosire a software-ului: proiectantul trebuie să definească șabloanele, regulile de denumire, clasele de dispozitive, reviziile și criteriile de verificare (Figura 10.5). Sistemul ECAD este un instrument de trasabilitate și consistență, nu un substitut pentru verificarea inginerească.

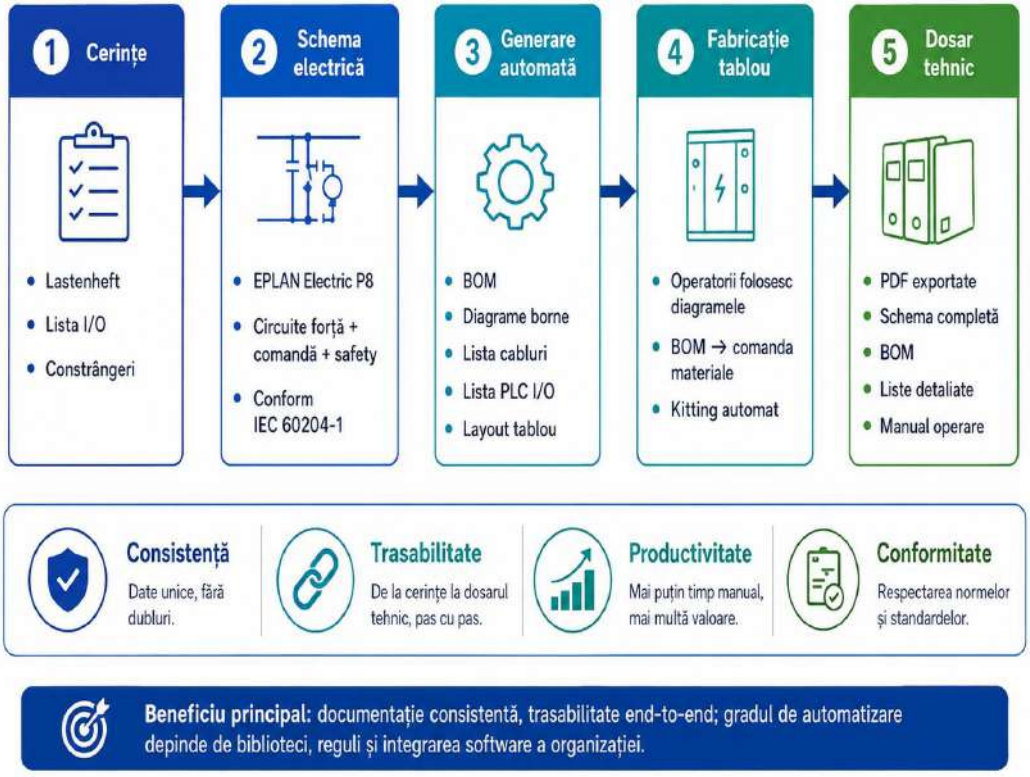


Figura 10.5. Flux ECAD orientat pe date: de la cerințe și lista I/O la scheme și rapoarte generate dintr-o sursă comună. Beneficiul principal este consistența și trasabilitatea; gradul de automatizare depinde de biblioteci, reguli și integrarea software a organizației.

10.5.2 Integrarea ECAD–MCAD și managementul datelor

Integrarea dintre ECAD și MCAD permite schimbul de date privind poziția componentelor, interfețele, gabaritele și cablarea, în funcție de capabilitățile produselor software utilizate. Integrarea cu mediile PLC poate reduce erorile de transcriere ale adreselor I/O, iar integrarea cu ERP poate transmite BOM-uri aprobate către achiziții. Aceste fluxuri trebuie configurate și validate; nu se presupune automat că toate produsele software realizează schimbul bidirecțional fără conversii sau reguli intermediare.

Pentru proiecte cu multe componente, utilizarea unei surse controlate de date poate reduce erorile de transcriere și timpul de actualizare. Impactul economic trebuie evaluat pe baza indicatorilor proprii ai organizației (număr de proiecte, re-utilizare, calitatea bibliotecilor, rata reală a erorilor și costul schimbărilor) nu pe procente sau economii universal valabile.

10.5.3 Workflow integrat: de la cerințe la documentația tehnică

Un flux de lucru recomandat este: cerințe → arhitectură și I/O preliminar → proiect ECAD/MCAD → rapoarte și BOM controlate → implementare PLC/HMI → verificare → actualizarea „as-built” → compilarea documentației tehnice. Punctul esențial este controlul configurației: documentele livrate trebuie să reflecte starea fizică și software efectiv instalată, iar modificările din FAT/SAT trebuie propagate în desene, liste și instrucțiuni înainte de emiterea declarației.

Trasabilitatea digitală poate accelera depanarea și mentenanța atunci când identificatorii fizici ai componentelor/conductorilor sunt legați de documentație. Timpul de diagnostic depinde însă de arhitectura de identificare și de infrastructura clientului; nu este justificată prezentarea unor valori universale de ordinul „10 secunde” față de „30–60 minute”.

> **În practică · Alegerea platformei ECAD**
>
> Alegerea între EPLAN, AutoCAD Electrical, SEE Electrical sau alte platforme trebuie făcută după criterii măsurabile: tipul de proiecte, bibliotecile disponibile, integrarea cu PDM/ERP/PLC, cerințele clienților, costul total de operare și competența echipei. Nu există un prag universal de „5 echipamente/an”, un ROI garantat sau o cerință generală a industriei auto/farma pentru o anumită marcă software.
>
> Avantajul unui ECAD orientat pe date apare atunci când organizația exploatează efectiv rapoartele, reutilizarea și controlul configurației; altfel, platforma performantă poate fi folosită doar ca editor de desene.

10.5.4 MCAD: componenta mecanică a documentației automatizate

Platformele MCAD moderne gestionează modele 3D, ansambluri, piese, proprietăți de material și liste de componente și pot genera vederi 2D, BOM-uri și fișiere pentru fabricație. Rapoartele FEA/MBS pot susține modulul D atunci când analiza respectivă este necesară pentru demonstrarea cerințelor. Procentul de conținut generat automat variază puternic cu standardizarea internă, nivelul de detaliu și integrarea cu PDM/PLM.

Documentele mecanice trebuie privite ca rezultate controlate ale modelului și ale procesului de verificare, nu ca fișiere independente (Tabelul 10.3). O modificare de geometrie sau material trebuie propagată în desene, BOM, calcule și instrucțiuni relevante, iar PDM/PLM poate furniza controlul reviziilor, aprobările și istoricul modificărilor.

Tabelul 10.3. Cartografierea rezultatelor MCAD pe modulele interne ale documentației tehnice.

Output MCAD	Modul intern	Grad potențial de automatizare
Desene piese (2D din 3D)	B	Ridicat, dacă modelul 3D și șabloanele sunt controlate
BOM ierarhic + masa calculata	B/D, lista materiale)	Ridicat
Lista piese standardizate	B	Ridicat
Fișiere fabricație (DXF, STEP, G-code)	B, anexa fabricație)	Ridicat
Rapoarte FEA structural (von Mises, deformații, frecvențe proprii)	D, calcule rezistența)	Mediu–ridicat; necesită model, încărcări și interpretare validate

Output MCAD	Modul intern	Grad potențial de automatizare
Rapoarte MBS (cinematica, dinamica multi-body)	D, calcule dinamica)	Mediu; depinde de modelul dinamic și scenarii
Vederi explodate + nomenclatura piese de schimb	E, manual mentenanța)	Mediu; necesită pregătire editorială și validare

Integrarea ECAD–MCAD este valoroasă în special pentru verificarea interfețelor fizice, accesului la mentenanță, rutării cablurilor și coordonării componentelor. Simulările multi-body sau FEA se folosesc atunci când complexitatea, dinamica sau evaluarea riscului le justifică; ele nu sunt „obligatorii” prin natura aplicației colaborative. Pentru stația SAP, valorile de volum și automatizare prezentate ulterior sunt exemple didactice, nu benchmark-uri normative.

10.6 Documentația digitală: Regulamentul (UE) 2023/1230

Regulamentul (UE) 2023/1230 recunoaște furnizarea digitală a instrucțiunilor și a altor informații în condițiile stabilite de regulament. Această opțiune nu trebuie interpretată ca eliminarea oricărei obligații privind suportul fizic: pentru utilizatorii neprofesionali, anumite informații esențiale de siguranță trebuie furnizate pe hârtie, iar utilizatorul poate solicita la momentul achiziției instrucțiuni pe hârtie, care trebuie furnizate gratuit în termen de o lună [28].

Furnizarea digitală poate îmbunătăți accesul la instrucțiuni în exploatare și mentenanță, în special prin căutare, acces de pe dispozitive mobile și integrarea conținutului multimedia. Alegerea formatului trebuie însă să pornească de la utilizator, mediul de lucru, disponibilitatea conexiunii și cerințele de trasabilitate; documentul digital nu este „superior” în mod universal suportului pe hârtie.

10.6.1 Cerințe pentru informațiile și declarațiile furnizate digital

Pentru instrucțiunile furnizate în format digital, producătorul trebuie să indice pe mașină sau, dacă acest lucru nu este posibil, pe ambalaj ori într-un document însoțitor modul de acces, să le prezinte într-un format care permite utilizatorului să le tipărească, să le descarce și să le salveze pe un dispozitiv electronic și să le mențină accesibile online pe durata de viață estimată a mașinii și cel puțin 10 ani după introducerea pe piață. Alegerea tehnică poate utiliza URL, cod QR sau alt cod citibil automat, cu condiția ca accesul și identificarea produsului să fie robuste [28].

Regulamentul cere accesibilitatea informației, dar nu formulează o regulă generală de tip „fără cookie, fără autentificare, fără abonament” pentru orice resursă digitală. În proiectarea portalului trebuie evitate barierele care împiedică utilizatorul legitim să consulte instrucțiunile, iar politica de acces trebuie să fie compatibilă cu obligațiile legale și cu protecția informațiilor sensibile din documentația tehnică. Documentația tehnică integrală nu este, în mod obișnuit, un document public destinat tuturor utilizatorilor.

Dacă utilizatorul solicită instrucțiuni pe hârtie la momentul achiziției, producătorul trebuie să le furnizeze gratuit în termen de o lună. Pentru declarația UE de conformitate, regulamentul permite indicarea unei adrese de internet sau a unui cod citibil automat; declarația digitală trebuie să rămână accesibilă online pe durata de viață estimată și, în orice caz, cel puțin 10 ani după introducerea pe piață sau

punerea în funcțiune. O copie pe stick USB sau trimisă prin e-mail poate fi utilă contractual, dar nu înlocuiește de una singură cerința de disponibilitate online atunci când se folosește această opțiune [28].

Avantajele documentației digitale sunt reale (actualizare controlată, căutare, acces în teren, integrare multimedia și distribuție mai rapidă) dar trebuie echilibrate cu controlul versiunilor. După o modificare, utilizatorul trebuie să poată identifică versiunea aplicabilă configurației sale; un portal care afișează numai „ultima versiune” fără istoric poate compromite trasabilitatea.

10.6.2 Digital Product Passport: relație și limite

Regulamentul (UE) 2024/1781 privind proiectarea ecologică pentru produse sustenabile (ESPR) introduce cadrul pentru Digital Product Passport. DPP nu este o extensie automată și universal obligatorie a dosarului tehnic al oricărei mașini în 2026; cerințele concrete se activează pentru grupuri de produse prin acte delegate și reguli sectoriale. Ca exemplu concret, Regulamentul (UE) 2023/1542 impune, de la 18 februarie 2027, un pașaport electronic pentru bateriile LMT, bateriile industriale cu capacitate mai mare de 2 kWh și bateriile pentru vehicule electrice introduse pe piață sau puse în serviciu [171, 172].

Un DPP poate reuni date despre identitatea produsului, materiale, performanțe, reparabilitate, trasabilitate și informații de circularitate în structura stabilită pentru categoria respectivă. Pentru producătorii de echipamente, pregătirea unei arhitecturi coerente de date (identificatori unici, BOM controlat, versiuni și legături între produs și documente) este utilă și independent de momentul în care o anumită categorie de mașini ar putea intra sub cerințe DPP.

Nu este justificată afirmarea unei date generale „2028–2030” pentru obligativitatea DPP la toate mașinile industriale. Planificarea trebuie bazată pe actele delegate și pe legislația sectorială care va defini produsele, datele și termenele concrete. Manualul tratează DPP ca direcție de evoluție a infrastructurii de date, nu ca cerință deja aplicabilă tuturor echipamentelor de fabricație.

> **În practică · Strategie incrementală pentru documentația digitală**
>
> Faza 1: păstrați documentele controlate în PDF/PDF-A și publicați instrucțiunile/declarația printr-un mecanism stabil, cu identificarea versiunii.
>
> Faza 2: adăugați conținut multimedia acolo unde îmbunătățește efectiv operarea sau mentenanța și definiți politica de arhivare și migrare a linkurilor.
>
> Faza 3: integrați portalul cu PDM/PLM/MES și cu identificatorii echipamentului, păstrând separarea dintre informațiile destinate utilizatorului și documentația tehnică ce trebuie furnizată autorităților la cerere.
>
> Costurile și beneficiile sunt specifice organizației și nu se exprimă în capitol prin valori universale.

10.7 Proces integrat pentru pregătirea marcajului CE

Secțiunile precedente pot fi reunite într-un flux de proiectare și conformitate. Cei 10 pași utilizați aici reprezintă o metodă didactică de organizare, nu o succesiune juridică obligatorie. În proiecte reale, activitățile se suprapun, iar evaluarea riscului, alegerea standardelor, verificarea și documentarea se reiau iterativ după modificări (Figura 10.6).

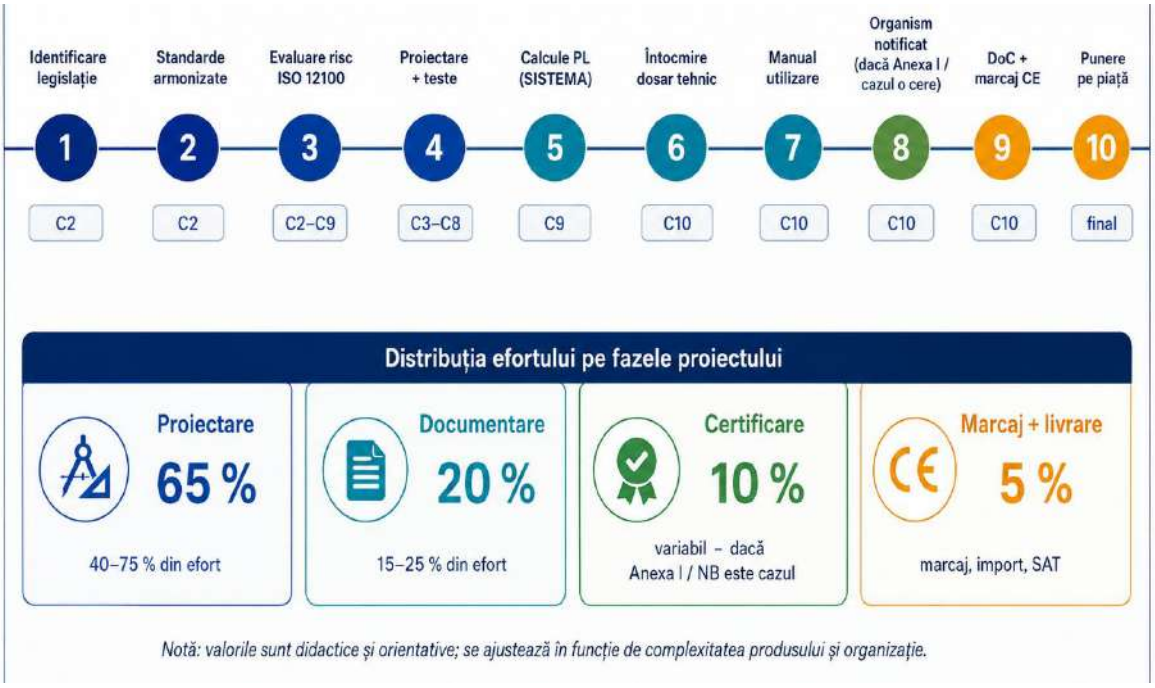


Figura 10.6. Flux didactic în 10 pași pentru pregătirea marcajului CE. Documentația se constituie pe parcursul proiectării; efortul relativ al fazelor depinde de complexitatea mașinii, procedura de evaluare a conformității, maturitatea organizației și cerințele clientului.

10.7.1 Cei 10 pași ai procesului: descriere

Pasul 1. Identificarea legislației aplicabile. În faza de specificare se stabilesc actele Uniunii relevante pentru produs: Regulamentul (UE) 2023/1230 și, după caz, EMC, ATEX, RED, PED sau alte acte sectoriale. Directiva LVD nu se adaugă automat ca act separat pe declarația unei mașini doar pentru că tabloul funcționează la 230 V; pentru mașini, obiectivele de siguranță electrică ale LVD sunt preluate prin cerințele Regulamentului privind mașinile, conform relației stabilite de acesta [28].

Pasul 2. Selectarea standardelor și specificațiilor relevante. Se verifică domeniul de aplicare, ediția și statutul de armonizare și se construiește o listă controlată care va susține proiectarea și declarația. Lista se actualizează dacă proiectul sau data introducerii pe piață se schimbă.

Pasul 3. Evaluarea și reducerea riscului. ISO 12100 furnizează cadrul iterativ. Pentru funcțiile de comandă legate de siguranță se determină PLr/SIL necesar cu metoda standardului ales. Rezultatul este un set trasabil de pericole, măsuri și cerințe de verificare, nu doar un scor de risc.

Pasul 4. Proiectarea și verificarea subsistemelor. Proiectarea mecanică, electrică, fluidică, senzorială și software trebuie corelată cu cerințele de conformitate. Desenele și calculele produse în această fază devin parte a documentației tehnice după revizuire și actualizarea „as-built”.

Pasul 5. Demonstrarea performanței funcțiilor de siguranță. Pentru ISO 13849-1 se pot utiliza instrumente precum SISTEMA pentru documentarea arhitecturii și calculului PL, iar pentru IEC 62061 se aplică metoda corespunzătoare SIL. Instrumentul nu înlocuiește validarea funcției complete.

Pasul 6. Compilarea documentației tehnice. Se verifică elementele cerute de Anexa IV și se pun în corespondență documentele proiectului cu acestea. Automatizarea ECAD/MCAD reduce efortul de compilare numai dacă datele sursă sunt controlate și actualizate.

Pasul 7. Finalizarea informațiilor pentru utilizator. Instrucțiunile și avertizările sunt revizuite față de configurația finală, riscurile reziduale și rezultatele FAT/SAT. Traducerile se gestionează în funcție de piața de destinație și cerințele legale.

Pasul 8. Alegerea și executarea procedurii de evaluare a conformității. Necesitatea implicării unui organism notificat rezultă din art. 25 și din încadrarea produsului în Anexa I, Partea A/Partea B, nu din vechea regulă „Anexa IV". Pentru produsele neincluse în Anexa I, controlul intern al producției este procedura uzuală prevăzută de regulament [28].

Pasul 9. Emiterea declarației UE de conformitate și aplicarea marcajului CE. După finalizarea procedurii aplicabile, producătorul completează declarația conform Anexei V, verifică identificarea și documentele de suport și aplică marcajul CE potrivit cerințelor de vizibilitate, lizibilitate și caracter durabil [28].

Pasul 10. Livrarea, instalarea și punerea în funcțiune. FAT/SAT pot susține verificarea și acceptanța, dar data SAT nu definește juridic „introducerea pe piață". Introducerea pe piață este prima punere la dispoziție pe piața Uniunii, iar punerea în funcțiune este prima utilizare în Uniune pentru scopul prevăzut. Aceste noțiuni trebuie tratate distinct în documentație și contract [28].

10.7.2 Distribuția efortului: implicații practice

Efortul documentar și de conformitate variază considerabil între proiecte. Procentele de tip „65 % proiectare / 20 % documentare / 10 % certificare" pot fi utile doar ca scenarii de planificare internă, nu ca benchmark normativ. Factorii dominanți sunt noutatea soluției, numărul de variante, standardele Tip C, nivelul de risc, procedura de evaluare a conformității, gradul de re-utilizare și maturitatea bibliotecilor ECAD/MCAD.

Cea mai importantă consecință managerială rămâne validă: o eroare de încadrare legislativă, de selectare a standardelor sau de evaluare a riscului identificată târziu poate produce re-proiectări costisitoare. De aceea, activitățile de conformitate trebuie începute odată cu specificarea și revizuite la schimbările majore de configurație.

10.8 Studiu de caz didactic: documentația tehnică pentru stația SAP

Secțiunea aplică structura documentației tehnice la SAP conceptual: produs tub–carcasă, dispozitiv de poziționare, fixare pneumatică CL1/CL2 și axă electrică de presare Z. Datele de identificare, producătorul, lista finală a standardelor și declarația din exemplu sunt fictive și au numai rol didactic. Nu există o demonstrație a conformității unei mașini construite, iar dosarul tehnic real ar necesita desene, calcule, evaluare de risc, măsurări și verificări pentru configurația efectivă.

10.8.1 Strategia generală: clasificarea echipamentului

SAP de referință este o stație conceptuală de asamblare prin presare axială a unui tub într-o carcasă, prin ajustaj cu strângere; nu reprezintă automat o presă pentru prelucrarea la rece a metalelor. Încadrarea sa în categoriile Anexei I a Regulamentului (UE) 2023/1230 nu poate fi dedusă dintr-un prag generic de forță ori numai din denumirea „presă": se verifică destinația, operația, încărcarea/descărcarea,

construcția și celelalte condiții ale categoriei relevante. Procedura de evaluare a conformității este stabilită numai după această încadrare și identificarea legislației aplicabile.

Pentru scenariul SAP se consideră, ca ipoteză didactică de încadrare pentru configurația descrisă, aplicabile Regulamentul (UE) 2023/1230 și Directiva 2014/30/UE privind compatibilitatea electromagnetică; această alegere trebuie reverificată pe produsul real și pe configurația electrică/electronică efectivă. Alte acte, de exemplu RED, ATEX sau PED, se includ numai dacă domeniul lor de aplicare este efectiv declanșat de configurația produsului. Lista standardelor de proiectare se verifică la data declarației; ca repere tehnice actuale pot fi analizate ISO 12100, ISO 13849-1:2023, ISO 13855:2024, ISO 13857:2019, ISO 14119:2024, IEC 60204-1:2016+A1:2021 și seria IEC 61496, în măsura în care funcțiile și dispozitivele respective sunt prezente [28, 173].

10.8.2 Compoziția documentației tehnice

Pentru exercițiul didactic, documentația SAP este organizată în modulele A–G descrise în §10.2 și pusă în corespondență cu Anexa IV, Partea A. Se poate utiliza, ca exemplu de planificare, un pachet de ordinul câtorva sute de pagini, cu desene/scheme, evaluarea riscului, calcule și validări, instrucțiuni și evidența standardelor. Numărul de pagini nu este un criteriu de conformitate; importantă este acoperirea completă și trasabilă a informațiilor cerute.

Figura 10.7 compară didactic volumul documentar pentru diferite categorii de proiect.

Secțiune dosar tehnic	Stație auto (Tier-1)	Mașina ambalare	Celulă robotizată	Linie farmaceutică
A. Descriere generală	10 pag	40 pag	15 pag	50 pag
B. Scheme electrice (EPLAN)	120 pag	300 pag	180 pag	350 pag
B. Scheme pneumatice	15 pag	45 pag	20 pag	50 pag
C. Evaluare risc	60 pag	80 pag	120 pag	150 pag
D. Calcule SISTEMA	20 pag	30 pag	50 pag	60 pag
E. Manual operare	120 pag	200 pag	80 pag	250 pag
F. Lista standarde	5 pag	10 pag	8 pag	15 pag
G. Rapoarte SAT + IQ/OQ/PQ	30 pag	40 pag	40 pag	120 pag
TOTAL	~380 pag	~745 pag	~513 pag	~1045 pag

Linia farmaceutică are volum maxim datorită conținutului GMP/FDA, IQ/OQ/PQ și documentației de validare.

Valorile ilustrează ordinul de mărime și nu reprezintă praguri normative sau benchmark-uri obligatorii.

Figura 10.7. Comparație didactică a volumului documentar pentru diferite categorii de proiect. Valorile ilustrează ordinul de mărime și nu reprezintă praguri normative sau benchmark-uri obligatorii.

În scenariul SAP, manualul și rapoartele de verificare se dimensionează în funcție de funcțiile și riscurile reale. IEC/IEEE 82079-1 poate ghida calitatea informațiilor de utilizare, fără a impune un număr fix de capitole. FAT și SAT documentează verificarea și acceptanța, iar măsurările safety relevante se păstrează ca dovezi de validare. Pentru o livrare după 20 ianuarie 2027, documentele și declarația se raportează la Regulamentul (UE) 2023/1230 și la statutul standardelor existent la data emiterii [28, 164].

10.8.3 Declarația UE de conformitate: exemplu de structurare

Exemplul de mai jos ilustrează structura Anexei V, Partea A pentru o stație SAP ipotetică introdusă pe piață după 20 ianuarie 2027. Numele organizației, adresa, numerele de identificare și datele sunt fictive și au exclusiv rol didactic. Într-un proiect real, declarația se completează numai după verificarea procedurii de conformitate și a listei de acte/standarde aplicabile [28].

Exemplul rezolvat 10.1. Schiță exclusiv didactică de declarație UE pentru SAP conceptual (nu document emis)

Enunț. Se redactează, în scop didactic, structura Declarației UE de conformitate pentru stația SAP descrisă în §10.8.1–10.8.2. Se presupune că produsul este introdus pe piață la 15 martie 2027, după data generală de aplicare a Regulamentului (UE) 2023/1230. Datele producătorului și numerele de identificare sunt fictive.

DECLARAȚIA UE DE CONFORMITATE: structură conform Anexei V, Partea A

1. Identificarea produsului: SAP-Auto-1; stație semi-automată de asamblare prin presare; model A1; nr. serie SAP-2027-001; an fabricație 2027.
2. Producător: SC Echipamente Industriale SRL, Cluj-Napoca, România. Reprezentant autorizat: nu se aplică în acest exemplu.
3. Adresa locului de utilizare pentru mașini de ridicat instalate permanent: nu se aplică pentru stația SAP.
4. Declarația este emisă sub responsabilitatea exclusivă a producătorului.
5. Obiectul declarației: stația SAP-Auto-1, configurația A1, identificată prin numărul de serie de mai sus; se atașează/indică imaginea sau referința de identificare dacă este necesară pentru trasabilitate.
6. Legislația de armonizare aplicabilă: Regulamentul (UE) 2023/1230 privind mașinile; Directiva 2014/30/UE privind compatibilitatea electromagnetică. Alte acte se includ numai dacă sunt aplicabile configurației finale.
7. Standarde/specificații tehnice utilizate: se enumeră edițiile efectiv aplicate și statutul relevant la data de 15 martie 2027. Pentru exemplu: ISO 12100:2010; ISO 13849-1:2023; ISO 13855:2024; ISO 13857:2019; ISO 14119:2024; IEC 60204-1:2016+A1:2021; părțile IEC 61496 relevante pentru dispozitivul instalat. Într-un document real se utilizează referințele EN armonizate publicate în JOUE, nu o listă precompletată din manual.
8. Organism notificat/certificat: nu se aplică în scenariul didactic, presupunând că procedura selectată nu implică un organism notificat.
9. Mențiunea privind controlul intern al producției, dacă este aplicabilă conform modelului Anexei V și procedurii alese: se completează pentru cazul concret.
10. Informații suplimentare și semnare: Cluj-Napoca, 15 martie 2027; numele și funcția persoanei autorizate să semneze pentru și în numele producătorului; semnătura.

Notă didactică. O declarație reală nu se emite din acest șablon fără verificarea încadrării în Anexa I, a procedurii de evaluare a conformității, a legislației aplicabile și a statutului standardelor la data emiterii. Persoana autorizată să compileze documentația tehnică nu este introdusă automat ca punct separat în modelul Anexei V, Partea A.

10.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție

10.9.1 Recapitulare: conceptele de bază

- Documentația tehnică demonstrează conformitatea cu cerințele aplicabile. Pentru Regulamentul (UE) 2023/1230, elementele legale sunt în Anexa IV; gruparea A–G folosită în acest capitol este o structură didactică de management, nu o împărțire juridică obligatorie.
- Responsabilitatea aparține producătorului în sensul legislației aplicabile. Un integrator poate deveni producător al ansamblului pe care îl creează; persoana care efectuează o modificare substanțială poate prelua obligațiile producătorului pentru produsul modificat.

- Declarația UE de conformitate pentru Regulamentul (UE) 2023/1230 urmează Anexa V, Partea A și conține 10 elemente, unele condiționale. Ea nu trebuie confundată cu documentația tehnică și nici cu declarația UE de încorporare pentru mașini parțial finalizate.
- Standardele armonizate pot conferi prezumția de conformitate pentru cerințele EHSR pe care le acoperă. Se verifică domeniul, ediția aplicată și statutul de armonizare; standardele Tip C au prioritate pentru aspectele pe care le tratează.
- ECAD/MCAD/PDM pot îmbunătăți consistența și trasabilitatea documentației, dar gradul de automatizare depinde de datele, bibliotecile și procesele organizației. Software-ul nu certifică automat proiectul.
- Documentația digitală este permisă în condițiile Regulamentului (UE) 2023/1230. Instrucțiunile digitale trebuie să poată fi tipărite, descărcate și salvate și trebuie menținute online pe durata de viață estimată și cel puțin 10 ani după introducerea pe piață; la cererea formulată la cumpărare, o copie pe hârtie se furnizează gratuit în termen de o lună. Pentru declarația UE de conformitate digitală, perioada minimă de 10 ani se raportează la introducerea pe piață sau punerea în funcțiune [28].
- Volumul documentației este dependent de proiect și nu reprezintă un criteriu legal. În domenii reglementate pot apărea protocoale și înregistrări suplimentare, dar cerințele se derivă din legislația și sistemul de calitate aplicabile.
- Fluxul în 10 pași din §10.7 este un instrument didactic: legislație → standarde → risc → proiectare → demonstrarea funcțiilor safety → compilare → instrucțiuni → procedura de conformitate → DoC/CE → livrare/punere în funcțiune.
- Implicarea unui organism notificat se stabilește conform art. 25 și Anexei I, Partea A/B. Nu există o regulă „Anexa IV = obligatoriu Notified Body” și nu este utilă estimarea unei proporții universale de mașini „auto-certificate”.
- Erorile de încadrare legislativă, de selectare a standardelor și de evaluare a riscului sunt costisitoare când sunt identificate târziu. Verificarea timpurie și controlul configurației reduc reiterațiile și incoerențele dintre produs și dosar.

10.9.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipă; răspunsurile sintetice apar după fiecare întrebare.

- Q1. De unde rezultă perioada de păstrare de cel puțin 10 ani?
- Din obligația legală a producătorului de a menține documentația tehnică și declarația UE de conformitate la dispoziția autorităților pentru perioada prevăzută de Regulamentul (UE) 2023/1230. Nu este necesar și nici corect să justificăm termenul prin „durata medie de viață” a unei mașini.
- Q2. Când poate un integrator să aibă obligațiile producătorului?
- Când ansamblul pe care îl proiectează și îl introduce pe piață/pune în funcțiune constituie, el însuși, o mașină sau un produs asociat în sensul regulamentului. Simplul montaj sau conectarea nu decide singure cazul; se analizează produsul rezultat, rolurile contractuale și responsabilitatea asupra conformității ansamblului.
- Q3. De ce separăm instrucțiunile de desenele de proiectare?
- Destinatarii și funcțiile sunt diferite. Schemele/desenele susțin proiectarea, verificarea și mentenanța tehnică, în timp ce instrucțiunile trebuie să comunice utilizatorilor instalarea, operarea,

mentenanța și riscurile reziduale într-o formă adecvată competenței lor. Ambele trebuie însă să fie coerente cu aceeași configurație „as-built”.

- Q4. Care este avantajul unei platforme ECAD orientate pe date?
- Posibilitatea de a reutiliza proprietățile și conexiunile dispozitivelor pentru scheme și rapoarte controlate (BOM, borne, cabluri, liste), reducând transcrierile manuale. Avantajul nu este exclusiv unei mărci și nu justifică afirmația că alte soluții ECAD sunt simple „editoare de desene”.
- Q5. De ce este importantă persistența accesului la documentația digitală?
- Pentru ca informațiile cerute să rămână disponibile pe durata prevăzută de regulament și să poată fi asociate configurației corecte a produsului. Soluția trebuie să prevadă identificatori stabili, controlul versiunilor și migrarea URL-urilor fără ruperea accesului.
- Q6. Ce se întâmplă după modificarea unei mașini livrate?
- Se evaluează dacă modificarea fizică sau digitală este substanțială în sensul Regulamentului (UE) 2023/1230. Dacă afectează siguranța printr-un pericol nou sau risc crescut și impune noi protecții/măsuri, persoana care efectuează modificarea poate prelua obligațiile producătorului pentru produsul modificat. Nu există o listă universală de modificări „minore” și „majore”.

10.10 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 10.1. Conținutul documentației tehnice față de livrabilele către beneficiar

Enunț. Clasificați următoarele documente ale stației SAP în: (A) documentație tehnică păstrată de producător, (B) documente livrate beneficiarului, (C) ambele: evaluarea riscului, calculele de dimensionare ale cadrului, manualul de utilizare, declarația UE de conformitate, schemele electrice, rapoartele de validare a funcțiilor de siguranță, lista pieselor de schimb, protocolul FAT.

Răspuns. A: evaluarea riscului, calculele de dimensionare și rapoartele de validare a funcțiilor de siguranță; acestea dovedesc conformitatea și nu se transmit în mod obligatoriu beneficiarului. B: lista pieselor de schimb. C: manualul de utilizare și declarația UE de conformitate (fac parte din documentația tehnică și însoțesc mașina), schemele electrice (necesare mentenanței) și protocolul FAT (dovadă contractuală și de verificare). Încadrarea finală depinde și de contract; obligațiile minime rezultă din Regulamentul (UE) 2023/1230.

Problema 10.2. Modificarea substanțială a unei mașini aflate în exploatare

Enunț. Beneficiarul înlocuiește axa electrică Z a stației SAP cu o variantă care atinge 12 kN și o viteză de coborâre mai mare. Explicați ce trebuie analizat pentru a stabili dacă modificarea este substanțială și care sunt consecințele.

Răspuns. Se analizează dacă modificarea creează un pericol nou sau crește un risc existent în așa fel încât sunt necesare măsuri de protecție noi sau modificarea celor existente. Creșterea forței și a vitezei modifică energia de strivire, timpul de oprire și, prin urmare, distanța de separare a dispozitivelor de protecție (Capitolul 9), deci modificarea este foarte probabil substanțială. În acest caz, cel care o

realizează preia obligațiile producătorului pentru partea afectată: evaluarea riscului actualizată, documentație tehnică, procedura de evaluare a conformității și o nouă declarație. Concluzia se documentează chiar dacă rezultatul este „nesubstanțială”.

Problema 10.3. Controlul versiunilor documentației tehnice

Enunț. După SAT, în programul PLC al stației SAP se modifică pragul de forță al ferestrei OK/NOK, iar în schema electrică se adaugă un senzor. Precizați ce documente se actualizează și cum se asigură trasabilitatea configurației livrate.

Răspuns. Se actualizează: lista I/O și schema electrică (senzorul nou), specificația funcțională a ferestrei de acceptare, manualul de utilizare dacă se schimbă comportamentul vizibil pentru operator, programul PLC cu versiune și sumă de control, iar evaluarea riscului se reverifică pentru a confirma că funcțiile de siguranță nu sunt afectate. Fiecare modificare primește o cerere și un ordin de modificare (ECR/ECO), iar registrul de configurație leagă numărul de serie al mașinii de versiunile documentelor și ale software-ului. Documentația tehnică se păstrează cel puțin perioada impusă de regulament după introducerea pe piață.

PARTEA III

Integrare, fiabilitate și direcții emergente

11 Fiabilitate, FMEA și Design for Reliability

12 Integrare, commissioning și validare

13 Digital Twin și Industry 4.0

14 Tendințe emergente în proiectarea echipamentelor



11 Fiabilitate, FMEA și Design for Reliability

MTBF, MTTR, Weibull, FMEA AIAG–VDA, Action Priority, DfR/DfM și condition monitoring

Despre acest capitol

După proiectare, integrare și demonstrarea conformității, performanța echipamentului trebuie susținută pe întreaga durată de viață. Capitolul 11 tratează dependability din perspectiva proiectantului: fiabilitate, mentenabilitate, disponibilitate și suportabilitate, cu accent pe indicatori corect definiți și pe ipotezele statistice ale modelelor utilizate.

Sunt integrate FMEA/FMECA conform IEC 60812 și, pentru contextul auto, AIAG & VDA FMEA Handbook 2019, Design for Reliability, Design for Maintainability și condition monitoring. Studiul SAP este utilizat didactic; valorile numerice sunt scenarii de proiectare și analiză, nu benchmark-uri universale.

Standarde și referințe normative aplicabile

IEC 60812:2018, FMEA/FMECA: planificarea, efectuarea, documentarea și menținerea analizelor [174].

AIAG & VDA FMEA Handbook, 1st ed. referință industrială pentru DFMEA, PFMEA și FMEA-MSR; metodologia cu 7 pași și Action Priority a fost publicată inițial în 2019, iar aplicarea ei depinde de cerințele clientului/OEM [175].

IEC 60050-192:2015 [176] și IEC 61703:2016 [177]: terminologie de dependability și expresii matematice pentru reliability, availability, maintainability și maintenance support.

IEC 60300-1:2024 [178], IEC 60300-3-4:2022 [179], IEC 60300-3-10:2025 [180] și IEC 60300-3-11:2009 [181]: managementul dependability, specificarea cerințelor, maintainability/maintenance și Reliability-Centred Maintenance.

ISO 17359:2018 [182], ISO 13373-1:2002 [183], ISO 13379-1:2025 [184], ISO 13381-1:2025 [185] și ISO 20816-3:2022 [37]: condition monitoring, măsurarea/diagnosticul vibrațiilor, interpretarea datelor și prognostics, fiecare în domeniul propriu de aplicare.

ISO 281:2007 [47] și ISO 15243:2017 [186], rulmenți: dynamic load ratings/rating life (L10), respectiv clasificarea deteriorărilor și cauzelor de defectare.

ISO 13849-1:2023 [3] și IEC 62061:2021+A1:2024+A2:2026 [4]: context de functional safety pentru sistemele de comandă legate de siguranță; parametrii de fiabilitate din acest capitol nu substituie demonstrarea PL/SIL și validarea cerută de cadrul ales.

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să poziționeze analiza de fiabilitate pe modelul V și să explice rolul ei în deciziile de arhitectură;
- să calculeze și să interpreteze indicatorii de fiabilitate (MTBF, MTTF, MTTR și disponibilitate) pentru sisteme în serie și în paralel;
- să aplice metodologia FMEA AIAG-VDA pe un echipament de fabricație;
- să aplice principiile Design for Reliability și Design for Maintainability;
- să evalueze oportunitatea mentenanței predictive în contextul Industry 4.0.

Cunoștințe prealabile

Capitolul presupune noțiuni de probabilități și statistică (distribuții, în special exponențială și Weibull) la nivelul cursurilor de licență și cunoașterea subsistemelor din Capitolele 3–7.

Glosar de termeni și acronime

Acronimele și termenii tehnici utilizați pe parcursul capitolului sunt definiți la prima apariție și recapitulați în tabelul de mai jos pentru consultare rapidă.

Termen / acronim	Definiție
Fiabilitate (Reliability)	Capacitatea unui item de a îndeplini funcția cerută în condițiile specificate pe durata considerată. În model probabilistic, R(t) este probabilitatea ca timpul până la defectare să depășească t; R(t) este o proprietate a modelului/populației, nu eticheta „perfect/defect” a unui singur echipament.
MTBF	Mean Time Between Failures: măsură medie pentru un item reparabil, definită împreună cu frontiera sistemului, populația, condițiile de utilizare și definiția defectării. Pentru estimări din date se precizează explicit timpul inclus și tratamentul cenzurărilor/opririlor.

Termen / acronim	Definiție
MTTF	Mean Time To Failure: timpul mediu până la defectare, utilizat în principal pentru itemi nereparabili sau atunci când analiza se oprește la prima defectare.
MTTR	Abreviere utilizată în practică pentru mean time to repair sau mean time to restoration. Deoarece frontierele diferă între convenții, proiectul trebuie să precizeze dacă include detecția, diagnosticul, accesul, repararea, reglarea, revalidarea și/sau întârzierile logistice.
Disponibilitate	Availability (A): probabilitatea sau fracția de timp în care itemul este în stare să funcționeze când este solicitat. Relația MTBF/(MTBF+MTTR) este o formă simplificată pentru disponibilitatea staționară a unui model reparabil; disponibilitatea operațională poate include mentenanță planificată și întârzieri logistice.
Rata de defectare	λ (lambda): număr de defecțiuni pe unitate de timp, λ = 1 / MTBF (pentru distribuție exponențială). Folosită în formula $R(t) = e^{-\lambda t}$.
Bathtub Curve	Curba căzii de baie: reprezentare grafică a evoluției ratei de defectare în timp; cele trei zone uzuale sunt mortalitatea infantilă, viața utilă și uzura.
Burn-in	Burn-in: solicitare/operare controlată utilizată în anumite produse pentru screening-ul defectelor timpurii. Durata, nivelul de solicitare și oportunitatea burn-in-ului sunt dependente de tehnologie; nu există o durată universală aplicabilă mașinilor industriale.
Weibull β	Parametrul de formă al distribuției Weibull; β < 1 = rată descrescătoare (defectări timpurii), β = 1 = rată constantă, β > 1 = rată crescătoare (uzură).
B10 / B10d	B10 / B10d: cuantile de durată de viață. B10 indică punctul la care 10 % din populație a cedat în condițiile definite; B10d se referă la defectări periculoase și poate fi utilizat în estimarea MTTFd pentru componente relevante de safety, conform datelor producătorului și standardului aplicabil.
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis: metodă sistematică de identificare proactivă a modurilor de defectare potențiale și a efectelor lor, înainte de apariția defectului.
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis: extindere a FMEA prin evaluarea criticității. Criticality analysis poate utiliza metode calitative sau cantitative adecvate contextului; nu se reduce universal la un produs „severitate × probabilitate”.
AIAG	Automotive Industry Action Group: organizație industrială care publică manuale, ghiduri și resurse de calitate pentru lanțul automotive; co-editor al AIAG & VDA FMEA Handbook.
VDA	Verband der Automobilindustrie: asociația industriei auto germane; prin VDA QMC participă la dezvoltarea și publicarea ghidurilor de quality management, inclusiv handbook-ul FMEA armonizat cu AIAG.
AIAG-VDA 2019	AIAG–VDA FMEA: AIAG & VDA FMEA Handbook, 1st Edition; metodologia armonizată a fost publicată inițial în 2019, iar ediția curent comercializată de AIAG este prima ediție, a două tipărire. Ghidul acoperă Design FMEA, Process FMEA și Supplemental FMEA for Monitoring and System Response; aplicabilitatea contractuală se verifică pentru clientul/OEM relevant.
RPN	Risk Priority Number: produs S × O × D folosit în metodologia clasică AIAG. În AIAG–VDA 2019, RPN este înlocuit în formularul recomandat de Action Priority; RPN rămâne întâlnit în alte metodologii FMEA și în sisteme legacy.
AP	Action Priority: prioritate H/M/L determinată din tabelele AIAG–VDA pe baza combinației S, O și D. AP indică necesitatea de a analiza/optimiza acțiunile; nu este o clasificare juridică a riscului și nu înlocuiește evaluarea de risc safety.

Termen / acronim	Definiție
Severitate (S)	Rating al gravității efectului în metodologia FMEA selectată. În AIAG–VDA se utilizează criterii pe o scară 1–10; valoarea se atribuie din tabelul oficial aplicabil efectului analizat, nu dintr-o descriere generică.
Ocurență (O)	Rating al frecvenței/ocurenței cauzei în metodologia FMEA selectată. Criteriile numerice se iau din tabelul oficial aplicabil (DFMEA/PFMEA) și din date proprii; nu se transferă universal între industrii.
Detecție (D)	Rating al capacității controalelor curente de a detecta cauza sau modul de defectare la timp. Scala exactă și criteriile se iau din metodologia FMEA utilizată.
DfR	Design for Reliability: integrarea cerințelor de fiabilitate în arhitectură, dimensionare, selecția componentelor, analiza defectărilor, verificare și feedback din exploatare, pentru atingerea cerințelor de reliability ale misiunii; obiectivul nu este „maximizarea MTBF” în mod izolat.
DfM	Design for Maintainability: proiectarea pentru mentenabilitate; în acest capitol abreviată DfM. Termenul trebuie distins de Design for Manufacturing, abreviat frecvent tot DfM în alte contexte.
Derating	Utilizarea unei componente la un nivel de solicitare inferior limitei nominale, atunci când datele de catalog, mediul și mecanismul de degradare justifică această practică. Factorul de derating este specific tehnologiei și aplicației.
KISS	Keep It Simple: euristică de proiectare care favorizează soluțiile suficient de simple pentru cerința dată, fără complexitate inutilă; simplitatea nu prevalează asupra safety, performanței sau mentenabilității.
RCM	Reliability-Centred Maintenance: proces structurat pentru dezvoltarea politicilor de failure management/mentenanță pornind de la funcții, defectări funcționale, consecințe și task-uri aplicabile și eficace.
PdM	Predictive Maintenance: abordare de mentenanță care utilizează date de stare și, după caz, prognostics pentru a anticipa degradarea și a planifica intervenția; monitorizarea poate fi continuă sau periodică.
Condition monitoring	Monitorizarea stării unui item prin măsurarea/observarea unor parametri relevanți (de exemplu vibrații, temperatură, curent, presiune), continuu sau periodic, pentru detectarea și urmărirea degradării.
FFT	Fast Fourier Transform: algoritm de descompunere a unui semnal temporal în spectru de frecvențe; folosit pentru analiza vibrațiilor.
IoT / IIoT	Internet of Things / Industrial IoT: rețea de senzori și echipamente conectate la o platformă cloud sau edge pentru colectare și analiză de date.
OEE	Overall Equipment Effectiveness: OEE = Availability × Performance × Quality. Pragurile de performanță sunt specifice procesului și organizației; valoarea de 85 % este un reper popular, nu o cerință normativă universală.
SLA	Service Level Agreement: contract între furnizor și client care definește nivelurile garantate de disponibilitate, timp de răspuns la intervenție etc.
TCO	Total Cost of Ownership: costul total al deținerii unui echipament pe întreaga durată de viață, inclusiv mentenanța, energia, instruirea și piesele de schimb.

Harta capitolului

Parcursul capitolului: §11.1 Poziționarea pe modelul V și rolul fiabilității în proiectare; §11.2 Indicatori de fiabilitate; §11.3 FMEA AIAG-VDA 2019, analiza modurilor de defectare; §11.4 FMEA aplicat pe echipamente, exemple complete; §11.5 Design for Reliability (DfR), proiectarea pentru fiabilitate; §11.6 Design for

Maintainability (DfM), proiectarea pentru mentenabilitate; §11.7 Mentenanța predictivă și Industry 4.0; §11.8 Studiu de caz integrat, analiza fiabilitate pentru stația SAP; §11.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție.

11.1 Poziționarea pe modelul V și rolul fiabilității în proiectare

Capitolul 10 a tratat documentația tehnică și marcajul CE. Conformitatea la introducerea pe piață nu spune însă cât de des va apărea o defectare, cat va dura restaurarea funcției sau ce costuri va produce indisponibilitatea. Aceste întrebări aparțin domeniului dependability: reliability, maintainability, availability și supportability. Cerințele trebuie definite contractual și raportate la misiunea, mediul, profilul de sarcină și politica de mentenanță a echipamentului.

Fiabilitatea nu poate fi garantată doar printr-un test final și nici dedusă din reputația unei componente. Ea se construiește prin cerințe măsurabile, arhitectură robustă, analize de defectare, selecția și dimensionarea componentelor, verificare/validare și actualizarea estimărilor cu date de teren. FMEA, DfR, mentenabilitatea și condition monitoring trebuie introduse în proiectare suficient de devreme pentru a influența deciziile de arhitectură, în logica managementului dependability pe ciclul de viață (Figura 11.1) [178].

Capitolul este structurat în cinci registre interconectate. Secțiunea §11.2 prezintă indicatorii și ipotezele statistice de bază; §11.3 tratează FMEA/FMECA și metodologia AIAG-VDA 2019 în contextul ei corect; §11.4 oferă exemple didactice pe subsisteme; §11.5 și §11.6 tratează DfR, respectiv Design for Maintainability, cu obiectivul de a crește timpul de funcționare fără defect și de a reduce timpul de restaurare; §11.7 leagă modurile de defectare de condition monitoring și mentenanța bazată pe stare.

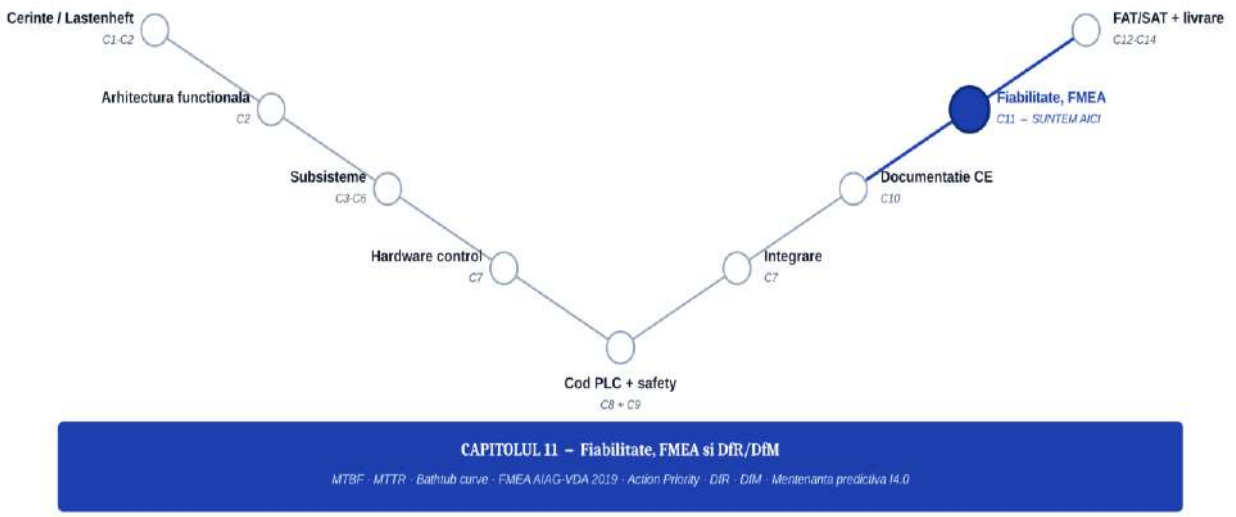


Figura 11.1. Poziționarea Capitolului 11 în ciclul V de proiectare. Cerințele de dependability, FMEA, DfR și mentenabilitate trebuie inițiate în fazele descendente ale proiectării, apoi verificate și actualizate pe ramura de integrare, validare și exploatare; ele nu sunt activități rezervate momentului livrării.

11.2 Indicatori de fiabilitate

Cuantificarea dependability necesită indicatori definiți fără ambiguitate: ce se consideră defectare, ce timp intră în numărător/numitor, ce interval de observație se folosește și ce tip de disponibilitate este contractat. Un caiet de sarcini poate conține cerințe MTBF, MTTR și availability, dar valorile țintă sunt specifice misiunii și trebuie însoțite de metoda de demonstrare și de perioada de evaluare, conform principiilor IEC 60300-3-4 [179].

Secțiunea folosește patru mărimi de bază (MTBF, MTTR, availability A și rata de defectare/hazard) cu terminologia IEC 60050-192 [176] și expresiile matematice din IEC 61703 [177]. Este importantă distincția dintre indicatori observați din date de teren, predicții bazate pe modele și ținte contractuale; aceeași abreviere nu implică automat aceeași metodă de calcul.

11.2.1 Cei patru indicatori fundamentali

Mean Time Between Failures (MTBF) este o măsură medie asociată unui item reparabil. Pentru un istoric simplificat fără cenzurări, MTBF observat poate fi estimat ca timpul total de funcționare T_f împărțit la numărul de defectări n_d; de exemplu, pentru 10.000 h cumulate și 5 defectări:

$$\mathrm{MTBF} = \frac{T_\mathrm{f}}{n_\mathrm{d}} = \frac{10.000}{5} = 2.000\ \mathrm{h} \tag{11.1}$$

În proiecte reale se documentează populația, regimul de funcționare, definiția defectării, perioadele excluse și incertitudinea estimării; valorile de catalog ale componentelor nu se transferă direct la nivel de mașină.

MTTR este utilizat frecvent pentru timpul mediu de reparare/restaurare, dar proiectantul trebuie să precizeze exact frontierele măsurării. Timpul operațional de indisponibilitate poate include detecție, diagnostic, acces, așteptare piese/unelte, reparare, reglare și revalidare. Pentru DfM este util să separe active repair time de logistic/admin delay, deoarece măsurile de proiectare reduc în principal accesul, diagnosticul și repararea, nu toate întârzierile externe.

Disponibilitatea exprimă capacitatea unui item de a fi în stare să funcționeze când este solicitat. Pentru un model reparabil cu rata de defectare și restaurare staționare, o relație simplificată este (Figura 11.2):

$$A = \frac{\mathrm{MTBF}}{\mathrm{MTBF}+\mathrm{MTTR}} \tag{11.2}$$

Această relație aproximează disponibilitatea intrinsecă/staționară și nu trebuie confundată cu disponibilitatea operațională, care poate include mentenanță planificată, întârzieri logistice și alte cauze de oprire. De aceea, o cerință contractuală trebuie să definească explicit fereastra de timp și categoriile de oprire incluse.

Rata de defectare (sau hazardul, în funcție de model) descrie intensitatea defectărilor în timp. Pentru modelul exponențial, cu rată de defectare constantă, sunt valabile relațiile:

$$\lambda = \frac{1}{\mathrm{MTBF}} \tag{11.3}$$

$$R(t) = \mathrm{e}^{-\lambda \mathrm{t}} \tag{11.4}$$

În afara acestei ipoteze, de exemplu la uzură dependentă de vârstă, λ devine funcție de timp, iar o singură valoare MTBF poate ascunde informații importante despre mecanismul de degradare.

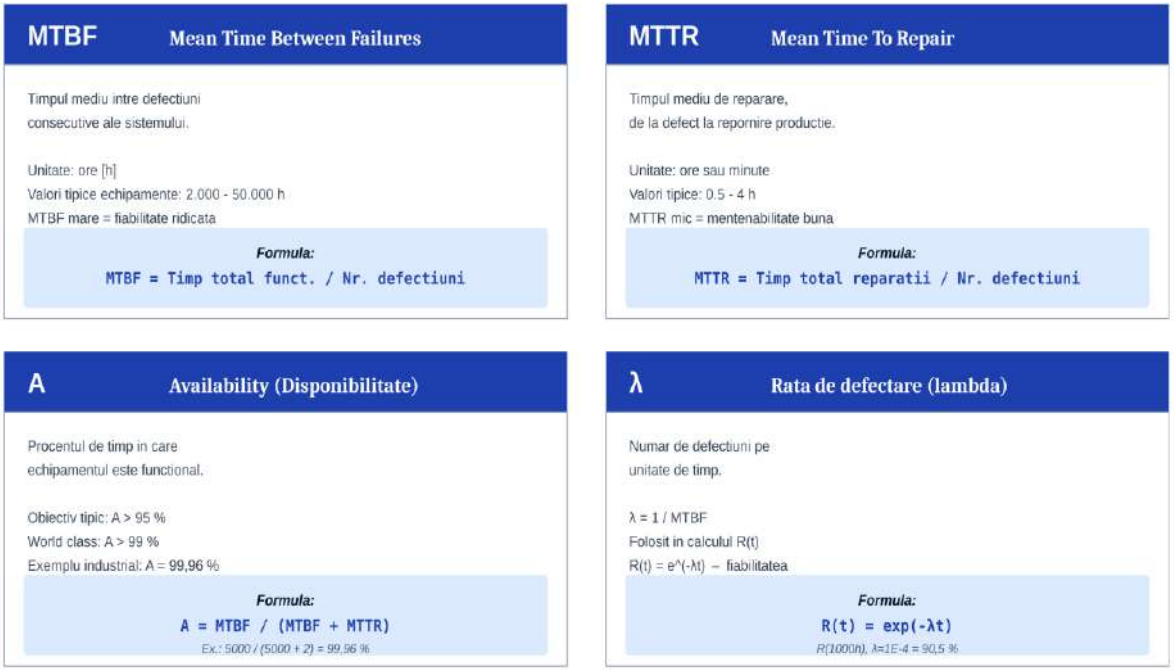


Figura 11.2. Relația dintre MTBF, timpul de reparare/restaurare, availability și rata de defectare în modele simple. Formulele trebuie utilizate împreună cu ipotezele statistice și cu definiția contractuală a timpului de oprire; nu constituie o specificație minimă universală.

În practică · Disponibilitatea: definiți fereastra și timpul de oprire

Aceeași mașină poate avea availability diferită în funcție de definiție. Pentru o cerință contractuală se precizează perioada de raportare (de exemplu rolling 12 luni), orele programate, opririle planificate incluse/excluse, așteptările logistice și sursa datelor. Formula MTBF/(MTBF+MTTR) este utilă pentru un model simplificat, dar KPI-ul operațional se calculează din timpul real de producție și timpul de oprire clasificat unitar.

11.2.2 Bathtub Curve: evoluția ratei de defectare în timp

Curba de tip „bathtub” este un model conceptual util pentru anumite populații de componente: o fază cu rata descrescătoare a defectărilor timpurii, o zonă aproximativ staționară și o fază de uzură cu rata crescătoare (Figura 11.3). Nu toate produsele sau mașinile urmează vizibil această formă, iar limitele temporale dintre zone nu sunt universale. Forma reală se stabilește din date de test/teren și din mecanismul fizic dominant, frecvent prin analiza Weibull.

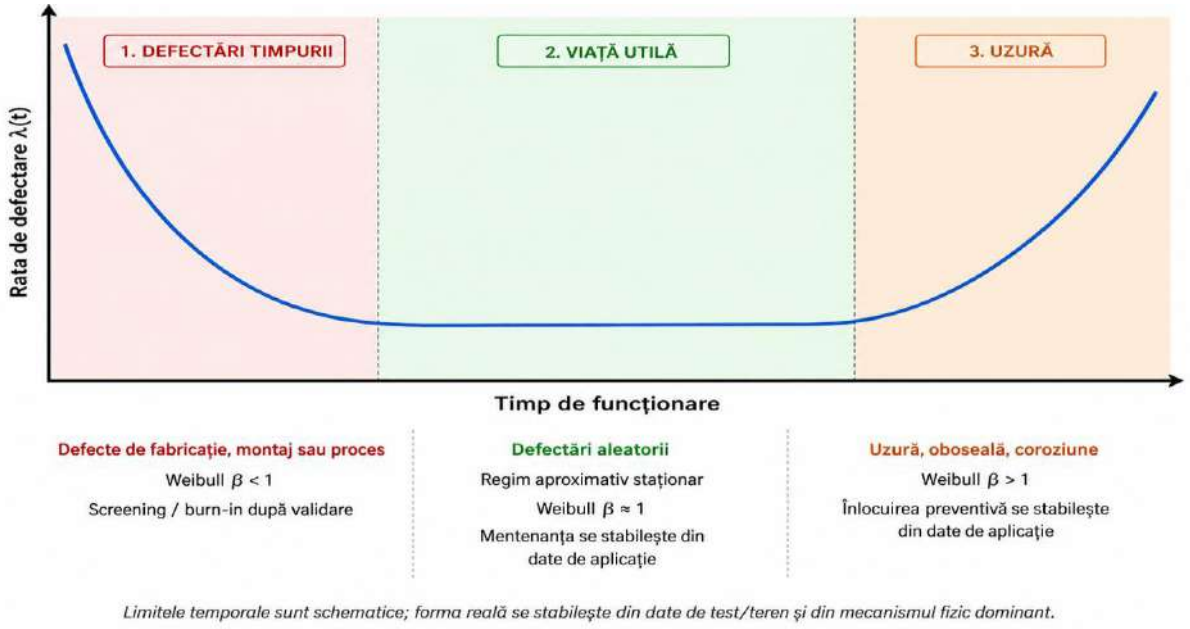


Figura 11.3. Reprezentare conceptuală a curbei bathtub: defectări timpurii, regim aproximativ staționar și uzură. Axele temporale și amplitudinile sunt schematice; strategia de screening, mentenanță sau înlocuire se stabilește din datele aplicației, nu din praguri orare universale.

În zona defectărilor timpurii, rata de defectare poate scădea pe măsură ce sunt eliminate defecte de fabricație, montaj sau proces. Un parametru Weibull $\beta < 1$ este compatibil cu acest comportament. Screening-ul sau burn-in-ul poate fi util pentru anumite tehnologii, în special electronice, dar nivelul și durata trebuie validate; un burn-in excesiv poate consuma inutil durata de viață sau poate introduce solicitări nereprezentative.

În regimul în care rata de defectare este aproximativ constantă, modelul exponențial (Weibull $\beta = 1$) poate fi o aproximație convenabilă. Defectările pot fi dominate de evenimente aleatoare și de variația condițiilor de utilizare. Politica de mentenanță nu rezultă automat din forma curbei: pentru componente fără mecanism de uzură dependent de vârstă, înlocuirea calendaristică poate avea valoare redusă, iar monitorizarea stării sau run-to-failure poate fi mai rațională, în funcție de criticitate.

În regimul de uzură, rata de defectare crește odată cu vârsta sau cu numărul de cicluri; $\beta > 1$ este un indiciu statistic al acestui comportament. Pentru rulmenți, etanșări, ghidaje sau elemente supuse oboselii, intervalele de intervenție se bazează pe date de durată de viață, distribuția populației și consecințele defectării. Condition monitoring poate permite intervenția pe baza stării, dar nu elimină necesitatea limitelor de viață atunci când mecanismul de degradare și riscul o cer [187].

Figura 11.4 reunește exemple didactice de date ipotetice, folosite în exercițiile de fiabilitate și mentenabilitate.

Componentă / sistem	Indicator ipotetic (H)	MTTR (H)	Observație de interpretare
Senzor inductiv (M12, IP67)	500 000 h · MTBF	15 min	Exercițiu de estimare; verificați populația.
Electrovalvă 5/2	100–200 × 10^6 cicluri	30 min	Durabilitate în cicluri; nu MTBF în ore.
Cilindru pneumatic (Ø25–80)	20 000–50 000 h · MTBF	1–2 h	Ipoteză de calcul; regimul de lucru contează.
Contactor AC-3	2–5 × 10^6 cicluri	30 min	Durabilitate; profilul de comutație contează.
Sursă industrială 24 V DC	500 000 h · MTBF	30 min	Necesită condiții termice și date de catalog.
PLC industrial (CPU + I/O)	500 000 h · MTBF	1–4 h	Definiți defectarea și frontiera reparației.
Robot industrial (6 axe)	40 000–80 000 h · MTBF	2–8 h	Ipoteză separată; nu este component SAP v1.
Linie cu 20 de stații	500 h · calcul separat	0,5–2 h	Stații identice cu MTBF 10 000 h: model H.

Reguli de utilizare în proiectare

- Datele sunt exclusiv ipoteze de exercițiu; înlocuiți-le cu date comparabile de catalog, test și teren.
- Ciclurile nu se convertesc în ore fără profilul de utilizare; MTTR depinde de politica de restaurare.
- Exemplu independent: 20 stații în serie, independente, cu hazard constant → MTBF linie = 10 000/20 = 500 h.

Figura 11.4. Exemple exclusiv didactice de date ipotetice (H) pentru exerciții de fiabilitate și mentenabilitate. Valorile nu reprezintă date industriale tipice, performanțe ale SAP sau informații de catalog; indicatorii exprimați în cicluri nu sunt MTBF în ore. Exemplul liniei cu 20 de stații presupune stații identice, independente și hazard constant.

11.2.3 Fiabilitatea sistemelor în serie și în paralel

Un echipament industrial este, din punct de vedere al fiabilității, un sistem complex compus din mii de componente individuale. Calculul fiabilității la nivel de sistem nu este o simplă însumare a fiabilităților componentelor; el depinde de modul în care componentele sunt conectate funcțional, în serie sau în paralel. Această distincție nu este electrică, ci logică: două componente sunt în serie dacă defectul oricăreia oprește funcționarea sistemului; două componente sunt în paralel dacă sistemul funcționează atât timp cât cel puțin una dintre ele funcționează.

Pentru n componente independente în serie,:

$$R_{\text{sistem}}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) \tag{11.5}$$

Dacă toate au distribuții exponențiale, ratele se adună:

$$\lambda_{\text{sistem}} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{11.6}$$

Două exemple trebuie ținute separate: (a) dacă fiecare stație are R(1.000 h) = 0,995, linia cu 20 stații are $R_{\text{linie}}(1.000\ \text{h}) = 0{,}995^{20} \approx 0{,}905$; (b) dacă fiecare stație are MTBF = 10.000 h și aceleași ipoteze exponențiale, $\text{MTBF}_{\text{linie}} \approx 10.000/20 = 500$ h. Prima informație nu implică automat MTBF = 10.000 h.

Pentru două căi redundante independente, active în paralel, o relație simplă este:

$$R_{\text{sistem}} = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \tag{11.7}$$

Pentru $R_1 = R_2 = 0{,}99$ rezultă $R_{sistem} = 0{,}9999$. În sistemele reale trebuie incluse defectele de cauză comună, dependențele, acoperirea diagnosticului, fiabilitatea elementului de comutare și politica de reparare; redundanța poate crește complexitatea și nu trebuie justificată doar prin formula ideală.

În practică · Calcul simplificat de fiabilitate: ipoteze explicite

În §11.8.1, modelul SAP de referință (B) este parametric și include explicit axa electrică Z și CL1/CL2, fără MTBF numeric atribuit. Ratele independente și constante din calculul cu patru cilindri și opt electrovalve aparțin numai exercițiului ALT–RELIABILITY. Orice estimare MTBF este condiționată de limitele de sistem, definiția defectării, BOM și datele utilizate; la proiectarea efectivă se examinează dependențele, defectările comune și incertitudinea.

11.2.4 Specificul mecanic: distribuția Weibull și B10 life

Modelul exponențial este util când hazardul poate fi considerat aproximativ constant. Pentru componente cu uzură, oboseală sau mecanisme dependente de vârstă, distribuția Weibull este mai flexibilă:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] \tag{11.8}$$

unde η este parametrul de scară, iar β parametrul de formă. Alegerea modelului se confirmă prin date și diagnostic statistic, nu doar prin tipul generic „electronic” sau „mecanic”.

$\beta < 1$ este asociat unui hazard descrescător, $\beta = 1$ modelului exponențial, iar $\beta > 1$ unui hazard crescător. Valoarea β este un parametru estimat pentru populația și condițiile studiate; intervalele „tipice” nu trebuie transferate între aplicații fără date. Pentru proiectare, mai importantă decât memorarea unor valori β este identificarea mecanismului de defectare și a variabilei de expunere relevante: ore, cicluri, sarcină, temperatură sau contaminare.

Pentru rulmenții cu rostogolire, ISO 281 [47] definește basic rating life L10, asociată unei fiabilități de 90 % în condițiile modelului standard, precum și durata de viață modificată. Relația de bază este:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{\mathrm{p}} \cdot 10^6 \text{ rotații} \tag{11.9}$$

în care C este capacitatea dinamică de bază (basic dynamic load rating), P, sarcina dinamică echivalentă, iar p, exponentul specific tipului de rulment. Conversia în ore și utilizarea factorilor de modificare trebuie făcute cu turația, lubrifierea, contaminarea și nivelul de fiabilitate cerut explicit.

11.3 FMEA AIAG-VDA 2019: analiza modurilor de defectare

Indicatorii de fiabilitate prezentați în §11.2 sunt valori statistice agregate, utile pentru estimarea costului de viață și pentru clauzele SLA, dar insuficiente pentru a ghida proiectarea efectivă. Un MTBF de 5.000 ore nu spune proiectantului ce componentă să îmbunătățească pentru a ajunge la 10.000 ore. Această lacună o umple FMEA, Failure Mode and Effects Analysis: metodă sistematică de identificare proactivă a modurilor de defectare individuale și a efectelor lor asupra sistemului.

FMEA este o metodă inductivă de analiză a modurilor de defectare și a efectelor. IEC 60812:2018 oferă cadrul generic FMEA/FMECA [174]. În automotive, AIAG și VDA au publicat handbook-ul comun care introduce abordarea în 7 pași, formulare revizuite și Action Priority [175]. Handbook-ul este o referință industrială importantă, nu un standard armonizat european de safety al mașinilor.

11.3.1 RPN versus Action Priority: paradoxul rezolvat

Risk Priority Number (RPN) din metodologia AIAG anterioară handbook-ului armonizat este produsul S × O × D [188]. Slăbiciunea sa este că produse identice pot proveni din combinații cu semnificație diferită și că pragurile numerice de acceptare pot ascunde severități mari. Praguri de tip RPN > 100 nu sunt reguli universale ale FMEA și nu trebuie utilizate ca criteriu automat de acceptare a riscului [175].

AIAG–VDA utilizează Action Priority (AP) pentru prioritizarea acțiunilor pe baza combinației S, O și D (Figura 11.5). Tabelele AP conduc la H, M sau L și trebuie aplicate direct din handbook-ul oficial pentru tipul de FMEA [175]. AP nu înseamnă „risc acceptabil/neacceptabil” și nu înlocuiește analiza de risc safety. Pentru prioritățile care impun sau recomandă optimizare, echipa analizează acțiuni de prevenire/detecție și documentează decizia; severitatea nu este modificată prin simpla îmbunătățire a detecției.

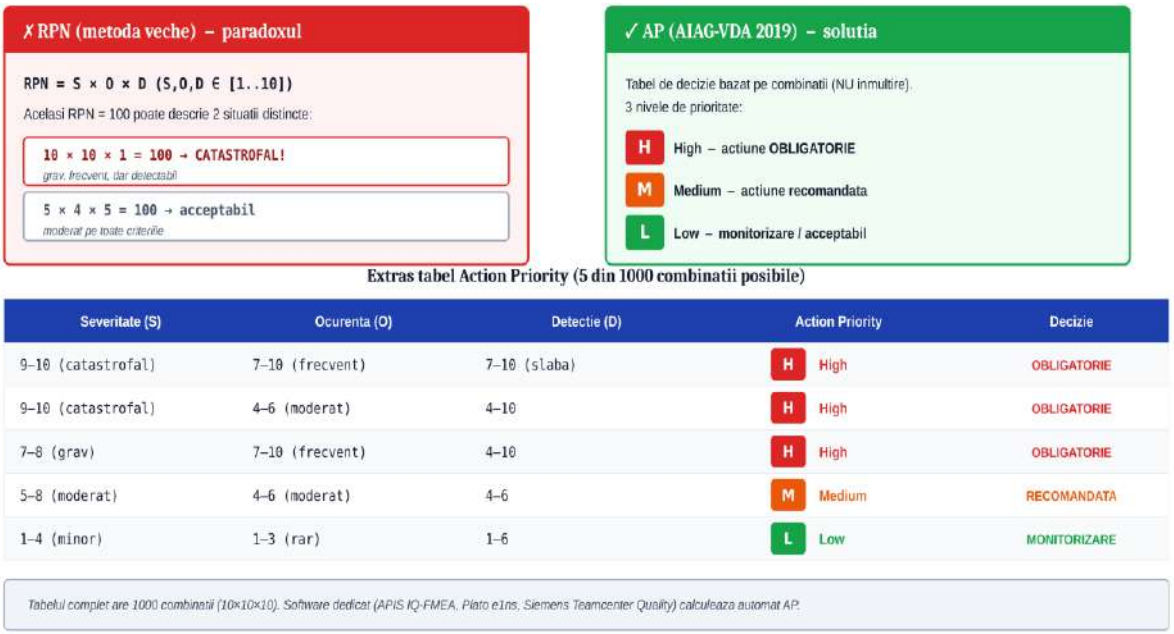


Figura 11.5. Comparație între RPN și Action Priority în metodologia AIAG-VDA 2019. AP folosește combinația S-O-D pentru a orienta acțiunile; valorile din figură sunt didactice, iar prioritatea reală se determină cu tabelele oficiale ale handbook-ului.

AIAG descrie handbook-ul drept referință pentru dezvoltarea DFMEA, PFMEA și FMEA-MSR [175]. În proiectele automotive, metoda efectiv cerută trebuie verificată în documentele contractuale și în Customer-Specific Requirements ale clientului/OEM; nu se presupune o cerință identică pentru toate lanțurile de furnizare. Pentru un producător de echipamente din afara lanțului auto, IEC 60812 [174] rămâne referința generică, iar AIAG–VDA poate fi adoptat ca metodă internă dacă este adecvat contextului.

11.3.2 Cei 7 pași metodologici

Metodologia AIAG–VDA organizează analiza în șapte pași: Planning and Preparation, Structure Analysis, Function Analysis, Failure Analysis, Risk Analysis, Optimization și Results Documentation [175]. Avantajul principal este trasabilitatea dintre structură, funcții, lanțurile cauză–mod–efect, controalele existente și acțiunile de optimizare (Figura 11.6). Pentru echipamente industriale, metoda trebuie adaptată domeniului de aplicare și corelată cu analiza de risc safety, nu suprapusă peste aceasta.



Figura 11.6. Cei 7 pași ai metodei AIAG-VDA FMEA. Primele trei etape definesc contextul, structura și funcțiile; etapele 4-5 construiesc lanțurile de defectare și prioritizează acțiunile; etapele 6-7 optimizează și documentează rezultatele.

Pasul 1. Planificare și pregătire (Planning and Preparation) definește scopul, limitele analizei, ipotezele, echipa multidisciplinară și informațiile de bază reutilizabile. Livrabilul este un cadru de lucru FMEA cu obiect, interfețe, responsabilități și criterii de actualizare. Efortul depinde de noutatea produsului, complexitate și maturitatea informațiilor disponibile; nu există un număr universal de pagini sau ore-om.

Pasul 2. Analiza structurii (Structure Analysis) descompune obiectul analizat în niveluri coerente: sistem, subsisteme, elemente și interfețe. Scopul nu este obținerea unui arbore cât mai detaliat, ci definirea unei structuri care permite trasabilitatea funcțiilor, defectărilor și cauzelor. Structura poate fi gestionată într-un instrument FMEA dedicat, PLM/ALM sau într-un tabel controlat, în funcție de amploarea proiectului.

Pasul 3. Analiza funcțiilor (Function Analysis) asociază fiecărui element funcțiile și cerințele sale, inclusiv mărimi măsurabile și condiții de operare. De exemplu, pentru un cilindru se pot defini forța, cursa, timpul de mișcare și comportamentul la pierderea energiei; pentru un senzor, domeniul de detecție, timpul de răspuns și condițiile de mediu. Modurile de defectare se formulează față de funcții bine definite; fără această legătură, analiza devine o listă generică de defecte.

Pasul 4. Analiza defectărilor (Failure Analysis) construiește lanțurile cauză → mod de defectare → efect, ținând seama de nivelul structural și de interfețe. Pentru aceeași funcție pot există pierderea funcției, funcție degradată, intempestivă, intermitentă sau în afara toleranței. Numărul de linii FMEA rezultă din acoperirea funcțiilor și a mecanismelor relevante, nu dintr-o țintă numerică prestabilită.

Pasul 5. Analiza riscului (Risk Analysis) atribuie ratingurile S, O și D conform tabelelor și criteriilor metodei FMEA aplicate și determină Action Priority folosind tabelele oficiale AIAG-VDA pentru tipul de FMEA. Evaluările trebuie justificate prin cerințe, controale existente, date de teren, testare sau judecată inginerească documentată. AP este un instrument de prioritizare a optimizării și nu înlocuiește evaluarea riscului de securitate a mașinii.

Pasul 6. Optimizare (Optimization) stabilește acțiuni de prevenire și/sau detecție, cu responsabil, termen și dovadă de implementare. Pentru AP ridicat se analizează prioritar măsuri de îmbunătățire și se documentează decizia; pentru celelalte niveluri se aplică logica și cerințele exacte ale handbook-ului și ale clientului. După acțiuni, ratingurile se reevaluează numai dacă s-au schimbat efectiv cauzele, controalele sau efectele; scăderea AP nu este un obiectiv formal în sine.

Pasul 7. Documentarea rezultatelor (Results Documentation) sintetizează scopul, rezultatele, acțiunile implementate și riscurile tehnice rămase. FMEA poate constitui o dovadă inginerească valoroasă în documentația proiectului și poate fi cerută contractual de client, dar Regulamentul mașinilor nu impune în mod generic un „raport FMEA" ca document distinct și nici declarația UE de conformitate nu enumeră FMEA ca element obligatoriu. Pentru safety, FMEA nu substituie evaluarea riscului ISO 12100 sau validarea funcțiilor de siguranță.

În practică · Instrumente software FMEA

Spreadsheet-ul poate fi suficient pentru analize mici și controlate; pentru proiecte cu reutilizare, versiuni, multe acțiuni și legături între System/Design/Process FMEA, un instrument dedicat poate îmbunătăți trasabilitatea. Selecția se face după metoda acceptată de client, controlul versiunilor, integrarea cu PLM/requirements și exportul auditabil; costul și economia de timp se evaluează local, nu prin procente universale.

11.4 FMEA aplicat pe echipamente: exemple complete

Secțiunile §11.2 și §11.3 au prezentat cadrul teoretic. Exemplele următoare sunt scenarii didactice construite pentru a exersa lanțul funcție → mod de defectare → efect → cauză → controale → S/O/D → AP. Valorile S/O/D sunt ipoteze de exercițiu, iar AP este lăsat intenționat „de determinat" cu tabelul oficial AIAG–VDA; intervalele de mentenanță și pragurile de diagnostic trebuie stabilite din date OEM, încercări și istoric de proces, nu preluate din exemplu.

Formatul tabelar este o simplificare didactică inspirată de logica AIAG–VDA [175], nu reproducerea formularului oficial. Sunt păstrate componentele necesare pentru exercițiu: obiectul analizat, funcția/modul de defectare, efectul, cauza, S/O/D, AP și acțiunea, iar controalele de prevenire/detecție, responsabilul, termenul și evaluarea după acțiune pot fi dezvoltate în proiectele de laborator. AP nu se deduce printr-o formulă și trebuie determinat din tabelul oficial aplicabil.

11.4.1 FMEA pneumatic: variantă ALT–PNEU / ALT–PRODUCT / ALT–THROUGHPUT

Contextul exemplului este o variantă didactică, separată de SAP de referință: asamblare de modul electronic PCB–carcasă–conector, cu presare pneumatică și cadență țintă 360 piese/oră (ALT–PRODUCT + ALT–PNEU + ALT–THROUGHPUT). Tabelul 11.1 este o demonstrație FMEA a acestei configurații și nu poate furniza automat valorile de fiabilitate ale axei electrice SAP. Distribuitorul 5/2 poate avea revenire prin arc sau comandă bistabilă; o poziție centrală ar necesita un distribuitor 5/3 cu centru specificat. Diametrul Ø100 mm și presiunea de 7 bar nu demonstrează singure forța utilă de 8 kN; amplificarea, pierderile și limitele componentelor trebuie calculate. Ratele de defectare, duratele și ratingurile FMEA sunt exclusiv ipoteze de exercițiu.

Tabelul 11.1. Exemplu FMEA pentru varianta ALT–PRODUCT + ALT–PNEU + ALT–THROUGHPUT (modul electronic, presare pneumatică și 360 piese/oră). Valorile S/O/D sunt ipoteze didactice; AP* se determină din tabelul oficial AIAG–VDA. Cauzele, pragurile și intervalele de mentenanță nu descriu configurația de referință SAP.

Componentă (ALT–PNEU)	Mod defectare	Efect (sistem)	Cauză	S	O	D	AP*	Acțiune / măsură propusă
Cilindru principal de presare	Forță de presare insuficientă față de fereastra procesului	Piesă NOK / asamblare incompletă	Uzură sau contaminare a garniturilor, scurgeri, presiune disponibilă insuficientă	**8**	**4**	**3**	**de determinat**	Monitorizarea presiunii și/sau a forței; verificarea etanșeității; interval de înlocuire stabilit din date OEM și trendul de stare.
Electrovalvă 5/2 pilotată	Nu comută sau comută lent	Ciclul nu se finalizează; oprire și alarmă	Defect bobină, contaminare, presiune pilot insuficientă sau blocare mecanică	**9**	**2**	**2**	**de determinat**	Monitorizarea timpului de comutare/confirmării; filtrare conform cerințelor componentei; diagnostic și piesă de schimb justificată prin criticitate.
Amplificator de presiune (booster)	Presiune de ieșire insuficientă	Forță efectivă redusă; piesă NOK	Scurgere internă, uzură a etanșărilor sau alimentare necorespunzătoare	**7**	**3**	**5**	**de determinat**	Senzor de presiune pe circuitul relevant; verificarea etanșeității și a performanței conform datelor producătorului și trendului măsurat.
Senzor magnetic de poziție	Semnal fals / lipsă	PLC nu confirmă poziția; stop ciclu	Deplasare/aliniere, cablu sau conector defect, degradarea senzorului/magnetului	**6**	**5**	**2**	**de determinat**	Fixare robustă, protecția cablului, diagnostic de plauzibilitate și verificare periodică adaptată mediului/ciclurilor.
Unitate FRL / filtrare aer	Restricție de debit / cădere de presiune excesivă	Cadență redusă și/sau mișcări pneumatice neconforme	Încărcarea filtrului, condens/contaminare sau întreținere insuficientă	**5**	**6**	**4**	**de determinat**	Monitorizarea presiunii/căderii de presiune unde este justificată; mentenanță conform specificației FRL și condiției reale a aerului.

Interpretarea Tabelului 11.1 trebuie făcută ca exercițiu didactic. Coloana AP* este lăsată intenționat necompletată, deoarece prioritatea se determină din tabelele oficiale AIAG–VDA după justificarea ratingurilor S/O/D; tabelul nu demonstrează nici fiabilitatea intrinsecă a subsistemului, nici absența riscurilor safety. În proiectul real se verifică separat analiza de risc de securitate a mașinii, iar pentru reliability se validează cauzele, controalele și frecvențele prin date de teren și testare.

11.4.2 FMEA subsistem electric: linie de îmbuteliere alimentar

Contextul celui de-al doilea exemplu este diferit ca scară și tip de impact: o linie de îmbuteliere cu cadență ridicată, pentru care exercițiul presupune un cost al opririi de 8.000 EUR/oră. Această ipoteză

economică modifică efectele urmărite și justificarea acțiunilor, dar ratingurile FMEA trebuie stabilite conform rubricilor metodei aplicabile, nu direct din cost. Subsistemul electric analizat include VFD-ul motorului principal, servomotorul axei de etichetare, sursa DC 24 V, protecțiile ramurilor și contactorul principal.

Tabelul 11.2. Exemplu didactic FMEA pentru subsistemul electric al unei linii de îmbuteliere. Valorile S/O/D sunt ipoteze de exercițiu; AP* este lăsat de determinat cu tabelul oficial AIAG–VDA și cu cerințele clientului.

Componentă	Mod defectare	Efect (sistem)	Cauză	S	O	D	AP*	Acțiune / măsură propusă
VFD pe motor principal conveior	Supratemperatură / declanșare protecție	Stop motor → stop linie	Răcire insuficientă, contaminarea filtrului/ventilației, suprasarcină sau mediu necorespunzător	**9**	**3**	**4**	**de determinat**	Monitorizarea temperaturii și alarmelor interne; dimensionare/ventilație conform producătorului; mentenanța filtrării și strategie de spare justificată prin criticitate.
Servomotor + encoder axă etichetare	Pierdere / degradare semnal encoder	Stop axă, piesă NOK sau reinițializare	Cablu/conector deteriorat, flexiuni repetate, ecranare/rutare necorespunzătoare sau defect encoder	**9**	**2**	**3**	**de determinat**	Cablu adecvat aplicației și razei de flexiune; rutare/ecranare corectă; strain relief și diagnostic al semnalului/drive-ului.
Sursă DC 24 V pentru control	Pierderea tensiunii de ieșire	Pierdere control PLC/I/O/HMI; stop instalație	Suprasarcină, temperatură, îmbătrânirea componentelor sau defect intern	**10**	**2**	**2**	**de determinat**	Verificarea profilului de sarcină și derating-ului; diagnostic al alimentării; redundanță/UPS numai dacă analiza de disponibilitate și safe shutdown o justifică.
Protecție ramură secundară (MCB/fuzibil)	Declanșare nedorită	O ramură/stație se oprește	Selectarea necorespunzătoare a protecției, curent de pornire sau coordonare/selectivitate insuficientă	**5**	**4**	**2**	**de determinat**	Dimensionare și coordonare conform sarcinii, curentului de scurtcircuit și documentației producătorului; verificare în schema ECAD.

Compararea celor două tabele evidențiază o lecție esențială: același mod de defectare poate avea efecte diferite în contexte operaționale diferite. Valorile S/O/D din exemple sunt ipoteze didactice și nu se transferă între proiecte; pentru fiecare echipament se evaluează efectul, frecvența cauzei și capabilitatea controalelor pe baza rubricilor aplicabile și a datelor disponibile, iar AP se determină cu tabelul oficial (Tabelul 11.2). FMEA de bază poate fi reutilizat ca structură, dar ratingurile și acțiunile se revalidează pentru configurația și misiunea concretă.

În practică · FMEA pe niveluri pentru o linie complexă

Pentru o linie cu mai multe stații, un singur tabel global poate deveni dificil de navigat și de menținut. O abordare practică este distribuirea analizei pe niveluri coerente, astfel încât fiecare echipă să poată controla funcțiile, interfețele și acțiunile care îi revin.

Un System FMEA poate trata funcțiile și interfețele la nivel de linie; FMEA-urile de stație/subsistem dezvoltă funcțiile locale; analize la nivel de componentă se introduc numai unde complexitatea, noutatea sau criticitatea o justifică. Dimensiunea fiecărei analize rezultă din proiect și nu dintr-un număr prestabilit de linii.

Legăturile cauză–mod–efect între niveluri și controlul versiunilor sunt esențiale. Un mod de defectare la un nivel inferior poate deveni cauză pentru nivelul superior, iar efectul la nivel de stație poate deveni efect sau intrare de analiză pentru nivelul de linie. Instrumentele dedicate pot sprijini această trasabilitate, dar structura trebuie definită de echipa de proiect.

11.4.3 FMEA subsistem mecanic: stație de presare auto

Exemplele anterioare au tratat subsistemele pneumatic și electric. În FMEA, subsistemul mecanic (cadrul portant, ghidajele, arborii, rulmenții și cuplajele) trebuie analizat cu aceeași rigoare. Modurile sale de degradare pot evolua pe intervale mai lungi și pot necesită date diferite de cele folosite pentru electronică sau control, de exemplu sarcini, cicluri, lubrifiere, contaminare, uzură și oboseală.

Această secțiune prezintă un exemplu FMEA pentru un mecanism convențional cu arbore cu camă, rulmenți, ghidaje și reductor, tratat ca ALT–MECH distinct (Tabelul 11.3). Modurile de defectare și ratingurile sale sunt ilustrative și nu descriu obligatoriu transmisia axei electrice din SAP de referință. Înainte de transferul către SAP se înlocuiesc componentele inexistente în BOM și se refac funcțiile, cauzele, datele și verificările.

Tabelul 11.3. Exemplu FMEA pentru mecanismul convențional cu camă ALT–MECH, distinct de axa electrică Z a SAP. Valorile S/O/D sunt ipoteze didactice; AP* se determină din tabelul oficial. Mecanismele de deteriorare ale rulmenților pot fi corelate cu ISO 15243 [186], iar duratele de viață se calculează pentru condițiile reale de sarcină și mediu.

Componentă (ALT–MECH)	Mod defectare	Efect (sistem)	Cauză	S	O	D	AP*	Acțiune / măsură propusă
Rulment pe arbore cu camă	Degradare / gripare / deteriorarea elementelor rulante	Stop mecanism; posibilă deteriorare secundară	Lubrifiere insuficientă, contaminare, sarcină/temperatură necorespunzătoare sau montaj incorect	9	3	4	de determinat	Calcul de durată conform ISO 281; condiții de lubrifiere/montaj conform OEM; condition monitoring justificat prin criticitate și mecanism de degradare.
Ghidaje liniare ale traversei	Uzură / creștere jocului	Poziționare degradată, vibrații și piese NOK	Contaminare, lubrifiere insuficientă, sarcină sau aliniere necorespunzătoare	7	4	5	de determinat	Protecție la contaminare, lubrifiere conform OEM și verificarea periodică a jocului/aliniamentului cu metodă de măsurare definită.

Componentă (ALT–MECH)	Mod defectare	Efect (sistem)	Cauză	S	O	D	AP*	Acțiune / măsură propusă
Șuruburi de fixare carcasă motor	Slăbire / pierderea pretensionării	Vibrații, dezaliniere și solicitarea cuplajului/transmisiei	Pretensionare sau suprafețe de contact necorespunzătoare, vibrații și cicluri de sarcină	8	5	6	de determinat	Dimensionarea îmbinării și cuplului de strângere; metodă anti-slăbire validată; verificare la interval stabilit din criticitate și experiența de exploatare.
Arbore intermediar: zonă cu concentrator	Inițiere / propagare fisură de oboseală	Stop mecanism; posibilă deteriorare a componentelor asociate	Concentrator geometric, spectru de sarcină, material/tratament sau finisaj necorespunzător	10	2	8	de determinat	Redesign geometric și calcul de oboseală cu spectrul real de sarcină; material/tratament și metodă NDT stabilite în funcție de criticitate și cerințele de proiectare.
Cuplaj elastic motor–reductor	Degradarea elementului elastic	Joc/rigidizare, vibrații sau suprasarcini în transmisie	Îmbătrânire termică, solicitare ciclică, contaminare sau dezaliniere	6	5	3	de determinat	Selecție conform cuplului și mediului; aliniere corectă; inspecție și înlocuire conform datelor OEM și stării observate.
Etanșare arbore ieșire reductor	Pierdere de etanșeitate	Pierdere lubrifiant; risc de degradare a reductorului	Uzură, contaminare, deteriorarea suprafeței sau dezaliniere	7	4	4	de determinat	Protecție la contaminare, verificarea/alinierea arborelui și selectarea etanșării pentru mediul real; inspecție/trending al scurgerilor.

Trei observații sunt utile. (1) Prioritatea unei acțiuni nu se reduce la frecvența defectării; efectul, controalele de prevenire/detecție și contextul sistemului sunt la fel de importante. (2) Multe măsuri eficiente sunt măsuri de proiectare (geometrie, factor de siguranță, lubrifiere, protecție la contaminare) și trebuie implementate înainte de design freeze. (3) Condition monitoring este justificat numai dacă există un mecanism de degradare observabil și o decizie de mentenanță asociată semnalului măsurat.

11.5 Design for Reliability (DfR): proiectarea pentru fiabilitate

Design for Reliability (DfR) integrează fiabilitatea în procesul de proiectare: cerințe, arhitectură, dimensionare, selecția componentelor, analiza defectărilor, verificare și feedback din exploatare. Costul modificărilor tinde să crească pe măsură ce proiectul avansează, motiv pentru care prevenirea defectelor în faza de concept este preferabilă corecției tardive; regula populară „1-10-100” trebuie tratată ca euristică, nu ca lege economică universală.

În acest capitol, patru principii sunt utilizate ca organizare didactică a DfR (Figura 11.7): (1) reducerea controlată a solicitării/derating; (2) redundanța sau toleranța la defect, atunci când analiza de criticitate o justifică; (3) simplitate și reducerea dependințelor inutile; (4) componente și tehnologii cu date de performanță, calificare și suport adecvate. Nici furnizorul, nici prețul sau eticheta „Tier-1” nu reprezintă în sine o garanție de fiabilitate.



Figura 11.7. Patru direcții DfR utilizate în capitol: derating, redundanța/toleranța la defect, simplitate și utilizarea componentelor cu date dovedite. Efectul asupra MTBF se cuantifică pentru aplicația concretă; nu există factori universali de îmbunătățire.

11.5.1 Derating: operare sub capacitatea nominală

Derating înseamnă limitarea solicitării față de rating-ul componentei atunci când mecanismul de degradare, mediul și datele producătorului susțin această practică. Nu există un procent universal 60-80 %. Pentru electronică se pot aplica reguli privind temperatura, tensiunea și puterea; pentru actuatoare, presiune, forță, viteză și ciclu de lucru; pentru mecanică, tensiuni, sarcini și durată de oboseală. Factorul se justifică prin standard, date de catalog, model sau test.

Exemplu de metodă, nu de regulă: pentru un cilindru, proiectantul verifică forța necesară cu presiunea minimă garantată, frecarea și factorii dinamici, apoi alege diametrul care oferă marja fără a supradimensiona inutil. Pentru contactoare se folosesc categoria de utilizare și curenții/ciclurile din catalog; pentru surse DC se verifică puterea, temperatura ambiantă și curbele de derating ale producătorului. Durata de viață nu se presupune că se dublează doar pentru că solicitarea a fost redusă.

La motoare, temperatura înfășurărilor și sistemul de izolație influențează durata de viață, dar estimarea nu se face dintr-o singură temperatură sau dintr-un factor de siguranță generic. Se verifică regimul S1/Sx, clasa termică, creșterea de temperatură, ciclul de sarcină, ventilația, altitudinea și curbele producătorului. Selecția unei clase de izolație superioare poate crește marja termică, însă beneficiul de fiabilitate trebuie demonstrat pentru aplicație.

Pentru structuri și organe de mașini, „derating” se exprimă mai corect prin verificări de rezistență, stabilitate și oboseală cu factori de siguranță adecvați codului de proiectare, incertitudinilor și consecințelor. Valorile FS nu se aleg dintr-un interval universal; pentru oboseală se utilizează curbe S-N, efectul concentratorilor, finisajul, dimensiunea, solicitarea medie și spectrul real de sarcină.

Criteriile Goodman, Soderberg sau Gerber pot fi utile în calcule simplificate de oboseală cu tensiune medie, dar alegerea lor depinde de material, datele disponibile și nivelul de conservatorism. Pentru piese critice se preferă metoda aprobată de standardul/ghidul aplicabil, analiza spectrului de încărcare și, când este necesar, validare experimentală. Concentratorii de tensiune se tratează prin Kt/Kf și sensibilitatea la crestătură, nu printr-un singur factor generic.

11.5.2 Redundanța: componente critice duplicate

Redundanța poate crește fiabilitatea funcțională sau disponibilitatea atunci când o cale poate prelua funcția alteia. Formula ideală pentru două căi independente nu surprinde defectele de cauză comună, diagnosticul, comutarea și mentenanța. În safety, redundanța este parte a unei arhitecturi validate conform ISO 13849-1/IEC 62061; nu trebuie confundată cu redundanța operațională destinată continuității producției.

Justificarea redundanței se face prin analiza de criticitate și life-cycle cost: costul și probabilitatea timpului de oprire, consecințele pentru calitate/safety, probabilitatea defectelor comune, costul testării și mentenanței suplimentare. Sursele redundante, controlerele sau rețelele pot fi adecvate pentru procese continue, dar pragurile economice și timpii de switchover sunt specifici proiectului și produsului selectat.

Pentru componente cu defectare ușor detectabilă, înlocuire rapidă și consecințe reduse, redundanța poate adaugă cost și moduri de defectare fără beneficiu suficient. Alternativele sunt derating, diagnostic, spare-part disponibil, design modular sau eliminarea cauzei dominante. Decizia se documentează prin FMEA/FTA, availability analysis și costul ciclului de viață, nu printr-un prag universal de EUR/oră sau MTBF.

11.5.3 Simplitate: reducerea complexității inutile

Simplitatea urmărește eliminarea elementelor, interfețelor și modurilor de funcționare care nu aduc valoare cerinței. Pentru componente independente în serie, reducerea numărului de elemente poate îmbunătăți fiabilitatea; efectul procentual depinde însă de ratele de defectare individuale, nu doar de numărul de piese. O soluție mai simplă este preferabilă numai dacă satisface funcționalitatea, safety, testabilitatea și mentenabilitatea.

Exemple de simplificare: acționare on/off în locul unei axe servo atunci când nu este necesară poziționarea continuă; reducerea numărului de conversii și adaptoare; cablare modulară și conectori industriali atunci când condițiile de mediu o permit; algoritmi de control cu complexitate proporțională cu

cerința. Nu se presupune automat ca o tehnologie mai simplă are MTBF mai mare; se compară arhitectura, datele și modurile de defectare.

11.5.4 Componente dovedite și criterii de selecție a furnizorilor

Componentele „dovedite” sunt cele pentru care proiectantul dispune de specificații clare, date de durată de viață/fiabilitate relevante, certificări necesare, informații de diagnostic, suport pe ciclul de viață și control al modificărilor. Selecția poate favoriza furnizori consacrați, dar criteriul este calitatea dovezilor și adecvarea la misiune, nu marca. Pentru componente safety se verifică documentația certificată și datele B10d/MTTFd/PFH furnizate pentru utilizarea prevăzută.

Comparația între furnizori trebuie făcută pe total cost of ownership și risc: rata reală de defectare în condiții comparabile, lead time, obsolescența, calitatea datelor CAD/ECAD, disponibilitatea pieselor, suportul și costul validării. Procente de tip „30-50 % MTBF mai mic” pentru componente no-name nu sunt transferabile fără studii comparative; astfel de afirmații se înlocuiesc cu criterii măsurabile de selecție și cu calificare la furnizor.

Standardizarea portofoliului de componente poate reduce varietatea de spare-parts, timpul de instruire și erorile de integrare. Numărul de furnizori, discountul și politica de dual-sourcing sunt decizii de supply-chain și criticitate. În DfR, standardizarea este utilă dacă nu forțează utilizarea unei componente în afara domeniului optim și dacă se păstrează o strategie pentru obsolescența și continuitatea aprovizionării.

11.6 Design for Maintainability (DfM): proiectarea pentru mentenabilitate

Dacă DfR urmărește creșterea reliability, Design for Maintainability urmărește reducerea timpului și efortului de restaurare a funcției. În acest capitol se folosește abrevierea DfM pentru maintainability, cu mențiunea ca în literatura de product development DfM înseamnă frecvent Design for Manufacturing. Reliability ridicată și maintainability bună contribuie împreună la availability, dar valoarea operațională depinde și de suport logistic și politica de mentenanță.

Mentenabilitatea trebuie tratată ca cerință de proiectare, nu ca activitate de service apărută după livrare. Se definesc task-uri de mentenanță, timpi țintă, acces, unelte, ergonomie, modularitate, diagnostic, testabilitate, consumabile, piese de schimb și instrucțiuni (Figura 11.8). IEC 60300-3-10:2025 oferă un cadru actual pentru integrarea maintainability și maintenance pe ciclul de viață [180].

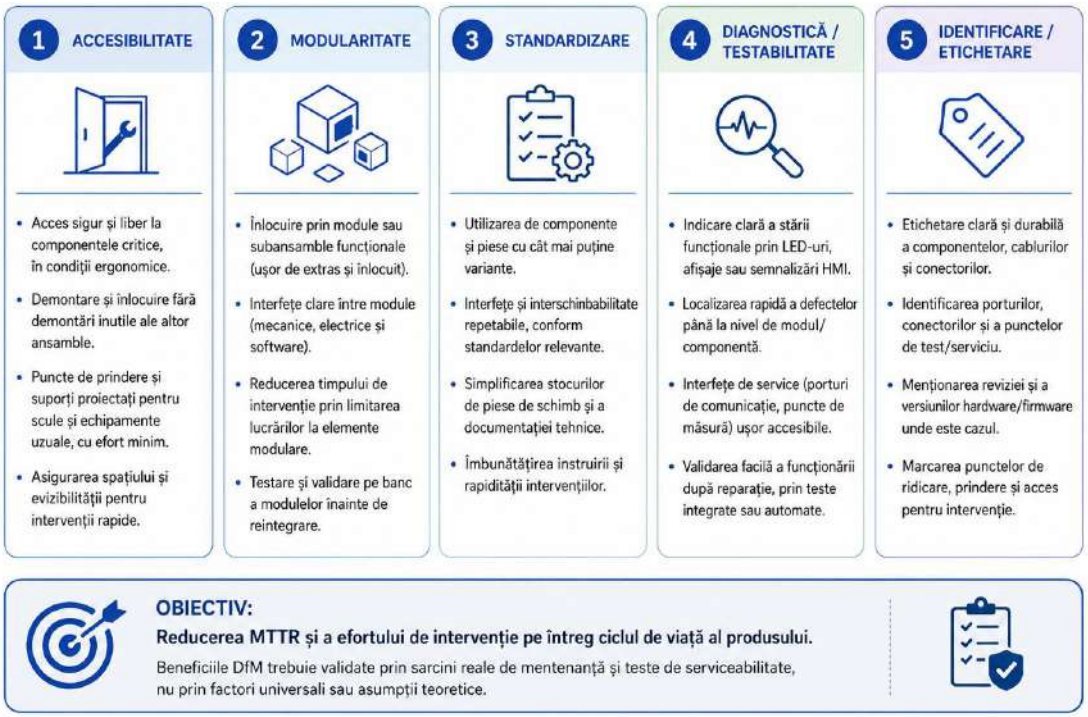


Figura 11.8. Cinci direcții DfM utilizate didactic: accesibilitate, modularitate, standardizare, diagnostic/testabilitate și identificare/etichetare. Impactul asupra MTTR se măsoară prin task-uri de mentenanță și teste de serviceability, nu prin factori universali.

11.6.1 Accesibilitate și modularitate

Accesibilitatea înseamnă proiectarea task-ului de mentenanță astfel încât tehnicianul să ajungă sigur la componentă, să o izoleze, demonteze, înlocuiască și valideze fără operații inutile. Timpurile țintă se stabilesc din criticitate și cerințele contractuale; nu există o regulă universală care leagă MTBF-ul unei componente de 5, 10 sau 15 minute de acces. Pentru componente critice se recomandă validarea prin maintainability demonstration sau task analysis.

Ținte de tip „quick replacement” pot fi foarte utile, dar trebuie formulate ca obiective de proiect specifice. Pentru reducerea MTTR se folosesc conectori codificați, prinderi captive/quick-release, parametri restaurabili automat, repere de poziționare și autoteste de revalidare. Orice țintă de timp trebuie măsurată cu tehnicieni reprezentativi, în condițiile de izolare a energiei și cu uneltele reale.

Modularitatea permite schimbarea unui Line Replaceable Unit / modul complet în locul reparării in situ a fiecărui element. Beneficiul este reducerea timpului de oprire, cu transferul reparației modulului în atelier. Conceptul trebuie echilibrat cu masa, costul, accesul, calibrarea și riscul de a înlocui preventiv componente încă bune. SMED poate inspira reducerea timpilor de schimb, dar nu este un standard de maintainability.

Pentru subsistemul mecanic, DfM include puncte de ungere accesibile, sisteme centralizate atunci când sunt justificate, spațiu pentru scule și extracție, dispozitive de ridicare, drenaj și colectare, puncte de măsurare și izolarea energiilor. Spațiul rezervat și ROI-ul unui sistem de ungere nu au procente universale; se stabilesc din analiza task-urilor și din frecvența intervențiilor.

Prinderile și cuplajele proiectate pentru demontare controlată pot reduce semnificativ timpul de înlocuire a motoarelor, reductoarelor sau modulelor. Alegerea se face după cuplu, aliniere, backlash,

frecvența intervenției și condițiile de montaj; nu se presupun timpi standard de 5 minute sau 2 ore fără o analiză de task.

Reperele de aliniere, bucșele de poziționare și suprafețele de referință pot transforma realinierea într-un proces repetabil. Beneficiul trebuie verificat prin toleranțe, metodă de măsurare și procedura de revalidare. Pentru axe critice se documentează valorile admise de coaxialitate/dezaliniere și instrumentul utilizat, nu doar o estimare generică a timpului economisit.

11.6.2 Standardizare, diagnostică și etichetare

Standardizarea componentelor poate reduce numărul de piese de schimb și proceduri, dar trebuie optimizată împreună cu performanța și disponibilitatea aprovizionării. În locul unui procent universal de reducere a stocului, proiectantul poate utiliza o matrice de commonality: număr de referințe unice, piese comune între stații, consum anual estimat și criticitate. Rezultatul alimentează planul de spare-parts și supportability.

Diagnosticul integrat reduce timpul de localizare a defectului atunci când mesajele sunt acționabile și validate. Se combină indicații locale, diagnostic PLC/HMI, coduri de eveniment, date IO-Link/drive și istoricul alarmelor. Cantitatea de diagnostic nu este un scop în sine: se proiectează pentru modurile de defectare dominante, se evită alarmele redundante și se verifică faptul că tehnicianul poate ajunge de la simptom la cauză și la acțiunea recomandată.

Identificarea și etichetarea trebuie să fie coerente cu schemele și cu structura de referință a echipamentului. Conductoarele, bornele, dispozitivele și traseele fluide se marchează conform regulilor documentației și standardelor aplicabile, astfel încât tehnicianul să poată corela rapid obiectul fizic cu desenul și lista de piese. Beneficiul este trasabilitatea și reducerea erorilor de intervenție; economiile se măsoară în proiect, nu se presupun printr-un factor universal.

> **În practică · Cum se compară două variante de mentenabilitate**
>
> În locul unor procente sau timpi prezentați ca date industriale universale, comparația se face prin task analysis: timp de izolare, acces, diagnostic, demontare, montare, calibrare și test. Pentru două variante de stație, se cronometrează aceleași intervenții cu aceleași condiții și se compară MTTR, numărul de referințe spare, uneltele necesare și erorile de service. Rezultatul devine o dovadă cuantitativă DfM specifică proiectului.

11.7 Mentenanța predictivă și Industry 4.0

Secțiunile §11.5 și §11.6 tratează proiectarea reliability și maintainability. În exploatare, strategia de mentenanță trebuie aleasă pe baza funcției, criticității, mecanismului de defectare, observabilității degradării și costului intervenției. Predictive maintenance este una dintre opțiuni; nu este automat superioară mentenanței preventive sau run-to-failure pentru orice componenta.

11.7.1 Patru strategii de mentenanță și criteriul de selecție

În locul unei succesiuni istorice rigide, este mai util să distingem patru strategii care pot coexista în aceeași fabrică: reactivă/run-to-failure, preventivă bazată pe timp/cicluri, condition-based/predictivă și prescriptivă/decision-support (Figura 11.9). Selecția se poate face prin RCM sau analiza de criticitate, ținând cont de consecințe, predictibilitatea mecanismului de defectare și costul monitorizării; IEC 60300-3-11 oferă ghid pentru dezvoltarea politicilor de failure management prin RCM [181].

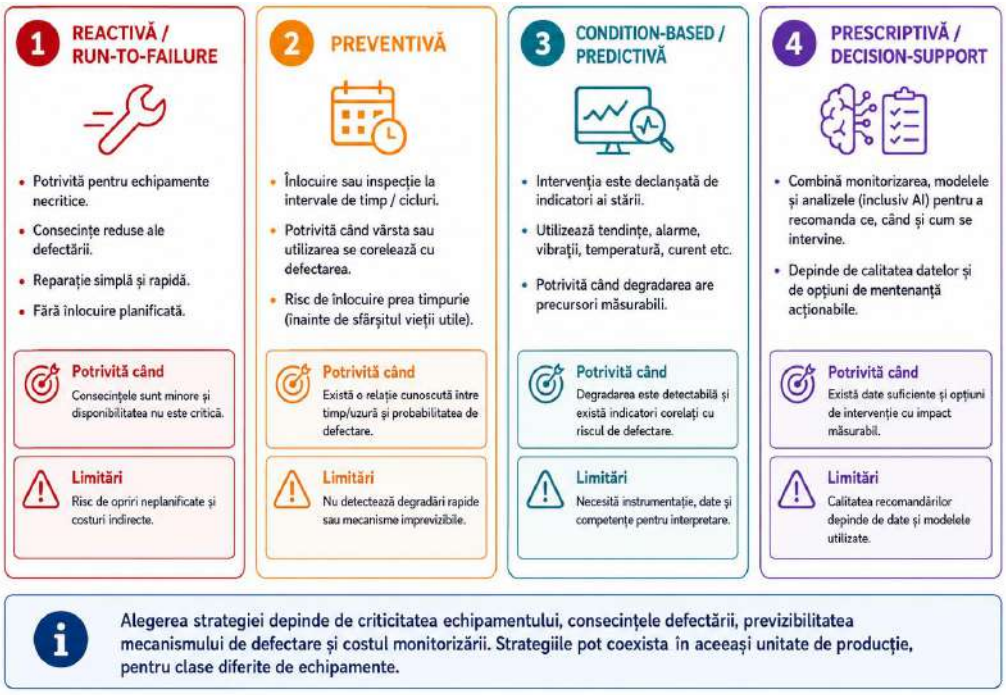


Figura 11.9. Patru strategii de mentenanță care pot coexista: reactivă, preventivă, condition-based/predictivă și prescriptivă. Alegerea corectă depinde de criticitate și de modul de defectare; figura nu reprezintă o ierarhie universală în care o strategie este întotdeauna mai bună decât alta.

Mentenanța reactivă/run-to-failure este rațională pentru itemi necritici, cu consecințe mici și reparare simplă. Pentru itemi critici, aceeași strategie poate produce opriri, risc de deteriorare secundară sau pierderi de producție inacceptabile. Decizia se documentează prin criticitate, nu printr-un prag universal de preț al componentei.

Mentenanța preventivă bazată pe timp sau număr de cicluri este potrivită atunci când vârsta/uzura corelează suficient cu probabilitatea de defectare sau când există cerințe de inspecție/înlocuire. Intervalul optim se stabilește din date de durată de viață, consecințe și cost; înlocuirea calendaristică a unui item cu hazard aproximativ constant poate aduce puțin beneficiu.

Condition-based / predictive maintenance utilizează indicatori de stare pentru a detecta degradarea și, atunci când datele permit, pentru a estima evoluția sau timpul rămas până la atingerea unui criteriu de intervenție. Metoda poate folosi praguri, trenduri, modele fizice sau algoritmi data-driven; pentru procesele de prognostics, ISO 13381-1:2025 oferă ghid și cerințe generale [185]. Valoarea apare atunci când modul de defectare are un precursor măsurabil, există suficient timp de reacție și acțiunea de mentenanță poate fi planificată.

Mentenanța prescriptivă adaugă un strat de suport decizional: combină starea tehnică, riscul, planul de producție, resursele și piesele de schimb pentru a recomanda o acțiune. Machine Learning sau digital twin pot fi componente ale soluției, dar nu sunt condiții obligatorii. Modelele trebuie validate, monitorizate pentru drift și menținute împreună cu logica de decizie operațională.

11.7.2 Condition monitoring: parametrii fizici măsurați

Implementarea condition monitoring pornește de la mecanismul de defectare și de la decizia pe care măsurarea trebuie să o susțină. ISO 17359:2018 oferă cadrul general pentru stabilirea programului

[182]. Vibrația, temperatura, curentul/semnătura electrică și presiunea/debitul sunt exemple frecvente, dar setul de variabile se selectează din FMEA/RCM și din fizica procesului, nu dintr-o regulă de acoperire procentuală (Figura 11.10). Pentru interpretarea și diagnosticul datelor poate fi utilizat cadrul ISO 13379-1:2025 [184].

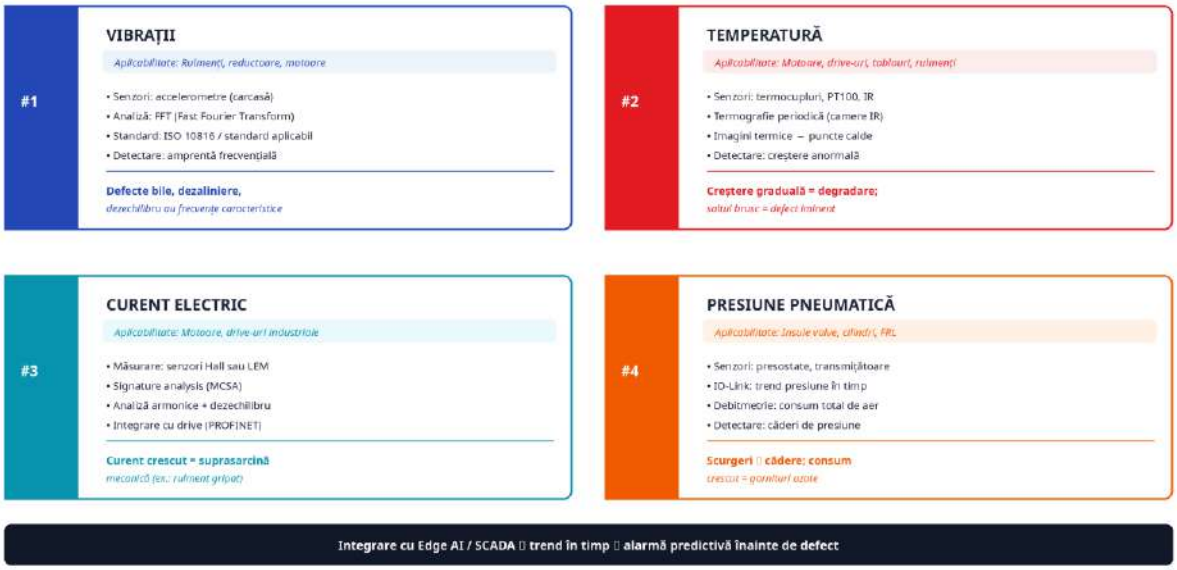


Figura 11.10. Exemple de mărimi utilizate în condition monitoring: vibrații, temperatură, semnătură electrică și presiune/debit. Pentru fiecare se definesc senzorul, poziția, rata de eșantionare, baseline-ul, indicatorii de stare, pragurile și acțiunea de mentenanță asociată.

Vibrațiile sunt o sursă importantă de diagnostic pentru multe mașini rotative. Selecția accelerometrului, domeniul de frecvență, punctul de montaj și rata de eșantionare se stabilesc din cinematica mașinii și defectele vizate. FFT este una dintre tehnicile de analiză; pentru rulmenți pot fi relevante BPFO/BPFI/BSF/FTF, iar pentru dezechilibru/dezaliniere se analizează componente sincronizate cu turația. ISO 20816-3:2022 [37] se folosește pentru evaluarea vibrației globale numai în domeniul său de aplicare; nu este un standard de diagnostic al defectelor rulmenților/angrenajelor. Pentru procedurile de vibration condition monitoring se utilizează, după caz, seria ISO 13373, inclusiv ISO 13373-1 [183].

Temperatura este relevantă pentru lagăre, motoare, drive-uri, tablouri și alte componente, dar diagnosticul necesită baseline și comparație în condiții similare de sarcină și mediu. Termocuplurile, RTD-urile și termografia IR au domenii și incertitudini diferite. Un prag fix de delta-T nu este universal; criteriul se stabilește din specificația componentei, clase termice, tendința istorica și standardul/procedura de inspecție.

Semnătura electrică a motorului poate completa monitorizarea mecanică. MCSA folosește componente spectrale ale curentului pentru a identifică anumite anomalii, dar separarea cauzelor necesită viteza/sarcină cunoscută și validare. Unele drive-uri expun curent, cuplu estimat, temperatura și alți indicatori prin rețeaua industrială; disponibilitatea acestor date nu înseamnă cost zero, deoarece integrarea, stocarea, analiza și validarea rămân activități de proiect.

În pneumatica, presiunea și debitul pot evidenția scurgeri, restricții, filtre încărcate sau timpi de umplere anormali. Analiza este mai robustă dacă măsurătorile sunt corelate cu faza ciclului și cu consumul

de referință. Costul energetic al unei scurgeri depinde de debit, presiune, eficiența compresoarelor, orele de funcționare și tariful energiei; nu se poate deduce dintr-un procent generic de pierdere.

11.7.3 Scenarii industriale și evaluarea economică a PdM

Rezultatele economice ale predictive maintenance variază foarte mult între fabrici. Pentru rigoare, exemplele din această secțiune sunt tratate ca scenarii didactice, nu ca studii de caz reale anonimizate (Figura 11.11). În proiectele reale, ROI se calculează din baseline documentat: frecvența defectărilor, timp mediu de oprire, costul orei de oprire, rebut, costul senzorilor/infrastructurii, mentenanța sistemului de monitorizare și rata alarmelor false.

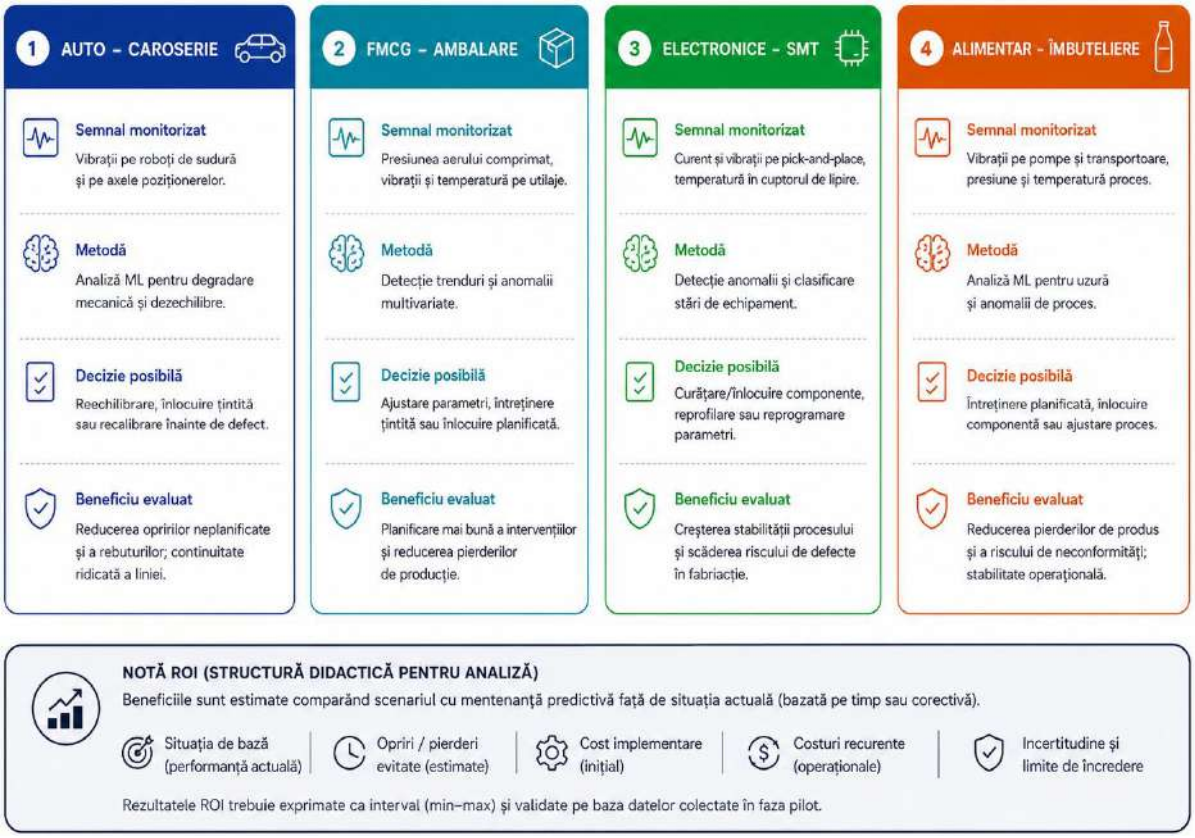


Figura 11.11. Patru scenarii didactice pentru evaluarea PdM în sectoare diferite. Valorile economice din figură trebuie înlocuite sau recalibrate cu datele organizației; figura ilustrează structura unei analize ROI, nu promite un interval universal de recuperare.

Scenariul A, robotică/sudare: monitorizarea vibrațiilor reductoarelor poate urmări indicatori de degradare și programa inspecția în fereastra de mentenanță. Beneficiul se evaluează prin numărul opririlor evitate, durata intervenției și costul producției pierdute, comparate cu costul instrumentării și al analizei.

Scenariul B, pneumatică/FMCG: presiunea și debitul pe insule de valve pot identifica scurgeri sau degradări ale etanșărilor. Beneficiul poate proveni atât din reducerea timpului de oprire, cât și din consumul de aer comprimat; calculul necesită măsurarea debitului și a costului specific al aerului în fabrică.

Scenariul C, electronice/axe servo: datele din drive și vibrațiile pot susține anomaly detection pentru rulmenți, cuplaje și mecanisme de feed. Creșterea OEE nu se atribuie direct algoritmului; se compară perioade echivalente și se separă availability, performance și quality pentru a evita dubla numărare a beneficiilor.

Scenariul D, ambalare/alimentar: semnalele de vibrație, cuplu sau curent pot fi corelate cu calitatea procesului. Un model predictiv este justificat doar dacă anomalia poate fi detectată suficient de devreme și dacă există o acțiune care reduce pierderea. ROI-ul se raportează cu ipoteze, interval de încredere și costuri recurente.

> **În practică · Workflow FMEA/RCM - condition monitoring**
>
> Workflow recomandat: (1) FMEA/RCM identifică funcția și modul de defectare relevant; (2) se stabilește mecanismul de degradare; (3) se verifică dacă există un precursor măsurabil și timp de reacție; (4) se selectează senzorul/indicatorul și baseline-ul; (5) se definește pragul sau modelul; (6) se asociază o acțiune operațională și se validează rata de alarme false/nedetectări. Uneori redesign-ul sau mentenanța preventivă rămân mai potrivite decât PdM.

11.7.4 Tehnici specifice mecanice de condition monitoring

Tehnicile de condition monitoring se selectează în funcție de clasa de mașină și mecanismul de degradare. Pentru proiectantul mecanic sunt deosebit de utile vibrațiile, termografia și analiza lubrifiantului, dar niciuna nu „acoperă" universal majoritatea defectelor. Proiectarea trebuie să prevadă poziție de senzor, suprafețe de montaj, porturi de prelevare, acces vizual și condiții de măsurare reproductibile.

Analiza vibrațiilor pentru rulmenți, dezechilibru, dezaliniere și angrenaje combină măsurări globale cu analiza spectrală/de ordin. BPFO, BPFI, BSF și FTF se calculează din geometria rulmentului și turație; interpretarea necesită baseline și condiții de sarcină comparabile. ISO 20816-3 [37] furnizează criterii de evaluare a vibrației globale pentru mașinile aflate în domeniul său de aplicare, iar ISO 13373-1 [183] tratează procedurile generale de vibration condition monitoring. Clasificarea vizuală a deteriorărilor rulmenților și cauzele posibile pot fi corelate cu ISO 15243:2017 [186].

Termografia IR identifică distribuții de temperatură și puncte calde, dar un prag universal de tip „delta-T >20 C" nu este suficient. Emisivitatea, reflexiile, sarcina, temperatura ambiantă și geometria influențează măsurarea. Procedura trebuie să definească baseline, condiții comparabile, criterii de alarmă și confirmarea prin alte măsurări atunci când consecințele sunt importante.

Analiza lubrifiantului/particulelor poate susține diagnosticul reductoarelor și sistemelor hidraulice. Dimensiunea, forma și concentrația particulelor se interpretează împreună cu tipul uleiului, filtrarea, contaminarea și trendul istoric. Praguri absolute de microni sau ppm nu se transferă universal între agregate; se folosesc standarde de tribology-based monitoring, limite OEM și trending pe același echipament.

11.8 Studiu de caz integrat: analiza fiabilitate pentru stația SAP

Pentru consolidare sunt delimitate două modele, care nu se confundă: (B) un model parametric al configurației SAP v1, cu axă electrică verticală Z și două funcții de fixare pneumatică CL1/CL2; (ALT–RELIABILITY) un exercițiu numeric anterior, pentru o stație ipotetică având patru cilindri și opt electrovalve, păstrat ca exemplu alternativ. Țintele MTBF > 5.000 h, disponibilitate > 96 % și MTTR < 30 min sunt

ipoteze didactice (H), nu cerințe contractuale confirmate și nici rezultate măsurate. Modelul B nu poate primi un MTBF numeric înaintea definitivării BOM-ului, a definirii defectării funcționale și a obținerii unor date de fiabilitate aplicabile.

11.8.1 Calcul MTBF și verificarea cerințelor din caietul de sarcini

Modelul SAP de referință (B): limită și funcție. Se consideră indisponibilitatea pentru operația de asamblare tub–carcasă, nu o evaluare a integrității funcțiilor de siguranță. În inventarul funcțional intră PLC-ul și sursa de alimentare, servodrive-ul, servomotorul, mecanismul liniar și ghidajul axei Z, lanțurile de măsurare a forței și poziției, dispozitivele pneumatice CL1/CL2 și senzorii de proces necesari finalizării ciclului. Numărul cilindrilor, al electrovalvelor și al senzorilor, precum și realizarea efectivă a axei, sunt de stabilit prin BOM și scheme (TBD); două funcții CL1/CL2 nu justifică automat patru cilindri sau opt electrovalve.

Model parametric: ipoteze declarate. Dacă numai pentru o predimensionare se presupun elemente reparabile, independente, cu rate constante și în serie pentru funcția de producție, atunci:

$$\lambda_{\mathrm{B}} = \lambda_{\mathrm{control}} + \lambda_{\mathrm{axăZ}} + \lambda_{\mathrm{fixare}} + \lambda_{\mathrm{măsurare}} + \lambda_{\mathrm{aux}} \tag{11.10}$$

Fiecare termen este suma ratelor unor componente fizice distincte. În particular: $\lambda_{\mathrm{control}} = \lambda_{\mathrm{PLC}} + \lambda_{\mathrm{sursă24V}}$; $\lambda_{\mathrm{axăZ}} = \lambda_{\mathrm{drive}} + \lambda_{\mathrm{motor}} + \lambda_{\mathrm{mecanism}} + \lambda_{\mathrm{ghidare}}$; $\lambda_{\mathrm{fixare}} = \Sigma\lambda_{\mathrm{cilindri}} + \Sigma\lambda_{\mathrm{electrovalve}}$; $\lambda_{\mathrm{măsurare}} = \lambda_{\mathrm{forță}} + \lambda_{\mathrm{poziție Z}} + \Sigma\lambda_{\mathrm{senzori\ discreți}}$. λ_{aux} cuprinde numai elementele auxiliare a căror defectare oprește funcția analizată; un senzor sau un modul integrat nu se numără de două ori. Ratele se stabilesc pentru sarcini, mediu, regim și definiții de defectare comparabile.

Verificarea țintei didactice. În aceste ipoteze $\mathrm{MTBF_B} = 1/\lambda_{\mathrm{B}}$; condiția $\mathrm{MTBF_B} > 5.000$ h echivalează cu $\lambda_{\mathrm{B}} < 200 \times 10^{-6}\ \mathrm{h}^{-1}$. Fără valorile fiecărui termen și fără evaluarea dependențelor, condiția nu poate fi declarată îndeplinită. Pentru uzură, șocuri de sarcină, defectări comune sau politici de mentenanță, modelul exponențial/serie este doar o aproximație; se reanalizează mecanismele relevante. Fiabilitatea funcțiilor safety, reținerea axei Z verticale și evitarea repornirii neașteptate se tratează distinct în analiza de risc și în validarea din Capitolul 9.

Exemplu numeric păstrat: ALT–RELIABILITY, nu SAP v1. Se presupune, exclusiv didactic, o stație alternativă cu elemente reparabile, independente, în serie funcțională și cu rate de defectare constante. Dataset-ul original este păstrat integral: 1 PLC, MTBF 500.000 h; 1 sursă 24 V, 500.000 h; 4 cilindri, 30.000 h fiecare; 12 senzori, 500.000 h fiecare; 8 electrovalve, 50.000 h fiecare; 2 contactoare, 250.000 h fiecare. Inventarul nu include axa servo-electrică Z și nu constituie BOM-ul SAP de referință. Valorile sunt ipoteze ale exercițiului, nu caracteristici declarate ale unor componente comerciale.

Pentru acest model ALT,:

$$\lambda_{\mathrm{ALT}} = \frac{2}{500.000} + \frac{4}{30.000} + \frac{12}{500.000} + \frac{8}{50.000} + \frac{2}{250.000} = 329{,}33 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{h}^{-1} \tag{11.11}$$

Rezultă $\mathrm{MTBF_{ALT}} = 1/\lambda_{\mathrm{ALT}} \approx 3.036$ h. Pentru un timp mediu de reparare ipotetic MTTR = 1 h, modelul staționar simplificat dă $A_i = \mathrm{MTBF_{ALT}}/(\mathrm{MTBF_{ALT}} + \mathrm{MTTR}) \approx 99{,}967\ \%$ (≈ 99,97 %). Exemplul ilustrează de ce o țintă de disponibilitate intrinsecă poate fi atinsă chiar dacă ținta MTBF nu este. Cilindrii și electrovalvele contribuie cu $293{,}33 \times 10^{-6}\ \mathrm{h}^{-1}$ la λ_{ALT}; sensibilitatea modelului trebuie investigată înaintea alegerii măsurilor DfR. Nici $\mathrm{MTBF_{ALT}}$, nici A_i nu caracterizează SAP v1.

Analiza de sensibilitate „what-if” se aplică exclusiv modelului ALT: dacă datele furnizorilor sau încercările ar justifica înjumătățirea ratelor de defectare atribuite cilindrilor și electrovalvelor, rezultă $\lambda_{\mathrm{ALT,nou}}$

= 2/500.000 + 4/60.000 + 12/500.000 + 8/100.000 + 2/250.000 = 182,67 × 10^{-6} h^{-1} și $MTBF_{ALT,nou}$ ≈ 5.474 h. Pragul didactic de 5.000 h ar fi depășit numai în condițiile acestui scenariu ipotetic; înjumătățirea ratelor nu este un efect demonstrat al derating-ului sau al unei soluții constructive. Acest rezultat nu se transferă la configurația electrică Z + CL1/CL2.

11.8.2 Sinteza FMEA și acțiuni preventive prioritare

FMEA pentru SAP de referință este, de asemenea, un exercițiu didactic și trebuie legată de inventarul B: drive/servomotor, transmisie și ghidaj Z, traductor de forță și măsurarea poziției, CL1/CL2, electrovalve și confirmări de fixare. Defectările funcționale se corelează cu efecte observabile, metode de detectare și măsuri verificabile; numărul de linii și distribuția H/M/L nu se prezintă ca rezultate ale unei campanii reale. Echipa urmărește acoperirea funcțiilor și a lanțurilor cauză–mod–efect, nu un procent prestabilit de linii din fiecare clasă. Modurile cu implicații safety se tratează și în analiza de risc a mașinii și în validarea funcțiilor de siguranță; AP din FMEA nu stabilește PLr, PL sau SIL.

Acțiunile de mentenanță se deduc din criticitate, mecanism de uzură și dovezile FMEA/RCM. Pentru SAP v1, un plan didactic poate include inspecțiile operatorului, verificarea conexiunilor și filtrării aerului, controlul ghidajelor și al mecanismului liniar Z, întreținerea prevăzută de producătorul servosistemului, verificarea CL1/CL2, calibrarea lanțurilor de forță/deplasare și măsuri condition-based pentru elementele cu criticitate justificată. Frecvențele zilnic/săptămânal/lunar/trimestrial rămân puncte de pornire, ajustate după documentația OEM, numărul de cicluri, mediul, modul de defectare și datele din exploatare; nu rezultă direct din MTBF-ul ipotetic al variantei ALT.

Pentru moduri de defectare cu precursori măsurabili se poate proiecta condition monitoring: presiune/debit pentru scurgeri în circuitul CL1/CL2, timp de comutare pentru electrovalve, temperatură/curent și alarme de drive pentru acționarea Z, respectiv evoluția curbelor F–z pentru schimbări ale procesului de presare. O abatere F–z nu dovedește singură defectarea unei componente: trebuie separate variațiile produsului, dispozitivului, senzorului și actuatorului. Vibrațiile sau temperaturile ghidajelor/rulmenților se introduc numai dacă analiza modurilor de defectare le justifică. Pragurile se stabilesc din măsurări de referință și încercări; strategia precizează responsabilul diagnosticului, acțiunea la alarmă și timpul permis de reacție.

11.8.3 Aplicarea DfM pe stația SAP

Aplicarea DfM pe SAP v1 se tratează prin task-uri de mentenanță: acces la componente, schimbarea sau reglarea modulului electric de presare Z, inspectarea mecanismului liniar și a ghidajelor, intervențiile asupra CL1/CL2, conectică codificată, repere de poziționare și revalidare. Înaintea intervenției se definesc izolarea energiilor electrică și pneumatică și reținerea/împiedicarea coborârii axei Z, conform analizei de risc; STO singur nu asigură reținerea unei sarcini verticale. Ținte precum „schimbare în 90 s” pot fi cerințe de proiect, dar trebuie demonstrate prin task analysis sau încercări de mentenabilitate, nu presupuse din geometria CAD.

Standardizarea senzorilor și conectorilor poate simplifica spare-parts; diagnosticul PROFINET/IO-Link poate reduce timpul de localizare; etichetarea coerentă cu schema permite intervenții trasabile. Pentru HMI este mai util să afișeze starea, contorii și ultimele evenimente relevante decât un „MTBF acumulat” pe fiecare componentă, dacă acesta nu este calculat dintr-o bază statistică validă.

MTTR-ul și disponibilitatea finale trebuie demonstrate prin înregistrări de intervenție sau prin teste reprezentative de mentenabilitate. Exclusiv pentru varianta ALT–RELIABILITY îmbunătățită, exemplul numeric $MTBF_{ALT,nou} \approx 5.474$ h și MTTR = 0,3 h dă $A_i \approx 99{,}9945$ % (≈ 99,995 %) în modelul staționar simplu. Aceasta nu este disponibilitatea operațională a SAP: nu include mentenanță preventivă, așteptări logistice, lipsa pieselor ori alte opriri. Cerința ipotetică de evaluare pe 12 luni consecutive („rolling 12 months") se verifică separat, cu definiții contractuale și date operaționale; niciun rezultat numeric din ALT nu poate valida configurația B.

În practică · Integrarea dependability în calendarul proiectului

Activitățile se distribuie pe întregul proiect: cerințe și allocation în concept; FMEA preliminar și DfR în arhitectură; maintainability/task analysis în layout; actualizarea FMEA la design freeze; verificări de reliability/maintainability și condition monitoring la integrare; apoi colectare de field data după livrare. Procentele de ore-om și beneficiile comerciale sunt specifice organizației și nu se tratează ca benchmark universal.

11.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție

11.9.1 Recapitulare: conceptele de bază

- Indicatorii MTBF/MTTF, repair/restoration time, availability și rata de defectare sunt utile numai dacă se precizează definiția defectării, populația, perioada, condițiile și modelul statistic. A = MTBF/(MTBF + MTTR) și λ = 1/MTBF sunt relații simplificate pentru modele staționare/exponențiale.
- Curba bathtub este un model conceptual, nu o cronologie universală. Weibull β ajută la distingerea hazardului descrescător, constant sau crescător, iar intervalele de intervenție se stabilesc din date și mecanisme de degradare.
- Fiabilitatea sistemelor în serie: $R_{sistem} = \prod R_i$. Implicație importantă: linia cu 20 stații MTBF 10.000 h fiecare are MTBF de linie 500 h. Fiabilitatea se proiectează la nivel de sistem, nu de componentă individuală.
- Redundanța ideală poate crește mult fiabilitatea unei funcții, dar calculele reale trebuie să includă dependențele, common-cause failures, diagnostic, comutare și reparare. Justificarea este tehnico-economică și/sau safety, după caz.
- FMEA: IEC 60812:2018 este referința generică [174]; AIAG & VDA FMEA Handbook este referința automotive pentru abordarea în 7 pași și Action Priority [175]. Utilizarea AIAG–VDA depinde de cerințele clientului/OEM și nu este o obligație universală pentru toate echipamentele.
- Action Priority înlocuiește RPN în formularul recomandat AIAG–VDA [175], dar AP nu este o decizie juridică de acceptare a riscului. Tabelele oficiale se utilizează pentru H/M/L, iar analiza safety a mașinii rămâne separată.
- DfR include dimensionare/derating bazat pe date, toleranța la defect, simplitate, selecția componentelor și verificarea ipotezelor prin test și field data. Nu există factori universali de creștere a MTBF.
- Design for Maintainability urmărește task-uri de mentenanță sigure, accesibile, modulare, diagnosticabile și bine identificate. Timpurile de intervenție și reducerea stocului se stabilesc și se demonstrează pentru proiect, nu prin reguli universale.

- Strategiile reactive, preventive, condition-based/predictive și prescriptive pot coexista. RCM/criticitatea și fizică modului de defectare determina strategia, nu eticheta „Industry 4.0”.
- Condition monitoring pornește de la modurile de defectare și poate folosi vibrații, temperatură, semnătura electrică, presiune/debit, tribologie sau alte mărimi. ISO 17359 [182] oferă cadrul general; standardul specific se alege după mașină și tehnică.
- Workflow FMEA/RCM → mecanism de degradare → indicator de stare → senzor → baseline/prag → acțiune de mentenanță. Nu fiecare AP=H necesită automat PdM; uneori eliminarea cauzei prin redesign este soluția corectă.
- Evaluarea PdM se face printr-o situație de referință și o analiză cost–beneficiu: timp de oprire evitat, rebut, costuri de mentenanță și energie versus costul instrumentarii, integrării, validării și exploatării sistemului. ROI-ul nu are un interval universal de 12-24 luni.

11.9.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipa pe parcursul proiectelor de master. Răspunsurile sintetice apar după fiecare întrebare; pentru exersarea independentă a cititorului, se recomandă parcurgerea întâi a întrebării fără consultarea răspunsului.

Q1. O linie de producție are 20 de stații independente, în serie funcțională, fiecare modelată exponențial cu MTBF = 10.000 h. Care este MTBF-ul liniei și ce trebuie precizat înainte de a transforma rezultatul într-o clauză contractuală? În ipotezele date, $\lambda_{linie} = 20 \times (1/10.000) = 2 \times 10^{-3}\ h^{-1}$ și $MTBF_{linie} = 500$ h. Rezultatul este valid numai pentru modelul simplificat cu rate constante și independență. O cerință contractuală de availability trebuie să definească separat timpul programat, categoriile de opriri, logistica, mentenanța planificată și fereastra de raportare; nu se deduce automat din MTBF.

Q2. Explicați de ce RPN poate fi înșelător și cum Action Priority schimba prioritizarea în AIAG-VDA 2019. RPN comprima S, O și D într-un produs și poate da aceeași valoare pentru combinații foarte diferite. AP utilizează tabele de decizie H/M/L care tratează separat combinația factorilor și orientează optimizarea. Valorile exacte se determina din tabelul oficial; AP nu înlocuiește evaluarea de risc safety și nu trebuie rezumat la o regulă simplă de tip „S=10 înseamnă întotdeauna H”.

Q3. Realizați o analiză FMEA simplificată în trei linii pentru subsistemul electric al unui conveior automatizat. Exemple de lanțuri: (a) motor, blocare rulment → pierdere mișcare → stop proces; cauze posibile: lubrifiere, contaminare, sarcină; controale: monitorizare vibrații/temperatură și inspecție. (b) senzor fotoelectric, semnal fals/lipsă → piesă nedetectată; cauze: contaminare, aliniere, cablaj; controale: diagnostic și verificare de plauzibilitate. (c) VFD, declanșare termică → stop motor; cauze: răcire, suprasarcină, mediu. Atribuiți S/O/D și AP numai după alegerea tabelelor FMEA aplicabile și justificarea ratingurilor.

Q4. Ce măsuri DfR ați evalua pentru o sursă DC 24 V aflată pe o funcție critică? Se pornește de la profilul real de sarcină și de temperatură și de la curbele de derating/lifetime ale producătorului. Se pot analiza marja de putere, managementul termic, calitatea alimentării, protecția la tranzienți, selecția componentelor și, dacă cerința este de disponibilitate, arhitectura redundantă cu diagnostic și comutare. Redundanța poate crește disponibilitatea funcției, dar nu „dublează MTBF-ul componentei”; modelul trebuie să includă common-cause failures, acoperirea diagnosticului, comutarea și repararea. Orice țintă de îmbunătățire se validează prin date de catalog, test sau field return.

Q5. Într-un scenariu de condition monitoring pentru un reductor de robot, ce senzori și ce analiză ați lua în calcul? Se pot utiliza accelerometre pe carcasă și, dacă sunt disponibile și validate, mărimi din drive precum curentul sau cuplul estimat. Pentru vibrații se definesc poziția de montaj, banda și rata de eșantionare, apoi indicatori globali și/sau spectrali legați de turație, angrenaje și rulmenți. Un model de anomaly detection se antrenează și se validează pe un baseline reprezentativ; fereastra de avertizare nu se presupune universal, ci se determină din date. Alarma trebuie corelată cu o acțiune de mentenanță și integrată în CMMS/fluxul operațional.

11.10 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 11.1. Fiabilitatea unei axe modelate în serie

Enunț. Axa Z a stației SAP este modelată ca sistem serie cu rate de defectare constante (valori didactice, în $10^{-6}\ h^{-1}$): controler 2, servoamplificator 5, motor 4, șurub cu bile și piuliță 6, senzori 8. Determinați rata de defectare a axei, MTBF și fiabilitatea pe 1 000 h.

Răspuns. $\lambda_{axă} = 2 + 5 + 4 + 6 + 8 = 25 \cdot 10^{-6}\ h^{-1}$, deci MTBF = $1 / \lambda = 40\,000$ h. $R(1\,000\ h) = e^{-0{,}025} \approx 0{,}975$. Rezultatul este valabil numai în ipoteza ratelor constante; pentru șurub, unde uzura domină, un model Weibull cu $\beta > 1$ este mai adecvat, iar contribuția senzorilor (cea mai mare) indică unde are sens o măsură DfR.

Problema 11.2. Redundanța sursei de alimentare 24 V DC

Enunț. O sursă 24 V are MTBF = 200 000 h (model exponențial). Comparați fiabilitatea pe un an de funcționare continuă (8 760 h) pentru o sursă unică și pentru două surse în redundanță activă, independente.

Răspuns. Sursă unică: $R = e^{-8760/200\,000} = e^{-0{,}0438} \approx 0{,}957$. Două surse în paralel: $R = 1 - (1 - 0{,}957)^2 = 1 - 0{,}043^2 \approx 0{,}998$. Probabilitatea de defectare pe an scade de la aproximativ 4,3 % la 0,2 %. Câștigul real este mai mic dacă există cauze comune (supratensiune, temperatură în tablou, modulul de decuplare) și dacă defectarea unei surse nu este semnalizată și remediată; redundanța fără diagnostic se degradează la o sursă unică.

Problema 11.3. Distribuția Weibull și durata B10

Enunț. Pentru un ghidaj cu uzură s-au estimat parametrii Weibull $\beta = 2$ și $\eta = 20\,000$ h. Determinați fiabilitatea la 5 000 h și durata B10 (timpul la care se defectează 10 % din populație). Ce politică de mentenanță sugerează rezultatul?

Răspuns. $R(5\,000) = \exp[-(5\,000/20\,000)^2] = e^{-0{,}0625} \approx 0{,}939$. Din $R(t) = 0{,}90$: $t_{B10} = \eta \cdot (-\ln 0{,}90)^{1/\beta} = 20\,000 \cdot 0{,}1054^{0{,}5} \approx 6\,490$ h. Deoarece $\beta > 1$, hazardul crește în timp, deci înlocuirea preventivă sau monitorizarea stării au sens; intervalul se stabilește înaintea B10 și se corectează pe baza datelor de exploatare.

12 Integrare, commissioning și validare

FAT, SAT, Virtual Commissioning, ECR/ECO, modificarea substanțială

Despre acest capitol

Capitolul 12 tratează etapa în care proiectarea devine sistem funcțional verificat: integrarea subsistemelor, commissioning-ul și demonstrarea cerințelor de acceptanță. Accentul este pe trasabilitatea dintre specificație, test, rezultat și configurația as-built.

Sunt integrate FAT și SAT, Virtual Commissioning, change control ECR/ECO și evaluarea modificărilor substanțiale conform Regulamentului (UE) 2023/1230. Structurile și valorile numerice din studiile de caz sunt didactice; criteriile reale se stabilesc prin contract, risk assessment, standardele aplicabile și datele echipamentului.

Standarde și referințe normative aplicabile

IEC 62381:2024, FAT, FIT, SAT și SIT pentru sisteme de automatizare din industria de proces; planurile de test se adaptează proiectului [16].

VDI/VDE 3693 Blatt 1:2025, Virtual commissioning: tipuri de modele, termeni, definiții și configurații de test pe ciclul de viață [189].

IEC 60204-1:2016+A1:2021, echipamentul electric al mașinilor; reper pentru verificările electrice relevante [29].

Regulamentul (UE) 2023/1230, art. 3(16), 18 și 25: modificare substanțială, obligațiile persoanei care o realizează și evaluarea conformității [28].

ISO 13855:2024; ISO 10218-1/-2:2025, poziționarea safeguards și cerințele actuale pentru roboți/celule robotizate, unde sunt aplicabile [12, 149, 154].

EudraLex Vol. 4, Annex 15 și Annex 11; FDA 21 CFR Part 11: calificare/validare, sisteme computerizate și înregistrări electronice în domeniile reglementate, după caz [190]–[191].

ISO 9001:2026, reper de management al calității pentru verificare, trasabilitate și controlul modificărilor; aplicabilitatea cerințelor se analizează în contextul organizației [192].

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să poziționeze fazele de acceptanță pe ramura ascendentă a modelului V;
- să planifice și să conducă un FAT și un SAT, cu protocoale și criterii de acceptare verificabile;
- să explice rolul virtual commissioning în reducerea riscului la punerea în funcțiune;
- să gestioneze modificările post-livrare prin procesul ECR / ECO;
- să evalueze dacă o modificare devine substanțială în sensul Regulamentului (UE) 2023/1230.

Cunoștințe prealabile

Se presupun cunoscute caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare din Capitolul 2, funcțiile de siguranță din Capitolul 9 și documentația tehnică din Capitolul 10, deoarece acceptanța verifică tocmai trasabilitatea dintre acestea.

Glosar de termeni și acronime

Acronimele și termenii tehnici utilizați pe parcursul capitolului sunt definiți la prima apariție și recapitulați în tabelul de mai jos pentru consultare rapidă.

Termen / acronim	Definiție
FAT	Factory Acceptance Test: test de acceptanță executat la producător, înainte de expediere, pentru a demonstra conformitatea echipamentului/automatizării cu specificația aplicabilă. Domeniul, martorii, criteriile și livrabilele sunt stabilite prin contract și planul de test.
SAT	Site Acceptance Test: test de acceptanță după instalarea la amplasamentul utilizatorului. Verifică funcționarea în condițiile reale de utilități, integrarea cu echipamentele și sistemele adiacente și criteriile contractuale care nu pot fi demonstrate complet la FAT.
PQ	Performance Qualification: etapă de calificare a performanței utilizată în contexte reglementate, în special GMP, pentru a demonstra performanța reproductibilă în condițiile definite. Conținutul și succesiunea față de IQ/OQ se stabilesc prin strategia de calificare și evaluarea de risc.
IQ / OQ / PQ	Installation / Operational / Performance Qualification: etape uzuale de calificare în mediile GMP. IQ verifică instalarea, OQ verifică funcționarea în domeniul definit, iar PQ demonstrează performanța în condiții reprezentative; amploarea lor este justificată prin risk assessment [190].
Punchlist	Listă controlată de neconformități și observații identificate la FAT/SAT. Clasificarea A/B/C este o convenție contractuală frecventă, nu o clasificare impusă universal de IEC 62381.
Run-at-rate	Test de producție continuă la rata/cadența convenită, pe o durată și cu un mix de produse stabilite contractual. Scopul este demonstrarea stabilității și a performanței, nu atingerea unei durate universale.

Termen / acronim	Definiție
OEE	Overall Equipment Effectiveness: indicator calculat ca Disponibilitate × Performanță × Calitate. Ținta de acceptare trebuie stabilită contractual și interpretată împreună cu definițiile pierderilor și fereastra de măsurare.
MTTR	Mean Time To Repair / Restore, în funcție de definiția adoptată: indicator de mentenabilitate. Dacă este criteriu SAT, pragul, tipurile de defect și metoda de cronometrare trebuie definite explicit în protocol.
Virtual Commissioning (VC)	Verificarea funcțiilor de automatizare prin conectarea sistemului de control, real sau simulat, la modele ale instalației înaintea sau în paralel cu commissioning-ul fizic. Beneficiul depinde de fidelitatea modelului, acoperirea testelor și reutilizarea modelelor.
SiL	Software-in-the-Loop (SiL): configurație în care logica de control și plant-ul sunt executate în mediul software. Utilă în special pentru secvențe, moduri de operare, interblocări logice și testarea scenariilor.
HIL	Hardware-in-the-Loop: configurație în care hardware-ul real de control este conectat la un plant simulat, cu interfețe de I/O și comunicație adecvate. Permite verificarea timing-ului și a integrării hardware-software.
Digital Twin (DT)	Reprezentare digitală structurată a unui activ/sistem, menținută prin date și modele pe durata ciclului de viață. Un digital twin poate susține Virtual Commissioning, dar nu este în mod automat un «nivel 3» obligatoriu sau o configurație cu fidelitate maximă.
Dry run	Test de funcționare fără produs sau cu produs simulat, utilizat pentru verificarea secvențelor, tranzițiilor și interblocărilor înaintea testării complete cu material de producție.
Punchlist Cat. A	Categorie contractuală pentru puncte blocante, dacă proiectul adoptă schema A/B/C. Criteriul exact de blocare a expedierii trebuie definit în contract/protocol.
Punchlist Cat. B	Categorie contractuală pentru puncte importante care pot permite expedierea condiționată numai dacă părțile au stabilit explicit această regulă și un plan de închidere.
Punchlist Cat. C	Categorie contractuală pentru observații minore/cosmetice/documentare, cu termen de închidere stabilit de părți.
Proces-verbal recepție	Document contractual de acceptanță/handover semnat de părți. Efectele asupra transferului de risc, garanției și responsabilității rezultă din contract și din legislația aplicabilă; obligația de păstrare a documentației CE nu începe automat prin simpla semnare a SAT.
Ramp-up	Perioadă post-instalare de stabilizare a producției și transfer de cunoștințe. Durata, prezența furnizorului și criteriile de ieșire sunt proiect-specifice.

Termen / acronim	Definiție
ECR	Engineering Change Request: solicitare formală de modificare care descrie necesitatea, domeniul și motivele schimbării și declanșează analiza impactului.
ECO	Engineering Change Order: autorizația/ordinul controlat de implementare a modificării aprobate, cu identificarea configurației, documentelor și verificărilor afectate.
Obsolescence management	Management proactiv al riscului de ieșire din fabricație/suport al componentelor, prin monitorizarea lifecycle-ului, notificărilor PCN/EOL, alternativelor și stocurilor strategice. Duratele de viață sunt dependente de tehnologie și furnizor.
Modificare substanțială	Reg. (UE) 2023/1230 art. 3 pct. (16): modificare fizică sau digitală, după introducerea pe piață sau punerea în funcțiune, neprevăzută/neplanificată de producător, care afectează siguranța printr-un pericol nou sau risc crescut și necesită măsurile de protecție specificate de definiție.
Evaluarea conformității după modificare substanțială	Pentru o modificare substanțială, persoana fizică sau juridică ce o realizează este considerată producător pentru echipamentul afectat, în condițiile art. 18, și aplică procedura relevantă de evaluare a conformității prevăzută la art. 25. „Recertificare CE” nu este termenul juridic utilizat de Regulament, iar implicarea unui organism notificat nu este automată [28].
Handshake	Schimb de semnale sau mesaje de stare între echipamente adiacente într-o linie de producție, de exemplu, confirmarea că un echipament este gata să primească ori să transfere o piesă. Este un element important al integrării la SAT; forma concretă depinde de arhitectura de control și de interfața proiectată.
PROFINET	Tehnologie de comunicație industrială bazată pe Ethernet, utilizată pentru schimbul de date între controlere și echipamente periferice, precum drive-uri, I/O distribuite și HMI. Profilurile, clasele de conformitate și opțiunile implementate depind de aplicație.
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture: arhitectură și suită de specificații independentă de furnizor, orientată spre interoperabilitate și schimb structurat de informații între sisteme industriale.
MES	Manufacturing Execution System: sistem software pentru managementul operațiunilor de producție între nivelul de control și sistemele enterprise. Integrarea cu echipamentele poate utiliza OPC UA sau alte interfețe standard/proprietare, în funcție de arhitectură.
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition: sistem de supraveghere și achiziție de date la nivel de instalație/fabrică. Poate integra mai multe echipamente prin OPC UA, protocoale industriale sau driveruri proprietare, în funcție de arhitectură.
PackML	PackML: model de stări și interfețe pentru mașini, dezvoltat în cadrul ISA-TR88.00.02. Implementarea utilizează stările, modurile și PackTags aplicabile arhitecturii mașinii; testarea se raportează la funcțiile implementate.
GMP	Good Manufacturing Practice: cerințe de bună practică pentru fabricarea produselor reglementate. Calificarea și validarea instalațiilor, echipamentelor, utilităților și proceselor se stabilesc printr-o abordare documentată și bazată pe risc.

Termen / acronim	Definiție
21 CFR Part 11	Reglementare FDA pentru anumite înregistrări electronice și semnături electronice. Se aplică atunci când sunt utilizate înregistrări electronice în domeniul cerințelor FDA/predicate rules; cerințele concrete depind de context.
Cleanroom	Cameră curată clasificată în funcție de concentrația particulelor și de cerințele procesului. Clasa și activitățile de calificare/monitorizare sunt determinate de aplicație și de standardele/reglementările sectoriale.

Harta capitolului

Parcursul capitolului: §12.1 Poziționarea pe modelul V și fazele de acceptanță; §12.2 FAT, Factory Acceptance Test; §12.3 SAT, Site Acceptance Test; §12.4 Virtual Commissioning, testare pe model virtual; §12.5 ECR / ECO, gestionarea modificărilor post-livrare; §12.6 Modificarea substanțială, Reg. UE 2023/1230; §12.7 Studii de caz FAT/SAT din industrie; §12.8 Studiu de caz integrat, FAT/SAT pentru stația SAP; §12.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție.

12.1 Poziționarea pe modelul V și fazele de acceptanță

Capitolul 11 a tratat fiabilitatea, FMEA și proiectarea pentru fiabilitate și mentenabilitate (DfR/DfM). Aceste activități răspund întrebării „cât de bine va funcționa echipamentul în timp”, dar presupun că echipamentul funcționează inițial corect, la livrare. Capitolul de față tratează activitățile care dovedesc funcționalitatea inițială: integrarea fizică a subsistemelor, commissioning-ul (punerea în funcțiune) și validarea sistematică prin protocoale formale. Aceste activități ocupă ramura ascendentă a modelului V, simetrică fazei de proiectare detaliată.

În logica modelului V, activitățile de verificare și validare trebuie legate trasabil de cerințele și deciziile de proiectare. Cerințele inițiale se demonstrează prin teste și criterii de acceptanță definite; arhitectura și interfețele se verifică prin integration testing și SAT; subsistemele se verifică înainte și în timpul FAT; iar integrarea hardware-software se poate pregăti prin pre-commissioning și Virtual Commissioning. Corespondența nu trebuie tratată ca o corespondență rigidă, identică pentru toate industriile, ci ca o regulă de trasabilitate: fiecărei cerințe relevante trebuie să îi corespundă o metodă de verificare/validare, o evidență și un responsabil.

Capitolul este structurat în cinci registre interconectate. §12.2 tratează FAT, organizând verificările în șase domenii principale (mecanică, electrică, pneumatică/fluidică, funcționare secvențială, safety și performanță) ca structură de lucru adaptabilă, nu ca listă universal impusă de IEC 62381. §12.3 tratează SAT, inclusiv integrarea în linie, run-at-rate și handover-ul contractual. §12.4 prezintă Virtual Commissioning prin configurații SiL, HIL și modele cu fidelitate ridicată/digital twin. §12.5 tratează ECR/ECO ca flux de change control și configuration management. §12.6 aplică definiția juridică a modificării substanțiale din Regulamentul (UE) 2023/1230, cu accent pe art. 3 pct. (16), art. 18 și art. 25 (Figura 12.1).

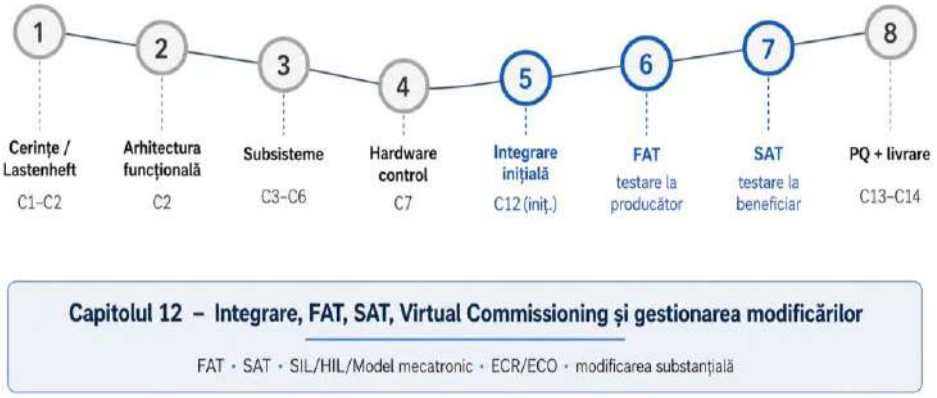


Figura 12.1. Poziționarea Capitolului 12 în ciclul V de proiectare. FAT, SAT și testele de integrare oferă niveluri complementare de verificare/validare; momentul handover-ului și transferul contractual al responsabilităților se stabilesc prin documentele proiectului.

12.1.1 Exemplu de secvență în 6 faze: de la asamblare la acceptanța finală

Validarea unui echipament de fabricație nu se reduce la un singur test. În practică, organizațiile construiesc o secvență de acceptanță adaptată proiectului, cu gate-uri și livrabile succesive. În acest capitol se utilizează didactic o structură în șase faze (Mechanical Acceptance, Electrical Acceptance, Safety Acceptance, FAT, SAT și Performance Qualification) pentru a ilustra acumularea progresivă a dovezilor de conformitate și performanță (Figura 12.2). IEC 62381:2024 furnizează cerințe și checklist-uri pentru FAT/FIT/SAT/SIT în automatizările din industria de proces și permite dezvoltarea de planuri de test specifice; nu prescrie această secvență didactică de șase faze pentru toate echipamentele de fabricație.

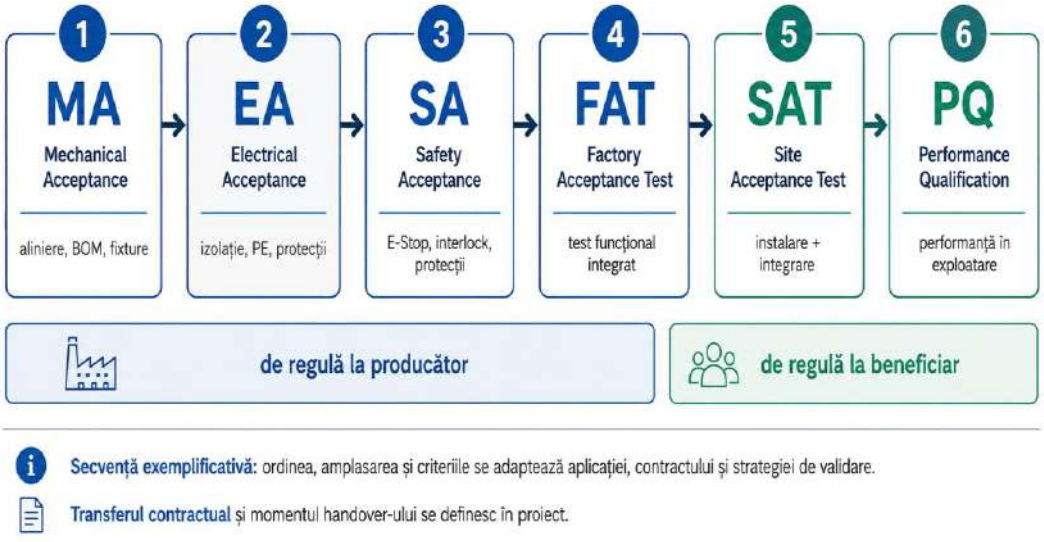


Figura 12.2. Exemplu didactic de secvență în 6 faze: Mechanical Acceptance, Electrical Acceptance, Safety Acceptance, FAT, SAT și Performance Qualification. Amplasarea, ordinea și criteriile fiecărei faze se stabilesc prin planul de verificare/validare al proiectului; structura nu reprezintă o listă universal obligatorie din IEC 62381.

Faza 1. Mechanical Acceptance (MA). Verifică starea mecanică față de desenele, toleranțele și specificațiile proiectului: gabarit, aliniere, fixare, ghidaje, fixture-uri, componente și condițiile de instalare. Livrabilul poate fi un Mechanical Inspection Report sau o secțiune echivalentă în protocolul intern.

Criteriile și instrumentele de măsurare sunt definite în funcție de arhitectura echipamentului și de cerințele producătorilor de componente.

Faza 2. Electrical Acceptance (EA): verifică echipamentul electric în raport cu documentația și cerințele aplicabile, inclusiv IEC 60204-1:2016+A1:2021 acolo unde intră în domeniul său. Se verifică, după caz, protective bonding, izolația, protecțiile, etichetarea, cablarea, alimentările și secvențele de energizare. Valorile și metodele de încercare se preiau din standardul aplicabil, din instrucțiunile producătorului și din protocolul proiectului; nu se impune o singură valoare universală pentru toate circuitele și toate mașinile [29].

Faza 3. Safety Acceptance (SA): verifică și validează funcțiile de siguranță definite prin evaluarea de risc și prin specificația safety. Pentru E-Stop, interlocking, ESPE/cortine optice, STO și alte funcții se măsoară comportamentul real și timpul total de oprire acolo unde este necesar, apoi se compară cu criteriile rezultate din proiectare, inclusiv cu distanțele de separare calculate conform ISO 13855:2024 atunci când este aplicabil. Validarea trebuie realizată de persoane competente și documentată; Regulamentul (UE) 2023/1230 nu impune, ca regulă generală, prezența unui inginer cu o anumită certificare comercială la FAT [3, 4, 149, 158].

Faza 4. Factory Acceptance Test (FAT): test de acceptanță la producător, de regulă cu participarea clientului atunci când contractul o prevede. FAT verifică cerințele care pot fi demonstrate înainte de expediere și produce un raport de test, eventual împreună cu un punchlist. Decizia de expediere se bazează pe criteriile contractuale de acceptanță și pe statusul neconformităților, nu pe o clasificare universală impusă de standard.

Faza 5. Site Acceptance Test (SAT): test de acceptanță după instalarea la amplasamentul utilizatorului. Reia selectiv testele relevante din FAT și adaugă verificările dependente de mediul real: utilități, fundație/instalare, integrarea cu echipamentele și sistemele adiacente, produse reprezentative și condițiile operaționale. Durata, probele și documentul de handover sunt stabilite contractual.

Faza 6. Performance Qualification (PQ): în proiectele și sectoarele unde este necesară, demonstrează performanța reproductibilă în condițiile definite. În mediile GMP, Annex 15 tratează calificarea și validarea printr-o abordare lifecycle și bazată pe risc; PQ urmează în mod normal IQ și OQ, dar strategia poate permite combinări justificate. În alte sectoare, un test echivalent de performanță poate fi inclus în SAT sau într-o etapă separată, conform contractului [190].

În practică · Planificarea efortului de commissioning

Efortul de integrare și commissioning poate reprezenta o parte importantă din proiect, în special la echipamente cu multe interfețe și software complex. Nu există însă un procent universal de 30–40 % aplicabil tuturor proiectelor. Estimarea se construiește din work breakdown structure, numărul de interfețe, maturitatea software-ului, volumele de test și resursele on-site.

Cauzele frecvențe ale depășirilor sunt cerințele ambigue, erorile de interfață, modificările târzii, configurațiile incomplete și lipsa condițiilor de test. Aceste cauze trebuie măsurate intern prin defect logs și punchlists; procentele dintr-o organizație nu se transferă automat la alta.

Practică recomandată: buget și rezervă de timp bazate pe risc, pre-test intern, freeze de configurație înainte de FAT, Virtual Commissioning pentru funcțiile cu valoare de testare timpurie și change control disciplinat pentru orice abatere.

12.2 FAT: Factory Acceptance Test

Factory Acceptance Test (FAT) este o activitate formală de verificare/acceptanță executată înainte de expediere, la producător sau într-un mediu de test convenit. Scopul este demonstrarea cerințelor care pot fi verificate în acea configurație și identificarea neconformităților înainte ca remedierea să fie îngreunată de instalarea la client. Domeniul FAT, martorii, criteriile de acceptare și efectul contractual al semnării trebuie definite explicit în specificație și planul de test.

Un reper actual este IEC 62381:2024, dedicat sistemelor de automatizare din industria de proces. Standardul definește cerințe și checklist-uri pentru FAT, Factory Integration Test (FIT), SAT și Site Integration Test (SIT) și precizează că activitățile pot fi utilizate pentru dezvoltarea unor planuri de test adaptate procesului, instalației sau echipamentului. Pentru echipamentele discrete/mecatronice, această structură este utilă ca ghid de organizare, dar nu trebuie prezentată ca o listă universală de șase categorii obligatorii [16].

12.2.1 Participanți și momentul desfășurării

Participanții la FAT se stabilesc în funcție de responsabilități și de domeniul de test: project manager, proiectanți mecanici/electrici, automation engineer, specialiști safety, quality și reprezentanți ai clientului. Implicarea unui organism notificat nu este determinată de simpla existență a unui FAT. În regimul Regulamentului (UE) 2023/1230, necesitatea intervenției unui notified body rezultă din categoria de produs din Anexa I și din procedura de evaluare a conformității aleasă/aplicabilă conform art. 25; aceasta nu înseamnă automat prezența organismului notificat la testele FAT [28].

Momentul FAT se stabilește prin planul proiectului, după ce echipamentul a atins o maturitate suficientă pentru testare. Condițiile de intrare trebuie definite explicit: configurație mecanică și electrică identificată, software versionat, funcții esențiale implementate, documentație de test aprobată și pretest intern încheiat. Procentul din durata totală a proiectului nu este un criteriu tehnic universal; pentru proiectele iterative, unele subansamble pot avea FAT-uri parțiale înaintea FAT-ului integrat.

Durata FAT depinde de complexitate, risc, numărul de variante de produs, volumul de test și cerințele contractuale. O stație simplă poate necesita ore sau câteva zile, în timp ce o linie integrată poate necesita etape succesive și testare pe săptămâni. Estimările de durată trebuie construite din listă de teste și din resurse, nu invers; valorile orientative din exemplele didactice ale capitolului nu sunt cerințe normative.

12.2.2 Protocolul FAT: domenii principale de verificare

Pentru structurarea protocolului FAT, verificările sunt grupate în șase domenii principale: mecanică, electrică, pneumatică/fluidică, funcționare secvențială, safety și performanță (Figura 12.3). Gruparea oferă un cadru de lucru pentru echipamente mecatronice și trebuie adaptată aplicației. IEC 62381:2024 nu impune aceste șase domenii ca listă universală și nu afirmă că omiterea unuia „invalidează” automat FAT-ul; criteriul corect este acoperirea completă și trasabilă a cerințelor relevante din specificația proiectului [16].



Figura 12.3. Domenii principale de verificare în cadrul FAT: mecanică, electrică, pneumatică/fluidică, funcționare secvențială, safety și performanță. Conținutul și amploarea verificărilor se stabilesc în funcție de specificația contractuală, arhitectura echipamentului, riscurile identificate și standardele aplicabile.

Verificarea mecanică acoperă geometria, montajul și integritatea ansamblului: alinierea, poziționarea, fixările, jocurile/preîncărcările, fixture-urile și conformitatea componentelor față de BOM și desene. Criteriile se exprimă prin toleranțe proiect-specifice și prin limitele producătorilor de componente. Instrumentele de măsurare trebuie să fie adecvate incertitudinii cerute și, când este necesar, calibrate/trasabile. Nu există o durată universală pentru această etapă.

Verificarea electrică se raportează la documentația proiectului și, acolo unde este aplicabil, la IEC 60204-1:2016+A1:2021. Se verifică protective bonding, izolația, protecțiile la supracurent și defect, marcarea/identificarea, circuitele de comandă, secvența de energizare și funcțiile de oprire/deconectare. Metodă de test, curentul/tensiunea de încercare și valorile de acceptare se preiau din cerințele aplicabile și din proiect; nu se generalizează o singură limită de rezistență pentru toate mașinile [29].

Verificarea pneumatică/fluidică urmărește etanșeitatea, presiunile, reglajele, calitatea mediului, secvența actuatoarelor și comportamentul la pierderea/recuperarea energiei. Presiunea de test, durata și criteriul de pierdere se stabilesc din specificația componentelor, standardele relevante (de exemplu ISO 4414 pentru pneumatica industrială, unde este aplicabil) și analiza de risc. Clasele de calitate a aerului conform ISO 8573-1 se aleg în funcție de aplicație, nu există o clasă universală pentru toate echipamentele [78, 82].

Funcționarea secvențială validează comportamentul dinamic în modurile de operare implementate. Dry run-ul poate verifica Grafcet/state machine, tranzițiile, timerele, interblocările și reacțiile la condiții anormale; testele ulterioare folosesc piese sau sarcini reprezentative pentru a evalua timpii de ciclu și robustețea. Dacă se utilizează PackML/ISA-TR88.00.02, se verifică stările, modurile, tranzițiile și PackTags implementate și relevante pentru mașină, nu o listă mecanică de stări fără legătură cu funcția proiectată [135].

Categoria safety verifică funcțiile de siguranță individual și în combinațiile prevăzute în validare. Pentru E-Stop, interlocking, ESPE/cortine, STO și alte funcții se verifică reacția sistemului, resetarea, prevenirea repornirii neașteptate, detectarea defectelor și timpii de oprire atunci când aceștia intră în calculul distanțelor de protecție. Nu există praguri universale de 0,5 s sau 5 ms pentru toate aplicațiile; criteriile provin din evaluarea de risc, proiectarea funcției safety, standardele aplicabile și datele componentelor [3, 4, 149, 158].

Performanța validează cerințele cantitative contractuale: cadență/timp de ciclu, forță sau cuplu, precizie, repetabilitate, rată de neconformitate, consumuri, comunicații și alte KPI relevante. Mărimea eșantionului, toleranțele și condițiile de test trebuie definite înainte de FAT și justificate statistic/tehnic. Exemplul de 100 de cicluri poate fi util didactic, dar nu reprezintă o regulă universală.

În practică · Documentul Test Protocol: pregătirea explicită înainte de FAT

Un FAT profesionist se execută după un Test Protocol aprobat înainte de test. Documentul definește cerințele urmărite, testele, criteriile de acceptare, instrumentele, condițiile, evidențele și semnăturile/rolurile. Lungimea documentului rezultă din complexitate; nu există un număr universal de pagini sau o listă fixă de șase categorii.

Protocolul trebuie revizuit suficient de devreme pentru ca divergențele asupra criteriilor să fie rezolvate înaintea execuției. Lead time-ul poate fi de zile sau săptămâni, conform contractului. Principiul este separarea definirii criteriilor de măsurarea lor, pentru a evita schimbarea regulilor după observarea rezultatului.

Pentru proiectele complexe, Test Protocol-ul poate fi livrabil contractual și poate necesita aprobarea formală a clientului înainte de FAT. Condițiile exacte de intrare și efectul neaprobării rezultă din contract.

Categoria mecanică merită tratată explicit în protocol, deoarece multe erori de montaj sau de integrare pot deveni greu de corectat după pornirea dinamică. Lista de verificări trebuie însă construită din desene, toleranțe, specificațiile furnizorilor și riscurile aplicației. Tabelul 12.1 este, în consecință, un exemplu didactic de structurare a verificărilor mecanice și nu o colecție de praguri normative universale.

Tabelul 12.1. Exemplu didactic de verificări mecanice pentru FAT. Criteriile finale se preiau din desene, toleranțe, calcule, specificațiile producătorilor și standardele aplicabile; ordinea static înainte de dinamic este recomandată atunci când pornirea ar putea amplifica efectele unei neconformități de montaj.

Verificare	Prag de acceptare	Metoda
Planeitate cadru pe banc	Conform desenului, toleranțelor și cerințelor de instalare	Nivelă/laser/interferometrie sau metodă adecvată incertitudinii
Perpendicularitate ghidaje LM față de cadru	Conform toleranțelor geometrice din proiect și documentației ghidajelor	Comparator/CMM/laser, după precizia necesară
Aliniere cuplaje pe lanțul cinematic	Conform limitelor producătorilor cuplajului, rulmenților și proiectului	Laser alignment sau metodă echivalentă
Pretensionarea șuruburilor critice	Conform calculului și procedurii de montaj; VDI 2230 Blatt 1 unde este aplicabil [193]	Cheie/echipament de strângere calibrat + log
Jocuri funcționale (rulmenți, ghidaje)	În intervalul specificat de producător și de proiect	Comparator, lere sau metoda prescrisă de producător
Test zgomot / vibrație fără sarcină	Baseline și limite proiect-specifice; seria ISO 20816 numai unde partea relevantă intră în domeniu [37, 77]	Accelerometru/sonometru, puncte și condiții definite
Run termic în regim reprezentativ	Stabilizare și temperaturi sub limitele componentelor/proiectului	Termocupluri/RTD/termografie, cu log temporal

Ordinea verificărilor statice înaintea celor dinamice are o justificare inginerească: o dezaliniere, o fixare incorectă sau o preîncărcare neconformă trebuie corectate înainte ca ansamblul să acumuleze uzură ori deteriorări secundare. Efectul concret asupra duratei de viață nu se exprimă printr-un procent universal «per oră»; se evaluează prin modelele și limitele relevante pentru rulmenți, cuplaje, ghidaje și profilul de sarcină al aplicației.

12.2.3 Punchlist FAT: gestionarea neconformităților

Un FAT poate produce sau nu un punchlist, în funcție de rezultatele testelor. Atunci când apar neconformități, disciplina corectă este înregistrarea lor transparentă într-un registru controlat, cu identificator, descriere, severitate/criticitate, responsabil, termen și dovada închiderii. Punchlist-ul poate avea efect contractual dacă este definit în documentele proiectului; schema A/B/C utilizată în continuare este o convenție didactică frecventă, nu o clasificare impusă de IEC 62381.

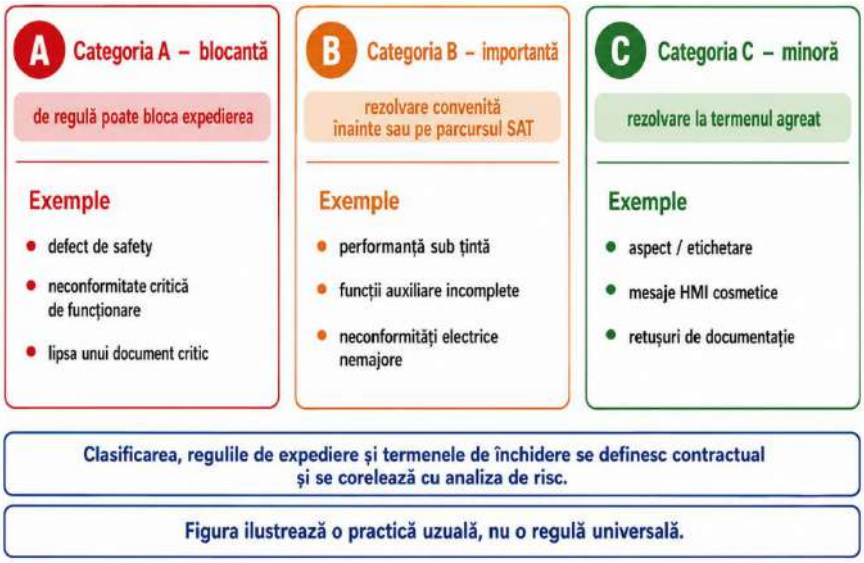


Figura 12.4. Exemplu de clasificare contractuală A/B/C a punctelor de punchlist: A blocant, B important, C minor. Regula de expediere și termenul de închidere pentru fiecare categorie trebuie stabilite în contract/protocol; clasificarea nu este universală.

Categoria A (BLOCANTĂ) poate fi definită contractual pentru neconformități care fac expedierea sau operarea sigură/acceptabilă imposibilă (Figura 12.4). Exemple pot include o funcție safety nevalidată, incapacitatea de a executa funcția principală sau o neconformitate structurală majoră. Nu este necesar ca remedierea să fie fizic imposibilă la client; criteriul relevant este efectul asupra acceptanței și riscul contractual/tehnic. Închiderea punctelor A înainte de expediere este obligatorie numai dacă această regulă a fost convenită.

Categoria B (IMPORTANTĂ) poate acoperi neconformități care afectează performanța, mentenabilitatea sau funcții secundare, dar pentru care părțile acceptă expedierea condiționată. Exemple: cadență sub țintă, diagnostic HMI incomplet, componentă auxiliară nefuncțională sau documentație tehnică parțială. Termenul de închidere și eventuala re-testare se stabilesc explicit.

Categoria C (MINORĂ) poate acoperi observații cosmetice, de etichetare sau documentare fără impact asupra siguranței ori funcției principale. Aceste puncte se închid la termenul contractual agreat; nu există un termen universal legat de finalul ramp-up-ului.

Tracking-ul punchlist-ului trebuie să asigure trasabilitate: număr unic, descriere și evidență, clasificare, responsabil, termen, status și verificarea închiderii. Instrumentul poate fi un PLM/QMS, un sistem de issue tracking sau o foaie controlată. Numărul de puncte și durata de închidere depind de maturitatea proiectului; un punchlist mare nu este în sine dovada unui proces bun sau rău, dacă severitatea și recurența sunt analizate corect.

12.3 SAT: Site Acceptance Test

Site Acceptance Test (SAT) este testul de acceptanță executat după instalarea la amplasamentul utilizatorului. El completează FAT prin verificări dependente de mediul real: utilități, infrastructură, integrarea cu echipamentele și sistemele existente, produse reprezentative și condiții de operare. SAT nu trebuie să repete mecanic toate testele FAT, ci să reconfirme cerințele afectate de transport/instalare și să demonstreze cerințele care nu puteau fi evaluate anterior.

Mediul real poate introduce variabile absente sau controlate la FAT: temperatură, vibrații structurale, contaminare, variații de tensiune, calitatea aerului comprimat, latențe de rețea și dispersia loturilor de produs. Aceste efecte justifică re-testarea selectivă și monitorizarea la SAT. Proporția problemelor «noi» descoperite la SAT nu este universală și nu trebuie prezentată ca procent fix; ea depinde de calitatea FAT, transport, instalare și integrarea la site.

12.3.1 Diferențele SAT vs FAT

FAT și SAT diferă prin context și prin obiectiv. În locul unei opoziții rigide «condiții ideale» versus «condiții reale», este mai corect să se considere că FAT maximizează controlul asupra configurației de test, iar SAT maximizează reprezentativitatea mediului final. Figura 12.5 utilizează nouă dimensiuni didactice pentru comparație; valorile concrete de temperatură, durată și resurse sunt specifice proiectului.

ASPECT	FAT	SAT
Locație	de regulă la producător	de regulă la beneficiar
Mediu / utilități	mediu controlat, utilități de test	utilități și condiții reale
Obiectiv dominant	verificarea construcției și a logicii	validarea în contextul de utilizare
Produse / sarcini	probe și scenarii de test	produs, flux sau sarcină reală
Personal implicat	constructor + client	utilizator + integrator + suport
Integrare de linie	limitată sau simulată	completă / cu interfețe reale
Fereastră de test	campanie scurtă și focalizată	campanie etapizată la punere în funcțiune
Dovezi generate	rapoarte de test și punchlist	raport SAT, training, handover
Rezultat	acceptare la fabricație	acceptare la punerea în funcțiune

Diferențele sunt orientative și se adaptează tipului de echipament, contractului și cerințelor aplicației.

Figura 12.5. Comparație didactică SAT vs. FAT pe nouă dimensiuni: locație, mediu, utilități, personal, produse/sarcini, durată, integrare de linie, test de performanță continuă și handover. Valorile exacte și efectele contractuale se definesc proiect-specific.

Mediul de operare este una dintre diferențele importante dintre FAT și SAT. La producător, temperatura, curățenia și vibrațiile externe pot fi mai bine controlate; la client, aceste condiții pot varia și trebuie comparate cu domeniul de mediu proiectat. Senzorii, electronică, pneumatica și structura mecanică pot răspunde diferit la temperatură, contaminare sau vibrații. De aceea, condițiile reale trebuie măsurate și documentate, nu presupuse prin intervale «tipice» universale.

Utilitățile de la site trebuie verificate față de specificația de interfață: tensiune și calitate a energiei, aer comprimat, fluide de proces, împământare și rețele de date. Soluțiile precum filtre, uscătoare, UPS, condiționare a energiei sau separare galvanică se justifică numai dacă măsurările și cerințele aplicației o cer. Pentru comunicațiile industriale, latența, jitter-ul, încărcarea și topologia se validează față de protocoalele și timpii de reacție proiectați.

Operatorii și personalul de mentenanță care participă la SAT trebuie instruiți pentru funcțiile și responsabilitățile lor. Conținutul, durata și metodă de evaluare a competenței se stabilesc în planul de training și pot include operare normală, schimbare de format, răspuns la alarme, oprire de urgență și activități de mentenanță autorizate. Numărul de ore nu este un criteriu universal; criteriul relevant este competența demonstrată pentru sarcinile definite.

Produsele/sarcinile de test la SAT trebuie să fie reprezentative pentru condițiile contractuale de producție și pentru variațiile relevante. Dacă la FAT se folosesc mostre, simulatoare sau materiale substitut, limitele acestora trebuie documentate. Pentru proiectele critice este utilă includerea, încă din FAT, a unui eșantion reprezentativ din producția clientului, pentru a reduce riscul de transfer.

12.3.2 Criteriile de acceptare cantitative

Acceptarea SAT se bazează pe criterii măsurabile convenite înainte de testare. Criteriile pot include cadență, calitate, disponibilitate, funcții safety, timp de restaurare, training, documentație și statusul neconformităților, dar setul exact depinde de aplicație. Fiecare criteriu trebuie să aibă definiție, țintă, fereastră de măsurare, metodă, instrumentație și regulă de decizie. Figura 12.6 este un exemplu didactic, nu o listă universal obligatorie.

Criteriu	Ținta se definește prin	Măsurare	Observații
Cadență	valoarea contractuală / specificația	fereastră de măsurare din protocol	în produs sau ciclu relevant
Disponibilitate / OEE	ținta negociată	monitorizare pe interval definit	dacă este cerută contractual
Calitate	criterii NOK / rebut	lot sau serie convenită	corelat cu produsul real
Safety	funcții SRP/CS conforme	verificări funcționale documentate	conform analizei de risc
Timp de restaurare	țintă de mentenabilitate	scenarii de oprire / repornire	definit pe aplicație
Competența operatorilor	nivel minim de operare	test practic / instruire	matrice de competențe
Documentație	pachet complet și actualizat	checklist de livrare	desene, manuale, backup
Punchlist	nivel rezidual acceptat	verificare la fața locului	criterii stabilite contractual

Figura prezintă cadrul de definire a criteriilor SAT; valorile și pragurile se stabilesc în contract și în protocol, nu universal.

Figura 12.6. Exemplu didactic de criterii cantitative pentru SAT: cadență, disponibilitate/OEE, calitate, safety, timp de restaurare, competența operatorilor, documentație și status punchlist. Țintele și regulile PASS/FAIL trebuie definite contractual pentru aplicația concretă.

Cadența/timpul de ciclu se măsoară într-o fereastră suficientă pentru variația procesului, folosind contoare PLC/MES sau măsurare independentă. Ținta, mixul de produs, condițiile de alimentare și tratamentul opririlor trebuie stabilite în contract. Un număr fix de 100 de cicluri poate fi un exemplu rezonabil pentru unele stații, dar nu este o cerință universală.

OEE poate fi utilizat ca indicator de acceptanță dacă definițiile Disponibilității, Performanței și Calității sunt agreate și datele sunt colectate în mod unitar. Formula OEE = A × P × Q este standard în practică, însă o țintă de 85 % sau 90 % nu are caracter universal. În plus, relația A = MTBF/(MTBF + MTTR) este o aproximație specifică unui model simplificat și nu trebuie substituită automat măsurării disponibilității operaționale din timpul run-at-rate [137, 138, 177].

Run-at-rate este un test de stabilitate la rata convenită, executat pe o durată suficientă pentru mecanismele de defectare și variațiile relevante. Durata poate fi de la câteva ore la mai multe schimburi sau loturi, dar se stabilește prin contract și analiză de risc. Scopul este identificarea driftului, defectelor intermitente, efectelor termice și problemelor de integrare care nu apar într-un test scurt.

Trainingul operatorilor poate fi criteriu de handover atunci când contractul o prevede. Evaluarea trebuie legată de competențe: operare normală, răspuns la alarme, schimbări de format autorizate, oprire în siguranță și activități de mentenanță de nivel operator. Numărul de persoane și durata sesiunilor sunt stabilite de organizația utilizatoare și de complexitatea echipamentului.

Statusul punchlist-ului FAT/SAT trebuie corelat cu regulile de acceptanță convenite. Dacă schema A/B/C este folosită, contractul precizează ce categorii trebuie închise înainte de SAT, handover sau finalizarea ramp-up-ului. Documentația as-built, manualele, certificatele și evidențele de test trebuie livrate conform matricei de livrabile; semnarea SAT nu modifică cerințele legale de păstrare a documentației tehnice prevăzute de legislația de produs.

Pentru subsistemul mecanic, criteriile operaționale pot fi completate cu măsurări specifice: vibrații, zgomot, aliniere, prestrângere, temperaturi și etanșeitate. Pragurile trebuie alese din standardul aplicabil, manualele producătorilor, calculele proiectului și condițiile contractuale. Tabelul 12.2 este un model de structură pentru protocol, nu un set de limite generice.

Tabelul 12.2. Exemplu de criterii mecanice pentru SAT. Țintele se stabilesc din standardele aplicabile, documentația producătorilor și specificația contractuală; valorile numerice nu trebuie transferate între proiecte fără verificarea domeniului de aplicare.

Criteriu mecanic	Ținta	Metoda de măsurare	Standard / referință
Vibrație pe carcasa rulmenților	Conform criteriului pentru clasa de mașină, punctul de măsurare și baseline	Accelerometru; FFT/trend după caz	Partea aplicabilă din seria ISO 20816; ISO 20816-3 numai dacă domeniul său este îndeplinit [37, 77]
Zgomot în operare normală	Conform specificației contractuale și evaluării de zgomot	Sonometru, poziție și condiții definite	ISO 11202:2010+Amd 1:2020 sau standardul aplicabil [194]
Aliniere cuplaj motor–arbore	Conform limitelor producătorilor și proiectului	Laser alignment / comparator	Documentația cuplajului/rulmenților

Criteriu mecanic	Ținta	Metoda de măsurare	Standard / referință
Pretensionare șuruburi critice	Conform procedurii de montaj și calculului	Echipament de strângere calibrat + log	VDI 2230 Blatt 1 unde este aplicabil [193]
Run-in termic	Temperaturi și stabilizare conform limitelor componentelor/procesului	Senzori de temperatură + trend	Specificațiile producătorilor / protocol
Scurgeri pneumatice/hidraulice	Conform cerințelor proiectului și limitelor admise	Metoda adecvată fluidului și presiunii	ISO 4413 / ISO 4414 unde sunt aplicabile [78, 79]

Înregistrarea valorilor măsurate și semnarea rapoartelor de SAT asigură trasabilitatea contractuală și tehnică. Rapoartele FAT/SAT pot fi incluse în pachetul de verificare/validare și, dacă susțin demonstrarea conformității, pot fi păstrate ca dovezi în documentația tehnică relevantă. Structura didactică a dosarului tehnic din Capitolul 10 nu trebuie confundată cu o secțiune juridică obligatorie denumită «G» în Regulamentul (UE) 2023/1230.

12.3.3 Ramp-up de producție și knowledge transfer

După SAT poate urma o perioadă de ramp-up/producție asistată, dacă aceasta este prevăzută în contract sau este justificată de riscul de pornire. Scopul este stabilizarea procesului, închiderea punctelor rămase, transferul de cunoștințe și confirmarea configurației as-built. Durata și nivelul de suport nu sunt universale; ele se stabilesc din complexitate, maturitatea organizației clientului și criteriile de ieșire.

Activitățile de ramp-up pot include: diagnoza problemelor apărute în producție; knowledge transfer către mentenanță și automatizare; predarea și verificarea documentației as-built; transferul controlat al conturilor, certificatelor și credentialelor, urmat de schimbarea lor conform politicii de cybersecurity a clientului; confirmarea stocului de piese de schimb și a procedurilor de suport. Toate modificările apărute în această perioadă trebuie supuse aceluiași change control ca restul ciclului de viață.

Ramp-up-ul trebuie bugetat pe baza unui plan de suport și a riscului, nu printr-o durată fixă sau prin calificative de tip «producător experimentat». Un proiect poate necesita doar asistență remote, iar altul prezență on-site pe mai multe schimburi. Indicatorii utili sunt timpul până la atingerea performanței stabile, numărul și severitatea defectelor reziduale, autonomia echipei clientului și închiderea livrabilelor.

12.3.4 Re-acceptanța mecanică post-transport: verificări dependente de instalare

Transportul, manipularea și instalarea pot modifica starea mecanică față de cea verificată la FAT. De aceea, SAT trebuie să includă verificări de re-acceptanță pentru caracteristicile sensibile la transport și fundație: nivelare, aliniere, fixări, conexiuni, protecții și eventuale deteriorări. Domeniul acestor verificări se stabilește din analiza de transport/instalare și din instrucțiunile de montaj.

Re-alinierea cuplajelor sau a axelor după instalare este necesară atunci când toleranțele proiectului ori instrucțiunile producătorului o cer. Nu se presupun valori universale pentru planeitatea fundației sau offset-ul cuplajelor; acestea depind de tipul cuplajului, rulmenți, turație, sarcină și cerințele sistemului. Măsurarea laser poate fi adecvată pentru aplicațiile cu toleranțe stricte, dar metoda se selectează în funcție de precizia necesară.

Re-verificarea/prestrângerea elementelor de fixare după primele cicluri poate fi inclusă în planul de commissioning dacă producătorul ancorelor, proiectantul structural sau procedura de montaj o solicită. Intervalele de 24/72 h și procentele de pierdere a prestrângerii nu sunt reguli universale; orice re-torque trebuie să respecte metoda și condițiile definite pentru îmbinarea concretă.

Evaluarea vibrațiilor la site poate identifică excitații externe care nu existau la FAT. Se compară măsurările de bază cu cele de la amplasament și, dacă apar componente spectrale neobișnuite, se investighează sursa și apropierea de frecvențele proprii relevante. Soluțiile (rigidizare, modificarea masei, izolare, schimbarea regimului de turație) se aleg prin analiză dinamică; simpla observare a unui vârf FFT nu justifică automat o modificare structurală.

12.4 Virtual Commissioning: testare pe model virtual

FAT și SAT depind de disponibilitatea hardware-ului fizic. Virtual Commissioning permite deplasarea unei părți din verificare mai devreme, prin conectarea controlului la modele ale plant-ului. Beneficiul nu trebuie argumentat prin «regulă 1-10-100» ca lege universală; principiul robust este că defectele descoperite înainte de instalare sunt, în general, mai ușor și mai ieftin de corectat decât cele descoperite după integrarea fizică și contractuală.

Virtual Commissioning este o practică consacrată în automatizare. VDI/VDE 3693 Blatt 1:2025 oferă terminologie actualizată, tipuri de modele și configurații de test și poziționează VC în ciclul de viață al instalației/mașinii [189]. SiL și HIL sunt configurații utile pentru a descrie locul în care rulează controllerul și modelul; un digital twin poate susține VC, dar nu trebuie prezentat drept „nivelul 3” formal și obligatoriu al unei ierarhii SiL–HIL–DT.

12.4.1 Conceptul, beneficiile și justificarea economică

Conceptul Virtual Commissioning este simplu în principiu: în loc să se aștepte construirea echipamentului fizic pentru a testa programul PLC, se creează un model virtual al echipamentului (mecanic, senzori, actuatoare) care răspunde la semnalele PLC similar cu echipamentul real. Programul PLC se rulează pe acest model (fie pe PLC real, fie pe simulator software) și comportamentul este observat în HMI sau în vizualizări 3D. Erorile de programare se detectează și se corectează pe model; programul corectat se încarcă apoi pe echipamentul fizic când acesta devine disponibil. Beneficiul fundamental: faza de commissioning real se scurtează dramatic; multe erori sunt deja corectate, iar verificarea se concentrează pe aspectele care nu pot fi simulate (fricțiuni reale, timing-uri exacte ale senzorilor reali, etc.).

Beneficiile Virtual Commissioning trebuie evaluate pe proiect: acoperirea testelor de logică, reducerea timpului de debug on-site, paralelizarea activităților, reutilizarea modelelor și reducerea riscului de coliziuni sau de integrare. Literatura și studiile de caz raportează economii diferite, dar nu există procente universale aplicabile tuturor proiectelor. Pentru decizia de investiție se recomandă o comparație între costul modelării/simulării și costul estimat al defectelor, întârzierilor și resurselor de commissioning pe care modelul le poate evita.

Exemplu didactic de ROI. Pentru o linie automată, echipa poate compara două scenarii: commissioning fără VC și commissioning cu investiție în modelare, licențe și testare virtuală. Economiile se calculează din orele de inginerie și timpul de oprire evitate, reducerea rework-ului și efectele asupra termenului de livrare, iar costurile includ dezvoltarea și mentenanța modelului. Valorile numerice

trebuie tratate ca ipoteze ale analizei cost–beneficiu și validate prin datele organizației; nu se prezintă ca rezultate «validate» generic de OEM-uri.

12.4.2 Configurația SiL (Software-in-the-Loop)

Într-o configurație SiL, logica de control rulează într-un mediu software, iar plant-ul este reprezentat prin modele comportamentale sau fizice. PLC-ul poate fi simulat, iar HMI-ul și interfețele software pot fi conectate la aceeași configurație. SiL este potrivit pentru verificarea secvențelor, state machine/Grafcet, interblocărilor logice, modurilor de operare, alarmelor și scenariilor de eroare; fidelitatea timing-ului și a interfețelor hardware depinde de simulator.

Avantajele SiL sunt flexibilitatea și posibilitatea de testare timpurie. Limitele sunt date de diferențele dintre runtime-ul simulat și hardware-ul final, de modelele plant-ului și de acoperirea fenomenelor fizice. Nu se atribuie un procent universal de «erori detectate»; eficacitatea se măsoară prin test coverage, defecte găsite înainte de integrare și reducerea rework-ului.

12.4.3 Configurația HIL (Hardware-in-the-Loop)

Într-o configurație HIL, controller-ul real este conectat la un plant simulat prin I/O sau comunicații industriale emulate/realizate în timp real. Această configurație permite verificarea ciclurilor reale de execuție, watchdog-urilor, latențelor, interfețelor de rețea și comportamentelor dependente de hardware. Instrumentația poate varia de la soluții dedicate de real-time simulation la I/O de test construite pentru proiect.

HIL poate descoperi probleme de integrare care nu apar în SiL, dar beneficiul depinde de fidelitatea interfețelor și de scenariile testate. Costurile și rata de detecție nu sunt constante și nu se justifică o afirmație că HIL este obligatoriu sau universal la toți OEM-ii auto. Alegerea se face pe baza criticității timing-ului, numărului de drive-uri/rețele, riscului de integrare și posibilității de reutilizare a bancului HIL.

12.4.4 Modele cu fidelitate ridicată și Digital Twin

Un model 3D mecatronic cu cinematică, senzori și actuatoare poate fi utilizat în Virtual Commissioning pentru verificarea interfețelor spațiale, coliziunilor, secvențelor și anumitor efecte dinamice (Figura 12.7). Un digital twin este un concept mai larg decât o simplă simulare 3D de pre-FAT: el presupune o reprezentare digitală menținută și corelată cu activul pe ciclul de viață. Fidelitatea necesară se alege după întrebările de test; un model mai complex nu este automat mai bun dacă parametrii nu sunt validați.

Platformele utilizate pentru astfel de modele includ, între altele, Siemens NX Mechatronics Concept Designer și Tecnomatix, Dassault DELMIA, Visual Components, RobotStudio și alte medii de simulare/robotică. Alegerea depinde de ecosistemul de control, modelele CAD disponibile, capacitățile de co-simulare și interfețele necesare. Costurile și efortul de modelare sunt proiect-specifice și trebuie evaluate în raport cu reutilizarea modelului și riscul tehnic.

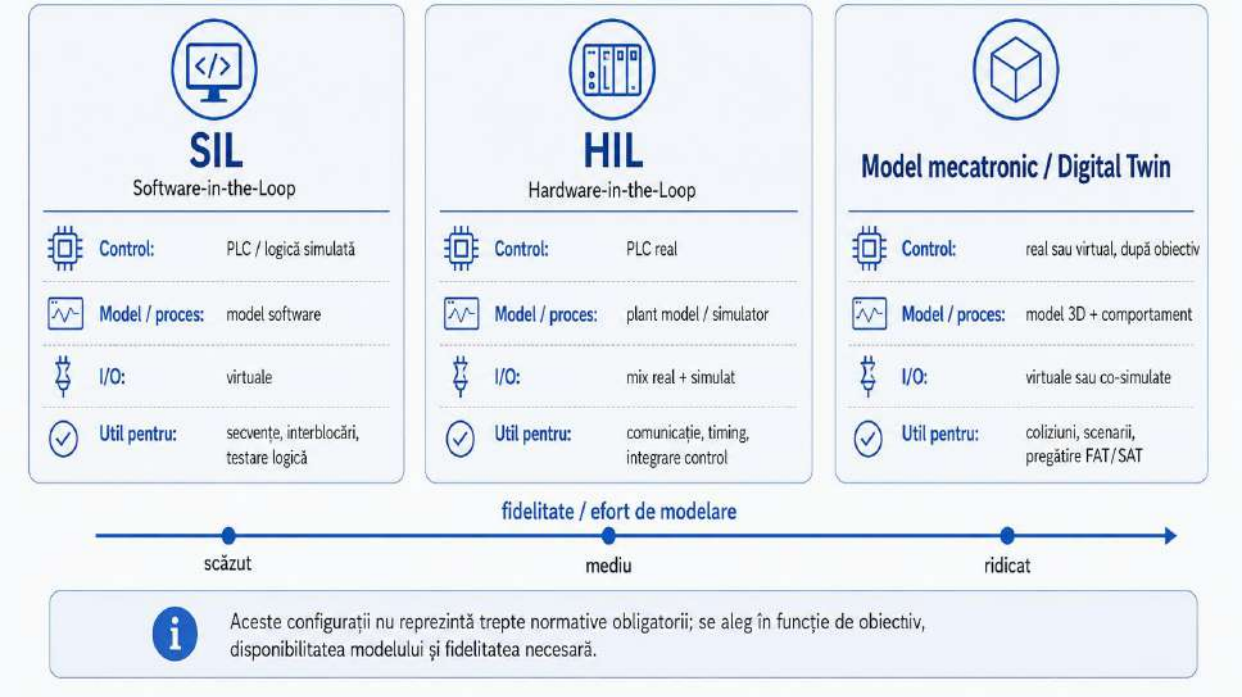


Figura 12.7. Configurații reprezentative pentru Virtual Commissioning: SiL, HIL și model mecatronic/digital twin utilizat în testare. Acestea nu reprezintă trepte normative obligatorii; fidelitatea și configurația se aleg în funcție de obiectivul de verificare și de ciclul de viață.

Modelele cu fidelitate ridicată pot permite testarea unor scenarii dificil sau riscant de provocat pe echipamentul fizic, verificarea coliziunilor, evaluarea accesibilității și instruirea operatorilor. Eficacitatea depinde de validitatea modelului: un scenariu virtual nu înlocuiește testele fizice de safety sau performanță care sunt cerute de standarde, contract ori evaluarea de conformitate. Rezultatele VC trebuie trasate la cerințe și reconfirmate acolo unde modelul nu reproduce suficient fenomenul real.

În practică · Exemple de utilizare a Virtual Commissioning

Celule robotizate: modelele 3D și simularea controlului pot fi folosite pentru envelope de mișcare, coliziuni, secvențe, interblocări și training. Beneficiul trebuie evaluat prin defectele evitate și timpul de debug redus, nu prin procente universale.

Mașini de ambalare/FMCG: state model-ul PackML, handshake-urile și scenariile de fault/recovery pot fi testate virtual înainte de integrarea fizică. Acoperirea depinde de stările și funcțiile implementate.

Sisteme cu servodrive-uri: HIL poate fi util pentru timing, comunicații și interacțiunea controller–drive, mai ales când testele fizice sunt costisitoare sau hardware-ul nu este disponibil.

Linii cu reutilizare de module: valoarea VC crește atunci când bibliotecile de modele, testele și interfețele pot fi reutilizate pe mai multe proiecte; maturitatea modelului este o condiție importantă pentru ROI.

12.4.5 Virtual commissioning mecanic: gemeni digitali pentru subsistemul fizic

SiL/HIL și modelele mecatronice pot fi completate cu simulări orientate direct spre subsistemul fizic: cinematică, multi-body dynamics, FEM, vibrații și analize de toleranțe. Scopul este detectarea timpurie a interferențelor, suprasarcinilor tranzitorii, sensibilităților la toleranțe și problemelor de rigiditate/dinamică înainte ca acestea să devină rework fizic.

Verificarea cinematică pe MCAD este nivelul de bază: mișcările și envelopele sunt simulate pentru detectarea interferențelor și validarea curselor. Pentru mecanisme simple pot fi suficiente instrumentele integrate în CAD; pentru lanțuri complexe, roboți sau mecanisme cu efecte dinamice semnificative se pot utiliza medii multi-body specializate. Modelul trebuie construit din gradele de libertate, constrângerile și parametrii reali relevanți.

Simularea multi-body (MBS) poate estima forțe în articulații, momente, accelerații și sarcini tranzitorii, utile pentru dimensionarea componentelor și pentru definirea testelor de acceptanță. Rezultatele trebuie corelate cu ipotezele de rigiditate, amortizare, frecare și cu datele de producător; nu se presupune un procent universal cu care solicitările tranzitorii depășesc regimul stabil.

Analiza modală/FEM și măsurările de vibrații completează evaluarea dinamică atunci când riscul de rezonanță este relevant. Apropierea dintre frecvențele proprii și excitările de operare se evaluează prin model și/sau test, ținând cont de amortizare și spectrul real de excitație; nu se aplică un interval universal 0,7–1,3. Justificarea economică a simulării mecanice se face prin costul rework-ului și riscul proiectului, nu printr-un ROI procentual generic.

12.5 ECR / ECO: gestionarea modificărilor post-livrare

Acceptanța SAT nu încheie ciclul de viață al configurației. Echipamentul poate fi modificat pentru produse noi, obsolescență, mentenanță, securitate, optimizare sau integrarea în alte sisteme. Orice modificare relevantă trebuie documentată astfel încât configurația fizică, software-ul și documentația as-built să rămână sincronizate, iar impactul asupra safety și conformității să fie evaluat.

ECR/ECO este utilizat aici ca model de change control: ECR inițiază și justifică schimbarea, analiza de impact identifică efectele, aprobarea autorizează direcția, iar ECO controlează implementarea și actualizarea configurației. Denumirile și documentele concrete diferă între organizații și PLM/QMS; fluxul nu trebuie prezentat ca un standard juridic universal. Ca reper transversal, ISO 10007:2017 oferă ghid pentru configuration management de la concept până la scoaterea din uz; ECR/ECO sunt etichete organizaționale și nu documente impuse de acest standard [195].

12.5.1 De ce modificările sunt inevitabile

Sursele de modificare includ schimbări ale produsului procesat, optimizări de proces, defecte recurente, obsolescența componentelor, vulnerabilități de cybersecurity, actualizări software și cerințe contractuale noi. Frecvența lor diferă mult între sectoare; de aceea change control-ul trebuie proiectat ca proces permanent, nu ca excepție.

Actualizările de firmware și software trebuie tratate prin analiză de impact, mai ales când ating funcții safety, comunicații, cybersecurity sau date reglementate. De asemenea, apariția unei noi ediții de standard nu obligă automat la retrofitarea tuturor mașinilor deja puse legal în funcțiune. Relevanța unei ediții noi se analizează în raport cu legislația aplicabilă, modificarea efectuată, starea tehnicii, contractul și politica organizației.

12.5.2 Procesul ECR / ECO în 4 pași

Procesul ECR/ECO din acest capitol are patru pași: cerere, analiză de impact, aprobare și implementare controlată (Figura 12.8). Este o structură didactică robustă pentru configuration management, dar

rolurile, pragurile de aprobare și documentele sunt definite de sistemul de management al organizației. Elementul esențial este trasabilitatea dintre motivul modificării, evaluarea riscurilor, configurația aprobată și dovezile de re-verificare/re-validare [195].

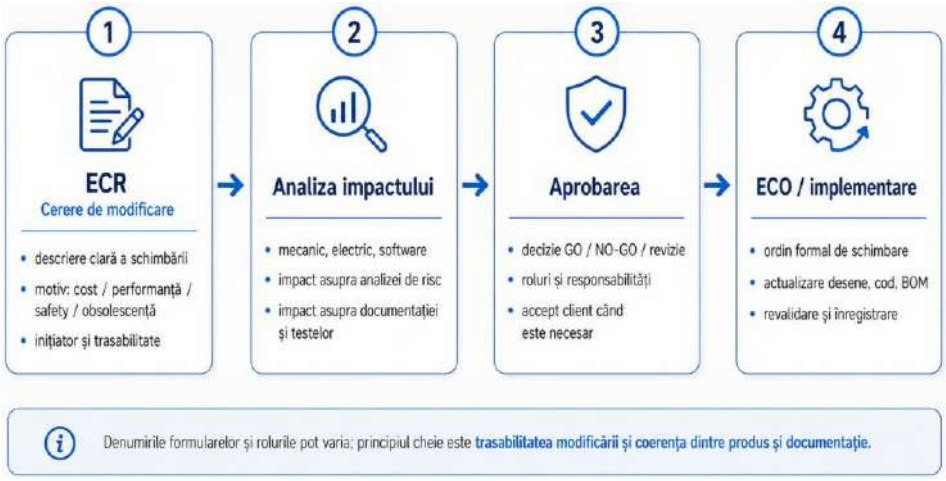


Figura 12.8. Flux didactic ECR/ECO în 4 pași: cerere de modificare, analiză de impact multidisciplinară, aprobare și ordin/implementare controlată. Denumirile documentelor pot varia; principiul este menținerea trasabilității între echipament, software și documentația tehnică.

Pasul 1. ECR (Engineering Change Request): documentează ce se propune, de ce este necesar, cine inițiază și ce configurație este afectată. Cererea trebuie să includă suficiente informații pentru trierea riscului și pentru definirea analizei de impact; ea nu autorizează implementarea.

Pasul 2. Analiza impactului. Examinează disciplinele relevante: mecanică, electrică, software, safety, cybersecurity, calitate, validare și documentație. Se evaluează funcțiile și cerințele afectate, compatibilitatea, riscurile, necesarul de test și impactul asupra conformității. Durata analizei nu este fixă; complexitatea și criticitatea determină resursele necesare.

Pasul 3. Aprobare: decizia și nivelul de semnare sunt stabilite de governance-ul proiectului. Safety, quality/regulatory și clientul trebuie implicați atunci când schimbarea intră în domeniul lor de responsabilitate. O decizie de aprobare trebuie să identifice clar condițiile, testele și documentele obligatorii înainte de release.

Pasul 4. ECO / implementare controlată: definește configurația aprobată, desenele și software-ul revizuite, listă de componente, planul de implementare, testele de regresie și criteriile de release. Re-FAT sau re-SAT se aplică numai în măsura în care cerințele afectate trebuie reconfirmate. Documentele as-built și revision history se actualizează înainte de închiderea schimbării.

Modificările mecanice pot necesită verificări suplimentare deoarece schimbă lanțuri de sarcină, cinematică, rigiditatea sau interfețele de montaj. Înlocuirea unui reductor, a unei axe sau a unui fixture trebuie analizată pentru aliniere, sarcini, raport de transmisie, envelope de mișcare și eventuale efecte asupra safety. Domeniul mini-protocolului de re-acceptanță se stabilește din impactul schimbării, nu printr-o listă fixă.

De exemplu, schimbarea unui reductor poate cere re-alinierea cuplajelor, verificarea raportului de transmisie, recalibrarea poziționării și, dacă masa/rigiditatea se schimbă semnificativ, o reevaluare dinamică. Toleranțele se preiau din specificațiile producătorilor și din proiect, nu dintr-o limită generică

de 0,05 mm/m. Schimbarea ghidajelor poate necesita verificarea suprafețelor de montaj și a preîncărcării conform documentației noii componente.

12.5.3 Obsolescence management: gestionarea ciclului de viață

Obsolescența trebuie tratată prin datele lifecycle reale ale componentelor, nu prin ipoteza că electronică are întotdeauna 10–15 ani iar mecanică 20–25 ani. Unele platforme au suport mult mai lung, altele sunt retrase rapid. Riscul crește atunci când un component critic nu mai are suport, piese, actualizări de securitate sau alternativă calificată, iar timpul de oprire potențial este mare.

Obsolescence management include identificarea componentelor critice, monitorizarea notificărilor PCN/EOL, evaluarea succesorilor, planuri de migrare și, unde este justificat, stoc strategic. Criteriile de declanșare și orizontul de planificare se stabilesc din criticitate, lead time, disponibilitatea alternativelor și politica de cybersecurity/quality. IEC 62402:2019 oferă cerințe și ghid pentru managementul obsolescenței pe întreg ciclul de viață și pentru toate tehnologiile relevante [196].

În practică · Risc tipic: desincronizare echipament-documentație

O problemă frecventă la echipamentele modificate de-a lungul vieții este desincronizarea dintre configurația fizică, software și documentația as-built. Riscul crește odată cu numărul de modificări informale și cu lipsa unui repository controlat, nu cu atingerea unei vârste fixe a echipamentului.

Consecințele includ diagnoză dificilă, selecția greșită a pieselor de schimb, restaurare lentă după defect și neconcordanțe la audit sau la reevaluarea conformității.

Soluția este un proces de change/configuration management cu versionare, aprobări, backup-uri și audit periodic al configurației reale față de documentație. Frecvența auditului și efortul se stabilesc prin criticitate și rata de schimbare; nu există un cost anual universal.

12.6 Modificarea substanțială: Reg. UE 2023/1230

Secțiunea §12.5 a tratat change control-ul curent. Pentru echipamentele aflate în domeniul Regulamentului (UE) 2023/1230, o modificare poate intra însă în categoria juridică de «modificare substanțială». Definiția este la art. 3 pct. (16), iar art. 18 stabilește că persoana fizică sau juridică ce realizează o astfel de modificare este considerată producător pentru echipamentul afectat și trebuie să îndeplinească obligațiile corespunzătoare, inclusiv evaluarea conformității relevantă conform art. 25 [28].

Regulamentul (UE) 2023/1230 se aplică în general de la 20 ianuarie 2027. «Modificarea substanțială» este definită pentru o modificare fizică sau digitală efectuată după introducerea pe piață sau punerea în funcțiune, neprevăzută/neplanificată de producător, care afectează siguranța prin crearea unui nou pericol sau creșterea unui risc existent și care necesită măsurile de protecție descrise explicit în art. 3 pct. (16). Consecința este o nouă evaluare a conformității pentru echipamentul afectat, nu aplicarea automată a unui prag procentual de forță, viteză sau risc [28].

12.6.1 Definiția formală: art. 3 pct. (16), obligațiile din art. 18

Criteriul juridic trebuie citit cumulativ. Mai întâi, modificarea este realizată după introducerea pe piață/punerea în funcțiune și nu a fost prevăzută sau planificată de producător. O schimbare executată în limitele și condițiile deja documentate de producător nu intră, numai prin existența sa, în această categorie.

Apoi se analizează efectul asupra siguranței: modificarea creează un nou pericol sau mărește un risc existent. Evaluarea trebuie susținută prin risk assessment și prin comparația dintre configurația inițială și cea propusă, nu prin impresii sau praguri numerice generice.

În plus, definiția cere ca efectul asupra siguranței să necesite fie adăugarea de guards/protective devices a căror integrare impune modificarea sistemului existent de control al siguranței, fie măsuri de protecție suplimentare pentru stabilitate sau rezistență mecanică. Aceste elemente explicite sunt decisive. Blue Guide 2022, în versiunea publicată în Jurnalul Oficial și corectată în septembrie 2026, oferă context orizontal neobligatoriu privind regulile UE pentru produse și modificări, dar nu introduce în Regulamentul 2023/1230 praguri de 25 % sau 50 % pentru forță/viteză [197].

12.6.2 Exemple: modificări care, de regulă, nu îndeplinesc criteriul dacă siguranța rămâne neafectată

Exemplele următoare sunt orientative. Clasificarea finală trebuie făcută pe configurația concretă și documentată în change control/risk assessment. Nu este suficientă eticheta «echivalent» sau «bug fix»; trebuie demonstrat că modificarea rămâne în limitele prevăzute și nu produce condițiile din art. 3 pct. (16).

Înlocuirea unui senzor cu un model echivalent poate rămâne o modificare obișnuită dacă funcția, interfața, caracteristicile relevante și, unde este cazul, integritatea funcției safety rămân în domeniul proiectat. BOM-ul, desenele și verificările afectate se actualizează. Dacă senzorul participă la o funcție de siguranță, echivalența trebuie demonstrată și funcția revalidată la nivelul necesar.

Actualizarea firmware-ului/software-ului fără schimbarea funcției intenționate poate fi gestionată prin ECR/ECO dacă analiza de impact confirmă că safety, performanța și conformitatea rămân în limitele aprobate. Migrarea între versiuni de tool nu garantează automat identitate de runtime; sunt necesare backup, compatibilitate, test de regresie și validarea funcțiilor afectate.

Schimbarea unui fixture sau a unui format de produs poate rămâne în domeniul prevăzut dacă gama, sarcinile, envelopele și modurile de schimbare au fost deja evaluate și documentate de producător. Dacă noul fixture modifică accesul la pericol, forțele, stabilitatea sau funcțiile safety, clasificarea trebuie reevaluată.

Înlocuirea pieselor de uzură conform instrucțiunilor și cu piese specificate/echivalente calificate este, în mod normal, mentenanță. Trasabilitatea se menține prin evidențele de mentenanță; un ECR formal poate fi necesar dacă piesa sau configurația diferă de cea aprobată.

12.6.3 Exemple: modificări care necesită o evaluare aprofundată și pot deveni substanțiale

Exemplele de mai jos nu sunt «substanțiale prin definiție» numai prin tipul schimbării. Ele trebuie trecute prin criteriile art. 3 pct. (16). Dacă sunt îndeplinite condițiile și schimbarea este substanțială, art. 18 tratează persoana care o execută ca producător pentru echipamentul afectat și impune aplicarea procedurii relevante de evaluare a conformității.

Adăugarea unui robot într-o celulă existentă poate crea noi zone de mișcare, pericole și interfețe safety. Evaluarea trebuie să considere ansamblul rezultat, integrarea conform ISO 10218-2:2025 unde este aplicabil, funcțiile safety și guarding-ul. În multe configurații, o asemenea schimbare va conduce la

o reevaluare de conformitate amplă; calificarea juridică exactă depinde de criteriile Regulamentului și de configurația inițială [12].

Creșterea forței, vitezei sau energiei unui actuator poate mări riscul și poate necesita măsuri de protecție suplimentare, dar Regulamentul nu stabilește un prag generic de +25 %. Evaluarea se face prin severitate, expunere, posibilitatea de evitare, stabilitatea/rezistența mecanică și performanța funcțiilor safety. Dacă sunt îndeplinite condițiile art. 3 pct. (16), schimbarea este substanțială.

Înlocuirea unui gard fix cu o cortină optică modifică principiul de protecție și, de regulă, cere recalcularea distanței de separare conform ISO 13855:2024, verificarea timpului total de oprire și validarea funcției safety. Poate constitui modificare substanțială dacă sunt îndeplinite condițiile art. 3 pct. (16), în special dacă integrarea protective device necesită modificarea sistemului de control al siguranței; nu se clasifică automat fără analiză [149].

Migrarea unui PLC/controler, inclusiv a unei platforme safety, necesită analiză de impact, test de regresie și revalidarea funcțiilor afectate. O migrare poate fi o schimbare controlată ne-substanțială sau poate deveni substanțială dacă modifică safety în sensul art. 3 pct. (16). Tipul PLC-ului, singur, nu decide calificarea juridică.

12.6.4 Flux practic de decizie bazat pe criteriile Regulamentului

Pentru utilizare inginerească, criteriile legale pot fi transformate într-un flux documentat, fără a-l prezenta ca «arbore standardizat al Blue Guide». Fluxul trebuie să urmărească definiția art. 3 pct. (16) și obligațiile art. 18: momentul și caracterul neprevăzut al schimbării; efectul asupra siguranței; necesitatea măsurilor de protecție specificate de definiție. Rezultatul și argumentele se păstrează în dosarul de change control/risk assessment.

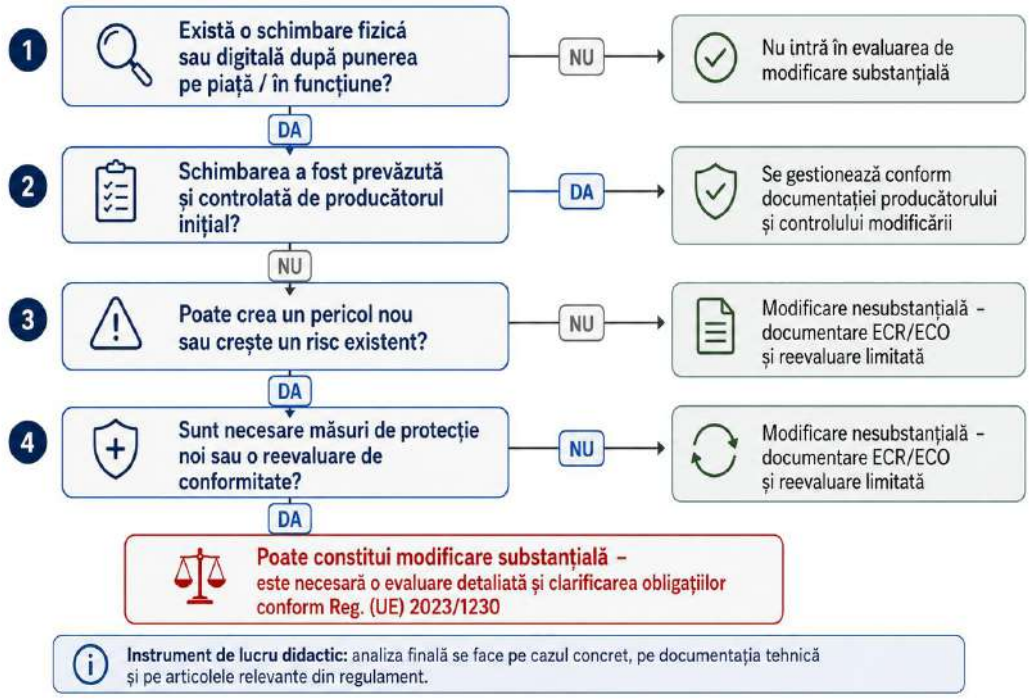


Figura 12.9. Flux didactic de evaluare a unei posibile modificări substanțiale, construit pe art. 3 pct. (16) și art. 18 din Regulamentul (UE) 2023/1230. Figura trebuie utilizată ca instrument de lucru, nu ca prag numeric sau ca substitut al textului juridic [28].

Întrebarea 1. Modificarea este fizică/digitală după introducerea pe piață sau punerea în funcțiune și nu a fost prevăzută/planificată de producător? Dacă NU, analiza de «modificare substanțială» în sensul art. 3 pct. (16) se oprește, dar change control-ul tehnic rămâne necesar (Figura 12.9).

Întrebarea 2. Modificarea afectează siguranța prin crearea unui nou pericol sau prin creșterea unui risc existent? Evaluarea se documentează prin risk assessment. Regulamentul nu oferă benzi procentuale universale 25–50 %; semnificația creșterii rezultă din situația de risc și din măsurile necesare.

Întrebarea 3. Efectul asupra siguranței necesită (a) adăugarea de guards/protective devices a căror integrare impune modificarea sistemului existent de control al siguranței sau (b) măsuri suplimentare pentru stabilitate ori rezistență mecanică? Dacă DA și condițiile anterioare sunt îndeplinite, modificarea intră în definiția art. 3 pct. (16), iar art. 18 și art. 25 devin relevante pentru obligațiile de producător și evaluarea conformității [28].

12.7 Studii de caz FAT/SAT din industrie

Secțiunile §12.2 și §12.3 au definit principiile FAT/SAT. Exemplele următoare sunt scenarii didactice anonimizate, construite pentru a evidenția diferențele dintre sectoare; nu sunt prezentate ca rapoarte auditate sau benchmark-uri universale (Figura 12.10). Duratele, cadențele, eșantioanele și criteriile numerice trebuie înlocuite cu cerințele proiectului real.

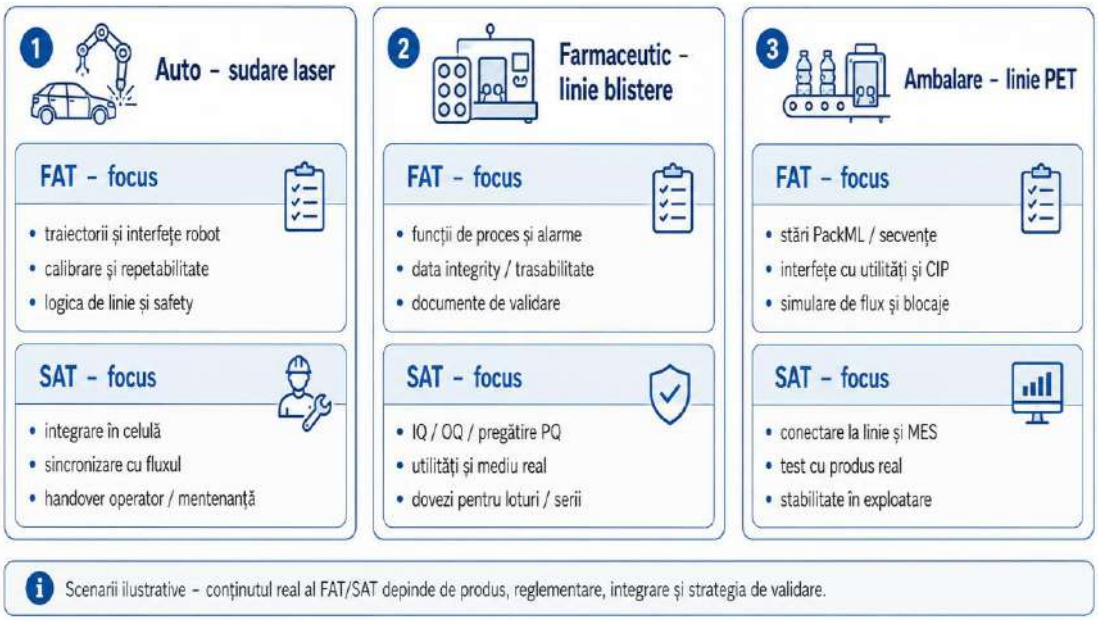


Figura 12.10. Trei scenarii didactice FAT/SAT pentru sectoare diferite: auto (sudare laser), farmaceutic (linie blistere) și ambalare (linie PET). Valorile din figură ilustrează structura unei analize comparative și nu reprezintă standarde sectoriale obligatorii.

12.7.1 Sector auto: stație de sudare laser

Context didactic: celulă de sudare laser robotizată pentru un subansamblu auto, integrată într-o linie de producție. Valorile de putere, cadență și toleranțe din scenariu sunt ipoteze de proiect folosite pentru a exemplifica structura FAT/SAT; într-un proiect real ele provin din specificația OEM/Tier-1 și din standardele aplicabile laserului, robotului și procesului.

FAT-ul didactic urmărește: sursa laser și optica; robotul și traiectoriile; calitatea sudurii pe mostre; funcțiile de siguranță ale celulei; comunicațiile cu PLC-ul de linie. Durata, numărul de cicluri și criteriile de repetabilitate se definesc în protocol. Pentru aplicațiile robotizate se verifică edițiile actuale ISO 10218-1/-2:2025 și cerințele de integrare aplicabile [12, 154].

SAT-ul didactic verifică instalarea în poziția finală, integrarea cu conveiorul și stațiile adiacente, produsele reale, run-at-rate-ul convenit, trainingul și handover-ul documentației. Durata de cinci zile și exemplul de cadență sunt ipoteze de scenariu, nu cerințe generale ale sectorului auto.

12.7.2 Sector farmaceutic: linie blistere

Context didactic: linie de ambalare blistere pentru produse farmaceutice, cu cerințe GMP și sisteme computerizate care pot intra în domeniul Annex 11/21 CFR Part 11, în funcție de utilizarea și înregistrările reglementate. Scenariul ilustrează integrarea FAT/SAT cu lifecycle qualification, nu stabilește o rețetă universală pentru toate instalațiile farma [190]–[191].

Într-un proiect GMP, FAT poate furniza dovezi reutilizabile în calificare dacă sunt planificate, aprobate și executate sub control adecvat. IQ/OQ/PQ se structurează conform strategiei de calificare bazate pe risc; Annex 15 precizează că PQ urmează în mod normal IQ și OQ, dar unele activități pot fi combinate

justificat. Pentru sistemele computerizate, Annex 11 și cerințele privind integritatea datelor trebuie integrate în planul de validare [190, 198].

La site se reconfirmă instalarea și utilitățile, se execută calificările/validările necesare și se testează produsul/procesul în condiții reprezentative. Numărul de loturi, dimensiunea eșantionului și criteriile cleanroom sunt determinate de proces, VMP/protocol și reglementările aplicabile; exemplul numeric din scenariu nu trebuie generalizat.

12.7.3 Sector ambalare: linie PET de mare cadență

Context didactic: linie integrată de îmbuteliere PET cu mai multe mașini, comunicare între echipamente și integrare MES. Cadența și arhitectura prezentate sunt ipoteze de studiu de caz. Cerințele igienice, CIP și comunicațiile se stabilesc din produs, proces și specificația utilizatorului.

FAT-ul poate fi etapizat pe mașini și apoi pe linia integrată. Se verifică performanța fiecărei mașini, handshake-urile, recuperarea după opriri, stările/modurile PackML implementate și integrarea OPC UA/MES. Durata și testele de cadență se stabilesc prin protocol; ISA-TR88.00.02 oferă un reper pentru state model și PackTags, dar nu impune aceeași listă de teste fiecărei linii [135].

SAT-ul verifică utilitățile reale, produsul real, integrarea completă și stabilitatea în fereastra de run-at-rate agreată. Un test pe mai multe schimburi poate fi justificat pentru procese continue, dar 72 h și OEE > 85 % nu sunt standarde universale ale FMCG. Trainingul și documentația se dimensionează în funcție de organizația utilizatoare și de criteriile contractuale.

12.8 Studiu de caz integrat: FAT/SAT pentru stația SAP

Acest studiu tratează SAP de referință (asamblare tub–carcasă, presare electrică Z, fixare pneumatică CL1/CL2) și ilustrează traseul cerință–verificare–acceptanță. Cadența de 120 ansambluri/oră și limita de proiectare de 8 kN sunt ipoteze didactice preliminare, nu cerințe contractuale ori performanțe deja demonstrate. Rezultatele FAT/SAT, KPI-urile și timpii citați în exercițiu sunt date simulate; pentru o mașină reală se cer protocoale aprobate, măsurări, neconformități închise și configurație as-built identificată.

În scenariul didactic, FAT este împărțit în verificări statice, funcționale și de performanță. Valorile de protective bonding, izolație, presiune, timpi safety, rebut și forță se tratează drept rezultate ipotetice raportate la criterii de proiect definite anterior, nu drept praguri normative generice. Punchlist-ul rezultat este utilizat pentru a exemplifica change tracking-ul și decizia de expediere.

Punchlist-ul didactic conține puncte A/B/C pentru a ilustra prioritizarea și închiderea neconformităților. Numărul de puncte și clasificarea sunt ipoteze de studiu. În practică, severitatea se definește contractual, iar fiecare punct se închide numai după remediere și verificarea criteriului afectat.

SAT-ul didactic include integrarea PROFINET, revalidarea funcțiilor afectate de instalare, run-at-rate, măsurarea KPI și training. Durata de două săptămâni, OEE-ul și MTTR-ul prezentate sunt valori de scenariu. Regula profesională este ca fereastra de test și pragurile să provină din caietul de sarcini, din specificația tehnică de realizare și din protocolul aprobat.

Ramp-up-ul didactic urmărește închiderea punctelor rămase, problemele apărute în producția reală, knowledge transfer și predarea configurației finale. Valoarea disponibilității pe primul trimestru

este un rezultat ilustrativ; pentru un proiect real, KPI-urile se raportează cu definiția, perioada de măsurare și sursa de date.

În practică · Aplicarea Virtual Commissioning pe proiectul SAP: analiză didactică

Pentru stația SAP, alegerea VC se face printr-o analiză cost–beneficiu didactică: se identifică funcțiile care pot fi testate înainte de hardware, costul modelării, reutilizarea modelelor și consecințele defectelor de integrare.

Opțiunea SiL: potrivită pentru secvențe, moduri, alarme și interblocări logice. Efortul se estimează din complexitatea modelului și disponibilitatea bibliotecilor; beneficiul se măsoară prin test coverage și defecte găsite înainte de FAT.

Opțiunea HIL: justificată dacă timing-ul real, rețelele sau drive-urile aduc risc suplimentar față de SiL. Costul suplimentar se compară cu impactul problemelor de integrare pe care HIL le poate detecta.

Model mecatronic/digital twin: justificat atunci când coliziunile, cinematică, trainingul sau reutilizarea pe familii de mașini aduc valoare. Nu se presupune automat un procent de detecție sau un cost fix.

Decizia finală se ia per proiect și se documentează prin criterii de risc și o analiză cost–beneficiu, nu prin regula «SiL pentru toate / HIL de la un prag / DT doar pentru proiecte critice».

Exemplul rezolvat 12.1. Verificarea capabilității cotei de inserare la FAT

Enunț. Cerința Q-01 din Exemplul rezolvat 2.1 impune cota de inserare H = 25,00 ± 0,15 mm, cu $C_{pk} \geq 1{,}33$. La FAT se realizează 50 de cicluri consecutive cu piese reale; măsurătorile dau media $\bar{x} = 25{,}03$ mm și abaterea standard $s = 0{,}035$ mm (valori didactice). Să se decidă dacă cerința este îndeplinită.

Pasul 1. Condițiile preliminare. Indicele are sens numai dacă procesul este stabil (fără tendințe sau salturi pe cele 50 de cicluri), dacă distribuția poate fi aproximată ca normală și dacă sistemul de măsurare este adecvat pentru o toleranță de ±0,15 mm (analiza sistemului de măsurare, MSA). Aceste verificări se fac înainte de calcul și se consemnează în protocolul FAT.

Pasul 2. Calculul. Limitele de specificație sunt LSL = 24,85 mm și USL = 25,15 mm:

$$C_{\mathrm{pk}} = \frac{\min(\mathrm{USL}-\bar{x}\,;\,\bar{x}-\mathrm{LSL})}{3s} = \frac{\min(0{,}12\,;\,0{,}18)}{0{,}105} \approx 1{,}14 \qquad (12.1)$$

Pasul 3. Decizia. $C_{pk} \approx 1{,}14 < 1{,}33$, deci cerința nu este îndeplinită, deși toate cele 50 de piese sunt în toleranță. Indicele arată că procesul nu este suficient de sigur pe termen lung. Cauza reiese din calcul: dispersia ar permite o capabilitate bună, dar media este deplasată cu 0,03 mm spre limita superioară.

Pasul 4. Acțiunea corectivă. Dacă procesul se recentrează pe valoarea nominală fără a se modifica dispersia, rezultă $C_{pk} = 0{,}15 / 0{,}105 \approx 1{,}43 \geq 1{,}33$. Recentrarea (de exemplu, prin corecția poziției finale a axei Z) se documentează ca modificare, iar studiul se repetă pe un lot nou; nu se acceptă recalcularea pe aceleași date.

Observație. Caietul de sarcini trebuie să precizeze și tipul studiului. Un studiu scurt, pe o singură mașină, caracterizează capabilitatea mașinii; capabilitatea procesului pe termen lung se confirmă abia în producție. În practica industrială, pentru capabilitatea mașinii se cer adesea praguri mai mari decât 1,33; pragul aplicabil se stabilește prin contract.

12.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție

12.9.1 Recapitulare: conceptele de bază

- Modelul V oferă o logică de trasabilitate între proiectare și verificare/validare. Structura MA–EA–SA–FAT–SAT–PQ utilizată în capitol este un exemplu didactic de secvențiere, nu o listă universală prescrisă de IEC 62381 [16].

- FAT = test înainte de expediere, executat pe baza unui plan de test specific proiectului. Domeniile principale de verificare utilizate în capitol (mecanic, electric, fluidic, secvențial, safety și performanță) formează un cadru de organizare adaptabil pentru echipamente mecatronice.
- Punchlist-ul urmărește neconformitățile și dovada închiderii lor. Clasificarea A/B/C este o convenție contractuală posibilă; regulile de expediere și termenele trebuie definite de părți.
- SAT = test după instalare, cu accent pe condițiile reale de utilități, integrare, produse/sarcini reprezentative și cerințe de handover. Efectul semnării SAT asupra responsabilităților și garanției rezultă din contract și legislația aplicabilă.
- Criteriile de acceptanță SAT sunt proiect-specifice: cadență, calitate, disponibilitate/OEE, safety, mentenabilitate, training, documentație și statusul neconformităților pot fi utilizate dacă sunt definite prin ținte, metode și ferestre de măsurare. Nu există praguri universale OEE/MTTR.
- Run-at-rate = test de stabilitate la rata convenită, pe o durată suficientă pentru variațiile și mecanismele relevante. Durata se justifică prin risc și contract, nu printr-o regulă sectorială fixă.
- Ramp-up post-SAT = perioadă opțională/contractuală de stabilizare, suport și knowledge transfer, cu criterii de ieșire definite.
- Virtual Commissioning = verificare timpurie prin conectarea controlului la modele ale plant-ului. SiL și HIL descriu configurații de test; modelele mecatronice și digital twin pot susține VC în funcție de obiectiv și fidelitatea necesară.
- Justificarea economică a VC se face printr-o analiză cost–beneficiu: costul modelării și testării versus rework, intervenții de inginerie la fața locului, opriri și întârzieri potențial evitate. Procentele de economie și ROI trebuie măsurate pe portofoliul organizației, nu tratate ca universale.
- ECR/ECO = model de change control în patru pași: cerere → analiză de impact → aprobare → implementare/configurație controlată. Denumirile și documentele pot varia între organizații.
- Obsolescence management = monitorizarea lifecycle-ului componentelor, PCN/EOL, alternative, planuri de migrare și stocuri strategice justificate prin criticitate și lead time.
- Modificare substanțială, Reg. (UE) 2023/1230 art. 3 pct. (16): modificare fizică/digitală post-market/post-service, neprevăzută de producător, care afectează siguranța prin pericol nou/risc crescut și necesită măsurile de protecție definite de text. Art. 18 stabilește obligațiile persoanei care o realizează; art. 25 stabilește procedurile de evaluare a conformității [28].
- Fluxul de decizie din capitol este pedagogic și urmează criteriile Regulamentului: schimbare neprevăzută după punerea pe piață/în funcțiune → impact asupra siguranței → necesitatea măsurilor de protecție prevăzute de definiție. Nu se folosesc praguri procentuale universale și nu se atribuie Blue Guide-ului un arbore juridic standardizat inexistent.

12.9.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipa pe parcursul proiectelor de master. Răspunsurile sintetice apar după fiecare întrebare; pentru exersarea independentă, se recomandă parcurgerea întâi a întrebării fără consultarea răspunsului.

Q1. Enumerați cele șase domenii principale de verificare FAT utilizate în acest capitol și explicați ce cerințe pot acoperi. (1) mecanic: geometrie, montaj, fixture-uri; (2) electric: protective bonding, izolație, protecții, cablare; (3) pneumatic/fluidic: etanșeitate, presiuni, actuatoare, calitatea mediului; (4) secvențial: moduri, state machine/Grafcet, interblocări și scenarii; (5) safety: validarea funcțiilor rezultate din evaluarea de risc; (6) performanță: cadență, precizie, calitate,

repetabilitate și integrare. Important: această grupare este un cadru de proiect, nu o listă obligatorie prescrisă de IEC 62381.

Q2. Într-un exercițiu SAT pentru scenariul candidat SAP, se presupune că ținta de 120 ansambluri/oră a fost aprobată contractual, iar testul raportează 110 ansambluri/oră. Cum se procedează? Se înregistrează abaterea; se verifică definiția cadenței, fereastra și metoda de măsurare, mixul de produse și condițiile utilităților; se analizează alimentarea, secvența, axa Z și fixarea CL1/CL2; corecția se aprobă prin change control și se repetă testul. Dacă ținta rămâne neatinsă, acceptarea unei abateri este contractuală. Exemplul nu reprezintă un rezultat măsurat pe SAP real.

Q3. Care este diferența dintre SiL, HIL și utilizarea unui digital twin în Virtual Commissioning? SiL rulează controller-ul și plant-ul în software și este eficient pentru logica de control. HIL folosește hardware-ul real de control conectat la un plant simulat și permite teste de timing și integrare mai realiste. Un digital twin/model mecatronic cu fidelitate ridicată poate susține VC pentru cinematică, coliziuni, training și scenarii, dar nu este «nivelul 3» obligatoriu al unui standard. Alegerea se bazează pe cerințele de test, risc și costul reutilizării.

Q4. O fabrică înlocuiește un gard fizic cu o cortină optică. Este modificare substanțială? Nu se răspunde automat DA/NU. Se aplică art. 3 pct. (16): schimbarea este neprevăzută după punerea în funcțiune? afectează safety prin pericol nou/risc crescut? integrarea cortinei necesită modificarea sistemului existent de control al siguranței sau alte măsuri de protecție din definiție? Tehnic, sunt necesare recalcularea distanței de separare conform ISO 13855:2024, măsurarea timpului total de oprire și revalidarea funcției. Dacă sunt îndeplinite criteriile juridice, art. 18 se aplică [28, 149].

Q5. De ce un run-at-rate mai lung poate fi justificat pentru unele linii continue? Pentru că o fereastră mai lungă poate surprinde drift termic, defecte intermitente, acumulări/contaminare, variații de operator și utilități sau mecanisme care nu apar într-un test scurt. Durata nu este impusă universal de sector; se stabilește prin analiza riscurilor, profilul de producție și costul unei defecțiuni nedetectate.

12.10 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 12.1. Capabilitatea la FAT după recentrarea procesului

Enunț. După acțiunea corectivă din Exemplul rezolvat 12.1, un lot nou de 50 de cicluri dă media $\bar{x}$ = 24,98 mm și abaterea standard s = 0,030 mm, pentru LSL = 24,85 mm și USL = 25,15 mm. Este îndeplinită cerința $C_{pk} \geq 1{,}33$?

Răspuns. USL − $\bar{x}$ = 0,17 mm și $\bar{x}$ − LSL = 0,13 mm; 3s = 0,09 mm. C_{pk} = 0,13 / 0,09 ≈ 1,44 ≥ 1,33, deci cerința este îndeplinită. Media este însă ușor deplasată spre limita inferioară; o recentrare suplimentară ar crește indicele la 0,15 / 0,09 ≈ 1,67. Rezultatul este valabil numai dacă procesul a fost stabil pe lot și sistemul de măsurare a fost validat.

Problema 12.2. Evaluarea unui test run-at-rate

Enunț. Contractul cere, la SAT, 120 de ansambluri pe oră, cu un criteriu de acceptare de cel puțin 95 % din cadență și 99 % ansambluri conforme, pe un test de 4 h. Stația produce 452 de ansambluri, din care 447 conforme. Este testul trecut?

Răspuns. Cadența realizată este 452 / 4 = 113 ansambluri/oră, adică 94,2 % din 120, sub pragul de 95 %. Calitatea este 447 / 452 ≈ 98,9 %, sub pragul de 99 %. Testul nu este trecut pe niciunul dintre criterii. Se analizează cauzele (micro-opriri, timpi de ciclu, moduri de defect ale rebuturilor), se aplică acțiunile corective și se repetă testul pe durata contractuală; nu se acceptă recalcularea pe aceleași date cu alte convenții.

Problema 12.3. Numărul de cicluri pentru o demonstrație fără defectări

Enunț. Beneficiarul cere demonstrarea, la FAT, a unei probabilități de succes pe ciclu de cel puțin 0,999, cu un nivel de încredere de 90 %, printr-un test fără nicio defectare. Determinați numărul minim de cicluri și durata testului la un timp de ciclu de 30 s.

Răspuns. Pentru un test fără defectări: $n \geq \ln(1 - 0{,}90) / \ln(0{,}999) = \ln 0{,}1 / \ln 0{,}999 \approx 2\,302$ cicluri. La 30 s pe ciclu, durata este aproximativ $2\,302 \cdot 30 / 3\,600 \approx 19{,}2$ h. Dacă apare o defectare, testul nu se continuă pur și simplu: se analizează cauza, se corectează și se reia demonstrația sau se folosește un plan cu defectări admise, care cere mai multe cicluri.

13 Digital Twin și Industry 4.0

Digital Shadow, Twin, Thread; AAS; OPC UA + ISA-95; MBSE/SysML; platforme IIoT

Despre acest capitol

Capitolul 13 extinde proiectarea echipamentului de fabricație dincolo de sistemul fizic validat: activul este reprezentat prin modele și date sincronizate, are identitate digitală și interfețe standardizate și poate fi urmărit coerent pe ciclul de viață. Accentul cade pe interoperabilitate, semantică, trasabilitate și controlul accesului, nu pe simpla conectare la cloud.

Sunt integrate cadrul ISO 23247 pentru Digital Twin/Digital Thread, Asset Administration Shell (AAS), OPC UA și ISA-95/IEC 62264, MBSE/SysML v1.7 și v2.0, RAMI 4.0 și tipare de platforme IIoT. Procentele de adopție, costurile și ROI-urile din versiunea inițială nu sunt tratate ca valori universale; exemplele industriale sunt contextualizate și legate de surse verificabile.

Standarde și referințe normative aplicabile

ISO 23247-1...4:2021; ISO 23247-5/-6:2026, cadrul Digital Twin pentru manufacturing, Digital Thread și compoziția twin-urilor.

IEC 63278-1:2023 + specificațiile IDTA AAS, Release 26-01: structura AAS, metamodel, API, securitate, format AASX și Submodel Templates; nu există un set universal de șase submodele obligatorii.

IEC 62264 / ISA-95: enterprise-control integration; IEC 62264-2:2026 actualizează modelele și relațiile pentru interfețele dintre manufacturing operations și business.

IEC 62541 series: OPC UA; mai multe părți au ediții 2025–2026, inclusiv PubSub și Device Onboarding. Companion Specifications asigură modele informaționale de domeniu.

OMG SysML 1.7 (2024) și SysML v2.0 (2025); seria IEC 62714 AutomationML: repere pentru MBSE, interoperabilitatea modelelor și schimbul de date de engineering.

RAMI 4.0: DIN SPEC 91345; IEC PAS 63088:2017 a fost retrasă în 2024. IEC 62890:2020 rămâne reper pentru life-cycle management.

IEC 62443 series, cybersecurity pentru IACS: zone/conduits, identity/access, secure development și protecția interfețelor IT/OT.

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să distingă între Digital Model, Digital Shadow, Digital Twin și Digital Thread;
- să explice rolul Asset Administration Shell în identitatea digitală a unui echipament;
- să descrie integrarea verticală prin OPC UA și modelele informaționale standardizate;
- să aplice principiile MBSE și SysML în proiectarea unui echipament;
- să evalueze tipare de arhitectură pentru platformele Digital Twin.

Cunoștințe prealabile

Capitolul se sprijină pe arhitectura de control și pe OPC UA din Capitolul 7, precum și pe modelul V din Capitolul 1. Sunt utile noțiuni de modelare a datelor și de rețele industriale.

Glosar de termeni și acronime

Acronimele și termenii tehnici utilizați pe parcursul capitolului sunt definiți la prima apariție și recapitulați în tabelul de mai jos pentru consultare rapidă.

Termen / acronim	Definiție
Digital Model	Reprezentare digitală a unui obiect/sistem fără sincronizare automată obligatorie cu obiectul fizic. În taxonomia frecvent citată a lui Kritzinger et al., schimbul de date dintre fizic și digital este manual.
Digital Shadow	Reprezentare digitală cu flux automat de date predominant Fizic → Digital, în sensul taxonomiei Digital Model / Digital Shadow / Digital Twin din literatura de manufacturing. Nu este, prin el însuși, un «nivel 2» standardizat de maturitate.
Digital Twin (DT)	Reprezentare digitală fit-for-purpose, sincronizată cu un element fizic/observable manufacturing element. În unele taxonomii presupune flux automat bidirecțional; existența unui Digital Twin nu implică automat control autonom al echipamentului.

Termen / acronim	Definiție
Digital Thread	Continuitate și trasabilitate a datelor/artefactelor digitale între faze și sisteme ale ciclului de viață. ISO 23247-5:2026 tratează explicit rolul Digital Thread în conectarea și managementul Digital Twin-urilor în manufacturing.
AAS (Asset Administration Shell)	Reprezentare digitală standardizată a unui activ industrial. IEC 63278-1:2023 definește structura AAS; metamodelul, API-urile și Submodel Templates sunt dezvoltate în specificațiile IDTA. Nu există o listă universală de șase submodele obligatorii pentru orice activ.
IRDI	International Registration Data Identifier: schemă de identificare utilizată în dicționare/semantici industriale. În AAS v3, identificatorii sunt modelați generic; IRDI nu este obligatoriu pentru identificarea activului.
IRI	Internationalized Resource Identifier: formă de identificator utilizabilă pentru identificare globală și semantică. În AAS, globalAssetId este un Identifier; alegerea schemei concrete se face conform regulilor ecosistemului.
RAMI 4.0	Reference Architecture Model Industrie 4.0: model tridimensional Layers × Hierarchy Levels × Life Cycle, consacrat prin DIN SPEC 91345. IEC PAS 63088:2017 a descris modelul la nivel internațional, dar a fost retras în 2024.
Catena-X	Ecosistem și set de standarde pentru schimb suveran de date în lanțul valoric auto. Participarea poate rezultă din cerințe ale ecosistemului sau ale partenerilor comerciali, dar nu este o obligație juridică universală pentru întregul sector auto.
Manufacturing-X	Inițiativă pentru ecosisteme industriale de date interoperabile și suverane, susținută de industria și politica industrială germană/europeană; AAS este una dintre tehnologiile-cheie de interoperabilitate.
ECLASS	Standard de date de referință și dicționar semantic pentru clasificarea și descrierea neambiguă a produselor și serviciilor. Conceptele și proprietățile ECLASS au identificatori semantici reutilizabili în AAS; ECLASS nu este un catalog universal de componente fizice.
DPP (Digital Product Passport)	Pașaport digital al produsului prevăzut de cadre UE precum ESPR, cu seturile de date și calendarul stabilite prin acte specifice grupelor de produse. Pentru bateriile LMT, bateriile industriale cu capacitate >2 kWh și bateriile pentru vehicule electrice, Battery Passport se aplică de la 18 februarie 2027 conform Regulamentului (UE) 2023/1542.
IDTA	Industrial Digital Twin Association: organizație care publică și întreține specificații AAS, Submodel Templates, ghiduri și resurse de implementare.
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture: standard IEC 62541 pentru schimb de informații sigur, fiabil și independent de platformă, cu information models, client-server și PubSub. Nu înlocuiește automat MES, ERP sau guvernanța arhitecturii IT/OT.

Termen / acronim	Definiție
Companion Specifications	Modele informaționale OPC UA standardizate pentru domenii/echipamente specifice; reduc ambiguitatea semantică și munca de mapping atunci când furnizorii implementează aceeași specificație.
PackML	Model de stări și PackTags pentru mașini de ambalare dezvoltat în ecosistemul OMAC/ISA; există și OPC UA for PackML (OPC 30050) pentru reprezentarea semantică în OPC UA.
Euromap 77/83	Specificații OPC UA pentru industria maselor plastice: EUROMAP 83 definește tipuri comune, iar EUROMAP 77 (OPC 40077) definește schimbul de date între mașină de injecție și MES.
OPC UA Robotics (OPC 40010-1)	OPC UA for Robotics: OPC 40010-1 / VDMA 40010, pentru integrare verticală și un model informațional standardizat al sistemelor robotice. Termenul «FX» nu trebuie confundat cu OPC UA Field eXchange.
VDMA 40001	OPC UA for Machinery: OPC 40001-1 / VDMA 40001, cu building blocks generale pentru identificare, stări, moduri de operare, contoare și monitorizare, reutilizabile în Companion Specifications specifice domeniilor.
ISA-95 / IEC 62264	Familie de standarde pentru integrarea enterprise-control și manufacturing operations management. Modelul de niveluri este funcțional, nu o regulă care impune o anumită tehnologie PLC/SCADA/MES/ERP.
MES	Manufacturing Execution System: sistem software care implementează funcții de manufacturing operations management, de regulă asociate Nivelului 3 ISA-95/IEC 62264. Frontierele față de SCADA, MOM și ERP depind de arhitectura organizației.
ERP	Enterprise Resource Planning, sistem software pentru planificarea și administrarea resurselor întreprinderii: comenzi, financiar, logistică, materiale, resurse umane și alte funcții de business.
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition: sistem de supraveghere, comandă la nivel supervizor și achiziție de date pentru procese/instalații; poziționarea exactă în arhitectură depinde de aplicație.
MBSE	Model-Based Systems Engineering: abordare în care modelele sistemului sunt artefacte primare pentru specificare, arhitectură, analiză, verificare și trasabilitate; documentele pot fi derivate din model, în funcție de toolchain.
SysML	Systems Modeling Language (OMG). SysML 1.7 rămâne relevant în toolchain-uri legacy; SysML v2.0, adoptat final în 2025, adaugă semantică îmbunătățită, sintaxă textuală și API-uri standardizate.
IIoT	Industrial Internet of Things, extensia conceptului IoT la mediu industrial: echipamente, senzori, actuatoare conectate.
MQTT	Protocol publish/subscribe ușor pentru mesagerie. În IIoT poate completa OPC UA; nu este o alternativă semantic echivalentă deoarece OPC UA include și information modelling, servicii și profile.

Termen / acronim	Definiție
ML / AI	Machine Learning / Artificial Intelligence: metode de învățare automată și inteligență artificială aplicate datelor industriale pentru clasificare, predicție, diagnostic, optimizare sau suport decizional.
KPI	Key Performance Indicator: indicator cantitativ de performanță. Exemple industriale: OEE, MTBF, MTTR și rata de neconformitate; definiția și fereastra de calcul trebuie precizate.
B2MML	Business To Manufacturing Markup Language: reprezentare XML a modelelor ISA-95, utilizată pentru schimbul de informații între sisteme de manufacturing operations și business, în funcție de arhitectura implementată.
AutomationML (AML)	Format XML deschis standardizat în IEC 62714 pentru schimb de date de engineering între instrumente eterogene. Interoperabilitatea concretă depinde de profile, mapping și suportul fiecărui instrument.
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, asociația germană a industriei electrice și digitale, implicată în dezvoltarea ecosistemului Industrie 4.0 și RAMI 4.0.

Harta capitolului

Parcursul capitolului: §13.1 Poziționarea pe Modelul V, saltul conceptual Industry 4.0; §13.2 Digital Shadow, Digital Twin și Digital Thread; §13.3 Asset Administration Shell, identitatea digitală standardizată; §13.4 OPC UA și integrarea verticală; §13.5 MBSE și SysML, proiectarea bazată pe modele; §13.6 Tipare de arhitectură pentru platforme Digital Twin / IIoT; §13.7 Exemple industriale Industry 4.0; §13.8 Studiu de caz integrat, scenariu conceptual Digital Thread pentru SAP; §13.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție.

13.1 Poziționarea pe Modelul V: saltul conceptual Industry 4.0

Capitolul 11 a tratat fiabilitatea și mentenabilitatea, iar Capitolul 12 integrarea, commissioning-ul și validarea prin FAT/SAT. Capitolul 13 schimbă perspectiva: nu mai întreabă doar dacă echipamentul funcționează și poate fi acceptat, ci cum este reprezentat, identificat, conectat și urmărit digital pe ciclul de viață (Figura 13.1). Industry 4.0 nu trebuie redus la «conectarea la cloud»; esența inginerească este interoperabilitatea dintre active, modele, date și procese, cu trasabilitate, semantică și control al accesului.

Termenul Industrie 4.0 a fost conturat în Germania în 2011–2012, iar raportul final al grupului de lucru condus de Henning Kagermann, Wolfgang Wahlster și Johannes Helbig a fost publicat în 2013. Evoluția ulterioară a adus RAMI 4.0, AAS, OPC UA, ecosisteme de date precum Catena-X/Manufacturing-X și standarde internaționale dedicate Digital Twin. În 2026, ISO 23247 include deja părți dedicate Digital Thread și compoziției Digital Twin-urilor, iar seria IEC 62541 a primit ediții majore noi în 2025–2026. Prin urmare, capitolul tratează Industry 4.0 ca un ansamblu de arhitecturi și standarde în evoluție, nu ca o succesiune rigidă de «generații» tehnologice [7, 116, 124, 199–201].

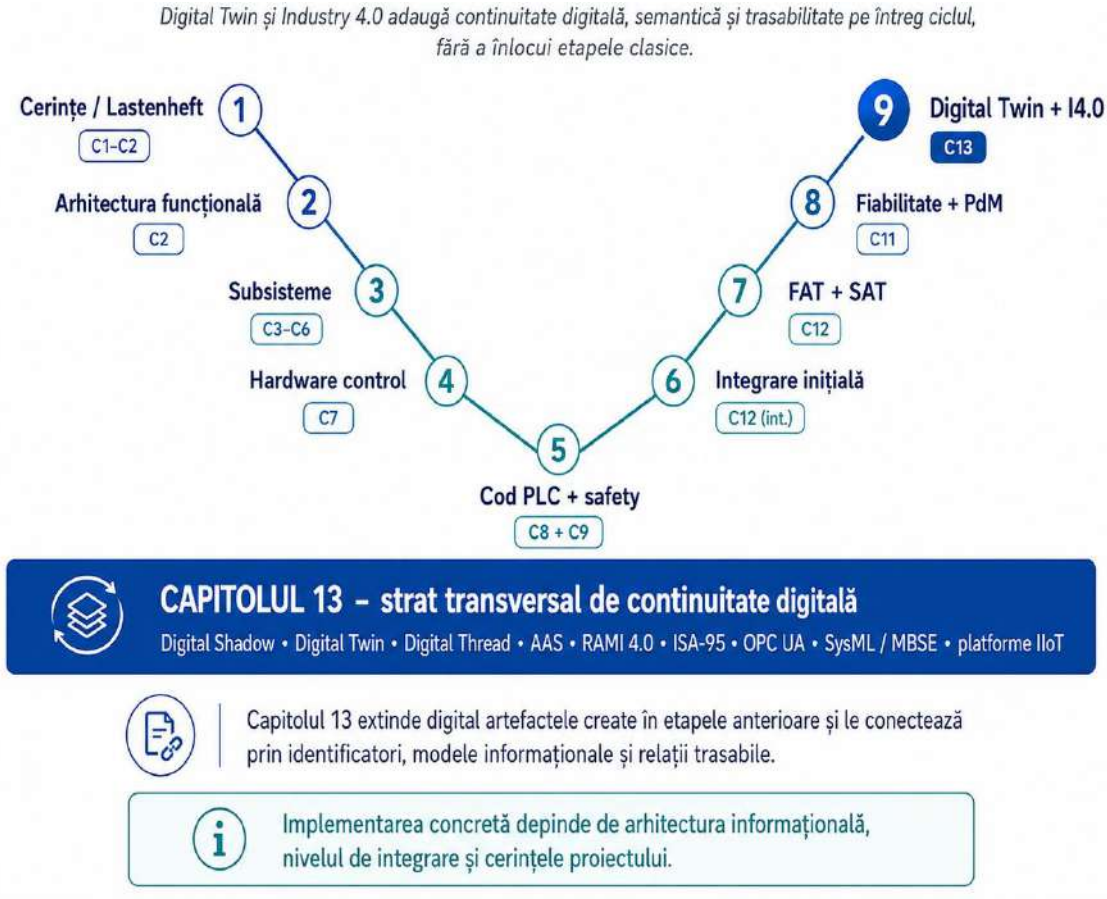


Figura 13.1. Poziționarea Capitolului 13 în ciclul V de proiectare. Digital Twin, AAS, OPC UA, MBSE și Digital Thread extind digital artefactele create în capitolele anterioare și le conectează prin relații trasabile; implementarea concretă depinde de arhitectura informațională și de cerințele proiectului.

13.1.1 Echipamentul ca activ digital: evoluția conceptuală

Evoluția de la echipamentul tratat exclusiv ca obiect fizic la activul gestionat digital poate include patru capabilități: identificare persistentă; descriere semantică machine-readable; conectivitate controlată cu sisteme de engineering și operaționale; sincronizarea selectivă dintre starea fizică și reprezentările digitale. AAS poate contribui la identificare și semantică, OPC UA la schimbul de informații, PLM/MBSE la trasabilitatea artefactelor, iar platformele edge/cloud la analytics. Niciuna dintre aceste tehnologii nu elimină automat integrarea: valoarea apare când identificatorii, modelele de date, drepturile de acces și responsabilitățile sunt proiectate coerent.

Capabilitățile digitale disponibile nativ diferă considerabil între familii de produse și configurații. Multe PLC-uri, roboți și dispozitive moderne oferă server/client OPC UA, MQTT, REST, servicii cloud sau modele informaționale standardizate, dar suportul AAS ori al unei Companion Specification nu trebuie presupus fără verificarea documentației produsului și a licențelor. Pentru un proiect cu echipamente de la mai mulți furnizori, specificația echipamentului trebuie să precizeze explicit protocoalele, information models, certificatele, namespace-urile, metodele de onboarding și responsabilitățile de cybersecurity necesare.

Pentru proiectant, consecința este extinderea livrabilelor. Pe lângă echipamentul fizic și documentația tehnică, proiectul poate include modele de sistem, identificatori și asset metadata, NodeSet-uri/namespace-uri OPC UA, AAS/AASX sau submodele selectate, mapping către MES/MOM și PLM,

configurări de certificate și documentația interfețelor. Aceste livrabile se introduc numai dacă aduc valoare și sunt cerute de arhitectura clientului; efortul suplimentar se estimează din complexitatea interfețelor, modelarea semantică, verificare și lifecycle support.

13.2 Digital Shadow, Digital Twin și Digital Thread

Originile conceptului Digital Twin sunt legate de lucrările lui Michael Grieves din începutul anilor 2000 privind Product Lifecycle Management și legătura dintre spațiul fizic și cel virtual. Totuși, taxonomia Digital Model / Digital Shadow / Digital Twin, bazată pe direcția și automatizarea fluxului de date, este asociată în literatura de manufacturing în special cu Kritzinger et al. (2018), nu cu o taxonomie formală publicată de Grieves în 2017. În standardizare, seria ISO 23247 definește un cadru pentru Digital Twin în manufacturing, iar ISO 23247-5:2026 tratează explicit Digital Thread. De aceea, termenii Shadow, Twin și Thread sunt utilizați aici ca noțiuni complementare, nu ca trepte universale de maturitate [199, 200, 202].

13.2.1 Digital Shadow, Digital Twin și Digital Thread: concepte complementare

Digital Shadow, Digital Twin și Digital Thread răspund la întrebări diferite. Digital Shadow descrie, într-o taxonomie frecvent utilizată în literatura de manufacturing, sincronizarea automată predominant Fizic → Digital. Digital Twin descrie o reprezentare digitală sincronizată fit-for-purpose, capabilă să susțină monitorizare, analiză, predicție și, în anumite arhitecturi, schimb automat de date în ambele sensuri. Digital Thread descrie continuitatea și trasabilitatea artefactelor și datelor între fazele ciclului de viață (Figura 13.2). Un sistem poate avea Digital Thread fără control bidirecțional al activului și poate avea un Digital Twin operațional fără un Digital Thread enterprise complet.

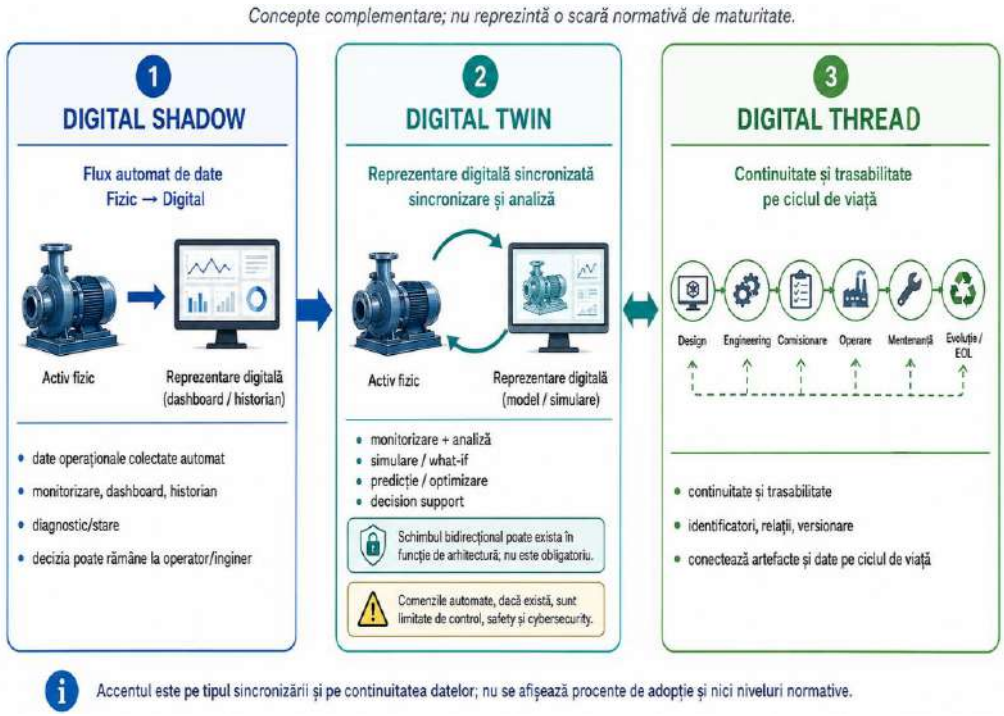


Figura 13.2. Relația conceptuală dintre Digital Shadow, Digital Twin și Digital Thread. Figura trebuie interpretată prin tipul de sincronizare și continuitatea datelor, nu prin procente universale de adopție sau printr-o scară normativă de maturitate.

Digital Shadow pune accent pe achiziția automată de date din activul fizic către o reprezentare digitală: stări, alarme, temperaturi, vibrații, cicluri, energie sau KPI. Exemplele includ historian + dashboard, condition monitoring și modele de stare actualizate automat. Decizia sau acțiunea asupra echipamentului poate rămâne la operator/inginer. Utilitatea depinde de calitatea datelor, timestamping, contextul semantic și retenția informației, nu doar de numărul de senzori.

Digital Twin adaugă modele care urmăresc un scop explicit: reprezentare, diagnostic, predicție, optimizare, simulare sau decision support [203]. Sincronizarea cu activul fizic este esențială; în anumite taxonomii, schimbul automat bidirecțional diferențiază twin-ul de shadow. Totuși, bidirecționalitatea nu înseamnă că algoritmul poate modifica orice setpoint fără control. Comenzile către echipament trebuie limitate de arhitectura de control, safety, cybersecurity, validare și managementul modificărilor.

Digital Thread conectează artefactele și datele între design, engineering, fabricație, commissioning, operare, mentenanță, modificări și end-of-life. Exemple: cerință SysML → componentă CAD/EPLAN → software PLC → test FAT/SAT → configurație as-built → istoric de mentenanță → ECR/ECO. ISO 23247-5:2026 tratează Digital Thread ca mecanism pentru crearea, conectarea, managementul și întreținerea Digital Twin-urilor pe ciclul de viață al produsului și al manufacturing-ului. Continuitatea este mai importantă decât existența unei singure «platforme» care conține totul [200].

13.2.2 Cadru pedagogic în 5 trepte de capabilitate digitală

Pentru autoevaluare se poate utiliza o scară internă în cinci trepte, de la echipament izolat la continuitate digitală pe ciclul de viață. Scara 0–4 utilizată în acest manual este un CADRU PEDAGOGIC, construit pentru a ordona capabilități observabile; nu este atribuită Plattform Industrie 4.0, World Economic Forum sau unei organizații românești și nu trebuie confundată cu un model oficial de maturitate (Figura 13.3). Organizațiile pot utiliza modele consacrate proprii, dar trebuie să definească indicatorii și metoda de evaluare.

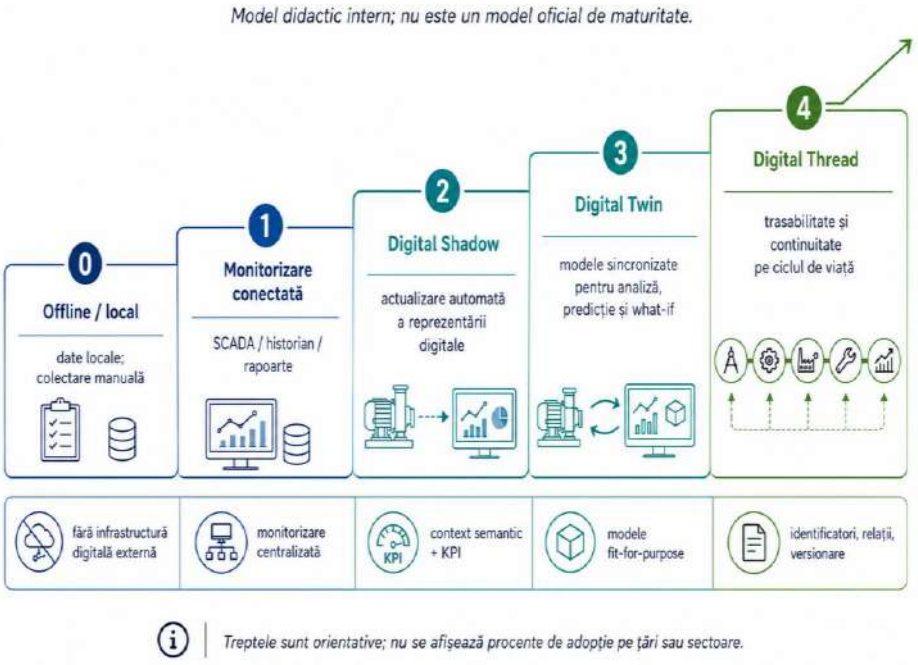


Figura 13.3. Cadru pedagogic în 5 trepte de capabilitate digitală: 0 Offline, 1 Monitorizare conectată, 2 Digital Shadow, 3 Digital Twin, 4 Digital Thread. Treptele sunt orientative și nu includ procente normative de adopție pe țări sau sectoare.

Treapta 0. Offline/local: echipamentul funcționează autonom, iar datele rămân în controller/HMI sau sunt colectate manual. Aceasta nu înseamnă neapărat echipament «vechi»: pentru aplicații izolate sau cu cerințe stricte de security poate fi o alegere deliberată. Criteriul de încadrare este lipsa unei infrastructuri digitale externe utilizate sistematic.

Treapta 1. Monitorizare conectată: datele relevante sunt colectate centralizat prin protocoale industriale și ajung într-un SCADA, historian sau alt serviciu de monitorizare. Se obțin alarme, trenduri și rapoarte agregate. Costul implementării variază de la proiecte simple edge/on-premise la arhitecturi enterprise și nu poate fi exprimat printr-un prag universal pe linie.

Treapta 2. Digital Shadow: datele fizice actualizează automat o reprezentare digitală contextualizată; sunt calculați KPI și pot exista modele de diagnostic sau analytics. Cloud-ul nu este o condiție: aceeași arhitectură poate fi realizată on-premise sau edge. Condițiile de calitate sunt sincronizarea, identificarea sursei, semantică și trasabilitatea datelor.

Treapta 3. Digital Twin: unul sau mai multe modele sincronizate sunt utilizate pentru predicție, simulare what-if, optimizare sau decision support. Dacă rezultatele modelului influențează automat controller-ul, interfața trebuie tratată ca funcție de control, cu limite, validare, fallback și cybersecurity. Machine Learning este opțional; un Digital Twin poate utiliza modele fizice, modele de date sau combinații hibride.

Treapta 4. Digital Thread: artefactele de engineering și datele operaționale sunt conectate trasabil între faze și sisteme. Accentul cade pe identitate, versionare, relații și reutilizarea controlată a datelor, nu pe existența unui singur produs software. ISO 23247-5:2026 oferă un reper actual pentru relația dintre Digital Thread și Digital Twin în manufacturing.

> **În practică · Evaluarea maturității digitale: evitați procentele fără sursă**
>
> Poziționarea unei fabrici pe o scară de maturitate trebuie realizată printr-o metodă explicită și un eșantion documentat. Fără un studiu reprezentativ și o definiție comună a nivelurilor, nu este riguros să afirmăm că «majoritatea fabricilor din România sunt Nivel 0–1» sau să atribuim procente exacte Europei.
>
> Pentru un audit intern se recomandă indicatori observabili: procentul activelor conectate; existența unui historian; acoperirea semantică prin information models; trasabilitatea cerință–configurație–test; utilizarea datelor pentru diagnostic/predicție; nivelul de automatizare al feedback-ului; cybersecurity și data governance. Costul de trecere între trepte se estimează din arhitectura existentă, nu prin intervale universale €/linie.
>
> Competențe utile pentru absolvent: OPC UA și Companion Specifications, AAS/IDTA, principii ISO 23247, integrare IEC 62264/ISA-95, time-series/edge analytics, noțiuni SysML v2/MBSE și cybersecurity IEC 62443.

13.2.3 Perspective de fidelitate pentru Digital Twin-ul subsistemului mecanic

Pentru subsistemul mecanic este utilă o clasificare ortogonală față de direcția fluxului de date: ce fenomene reproduce modelul și cu ce fidelitate (Tabelul 13.1)? În locul unor «niveluri» obligatorii Geometric → Cinematic → Dynamic → Stress → Wear, capitolul folosește cinci perspective complementare: geometrică, cinematică, dinamică, tensiuni/deformații și degradare/uzură. Ele pot fi combinate în funcție de use case. Un model FEM nu trebuie neapărat construit peste un model cinematic, iar un model de uzură poate fi data-driven fără FEM online; criteriul este adecvarea modelului la decizia inginerească.

Tabelul 13.1. Cinci perspective complementare pentru reprezentarea digitală a subsistemului mecanic. Ele descriu conținutul și fidelitatea modelului, nu trepte normative de maturitate și nu procente de adopție industrială.

Perspectivă	Conținut / model	Tehnologii posibile	Date de calibrare / sincronizare	Utilitate / condiții
Geometrică	Model 3D, configurație și poziții relevante	CAD/PLM; scene 3D	Configurație, encodere, asset metadata	Layout, accesibilitate, coliziuni; sincronizare live numai dacă use case-ul o cere
Cinematică	Lanț cinematic; poziții, viteze, accelerații	MBS; robot simulation; CAD motion	Poziții și viteze din controlere/encodere	Traiectorii, envelope, timpi; necesită model cinematic validat
Dinamică	Forțe, momente, vibrații și răspuns tranzitoriu	MBS; Modelica; SimulationX; RecurDyn/Adams	Forțe, curenți, accelerații, turații	Load cases, vibrații, dimensionare; frecarea și amortizarea se calibrează
Tensiuni / deformații	FEA statică/tranzientă sau reduced-order model	FEA; ROM; co-simulation	Sarcini măsurate, tensometrie, temperatură	Integritate structurală și what-if; FEM «real-time» nu este implicit necesară
Degradare / uzură	Model de health state / RUL	Modele fizice, statistice, ML sau hibride	Vibrații, temperatură, cicluri, mentenanță	PdM/RUL; necesită istoric, validare și estimarea incertitudinii

O vedere geometrică poate fi suficientă pentru configurație, coliziuni și service; o vedere cinematică pentru traiectorii și envelope; o vedere dinamică pentru forțe, momente și vibrații; FEM pentru tensiuni/deformații în scenarii relevante; iar modelele de degradare pentru estimarea stării și a duratei de viață rămase. Într-un Digital Twin matur, aceste modele sunt validate cu date și au domeniu de valabilitate explicit. Complexitatea suplimentară se justifică numai dacă reduce incertitudinea unei decizii sau susține un use case concret.

13.3 Asset Administration Shell: identitatea digitală standardizată

AAS răspunde unei probleme diferite de simulare: cum descriem un activ într-un mod standardizat și machine-readable astfel încât aplicații diferite să poată schimba informații și servicii în mod coerent? IEC 63278-1:2023 definește structura Asset Administration Shell, iar IDTA publică metamodelul, API-urile, formatele și Submodel Templates utilizate în ecosistem. AAS nu garantează integrare «zero-configuration», dar reduce ambiguitatea atunci când părțile folosesc aceleași identificatoare, semantică și șabloane [10, 204].

Este importantă separarea dintre standard și implementare. IEC 63278-1 definește structura AAS la nivel de standard internațional. Specificațiile IDTA AAS curente detaliază metamodelul, serviciile/API, securitatea, formatul AASX și Submodel Templates. Template-uri precum Digital Nameplate, Generic Frame for Technical Data, Handover Documentation sau Maintenance Instructions standardizează seturi de informații pentru use case-uri concrete. Lista și versiunile submodelelor evoluează; nu există șase submodele obligatorii pentru orice activ.

13.3.1 Conceptul AAS și structura cu submodele

Un AAS conține AssetInformation și identificatori, metadate și referințe către Submodels. globalAssetId este un Identifier utilizat pentru identificarea globală a activului atunci când este necesar;

specificația AAS v3 nu mai tratează IRI, IRDI și «Custom» ca tipuri distincte ale identificatorului în același mod ca versiunile mai vechi. Submodelele pot utiliza semantici din ECLASS, IEC CDD sau alte vocabularii. Interoperabilitatea reală apare când structura și semanticile sunt comune, nu doar pentru că fișierul are extensia AASX.



Figura 13.4. Exemplu de structură AAS cu un set posibil de submodele pentru un echipament: Digital Nameplate, Technical Data, Handover Documentation, date operaționale/time series și informații de mentenanță. Portofoliul exact se alege din Submodel Templates IDTA și din cerințele proiectului; figura nu trebuie interpretată ca o listă de șase submodele obligatorii IEC 63278-1.

Pentru identificare și date statice sunt disponibile șabloane precum Digital Nameplate (IDTA 02006) și Generic Frame for Technical Data (IDTA 02003) (Figura 13.4). Handover Documentation (IDTA 02004) poate referenția manuale, desene, certificate și alte documente. Catalogul IDTA include, între altele, Maintenance Instructions (IDTA 02018), Predictive Maintenance (IDTA 02048), Hierarchical Structures/BOM (IDTA 02011), Carbon Footprint (IDTA 02023) și șabloane pentru modele de simulare. Informațiile care în versiuni mai vechi ale capitolului erau grupate sub denumiri generice precum «Identification» sau «OperationalData» trebuie asociate șablonului și versiunea efectiv utilizate [205].

Datele dinamice pot fi reprezentate prin submodele și servicii potrivite use case-ului, inclusiv time-series sau asset-specific data. Frecvența de actualizare nu este «la fiecare ciclu» prin definiție; se stabilește după dinamica fenomenului, costul comunicației și cerințele de analiză. Documentele pot fi incluse sau referențiate prin URI/artefacte gestionate într-un repository controlat, cu reguli de versionare și acces.

Digital Nameplate poate modela informații de identificare și marcaje relevante pentru tipul de activ; conținutul obligatoriu este determinat de șablon, de legislația produsului și de datele furnizorului. Informațiile de mentenanță nu sunt limitate la un unic «MaintenanceData»: IDTA publică șabloane distincte, de exemplu Maintenance Instructions și Predictive Maintenance. Integrarea cu CMMS/EAM necesită mapping și contracte de date; AAS facilitează schimbul, dar nu înlocuiește procesul de mentenanță.

13.3.2 RAMI 4.0: modelul de referință al ecosistemului

RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0) rămâne un model de referință utilizat pentru poziționarea activelor, funcțiilor și informațiilor pe trei axe (Figura 13.5). A fost consacrat prin DIN SPEC 91345 și descris internațional prin IEC PAS 63088:2017; această PAS a fost retrasă de IEC în septembrie 2024, fapt care trebuie menționat atunci când este citată ca document normativ. Plattform Industrie 4.0 continuă să utilizeze RAMI 4.0 ca instrument arhitectural în 2026 [206].

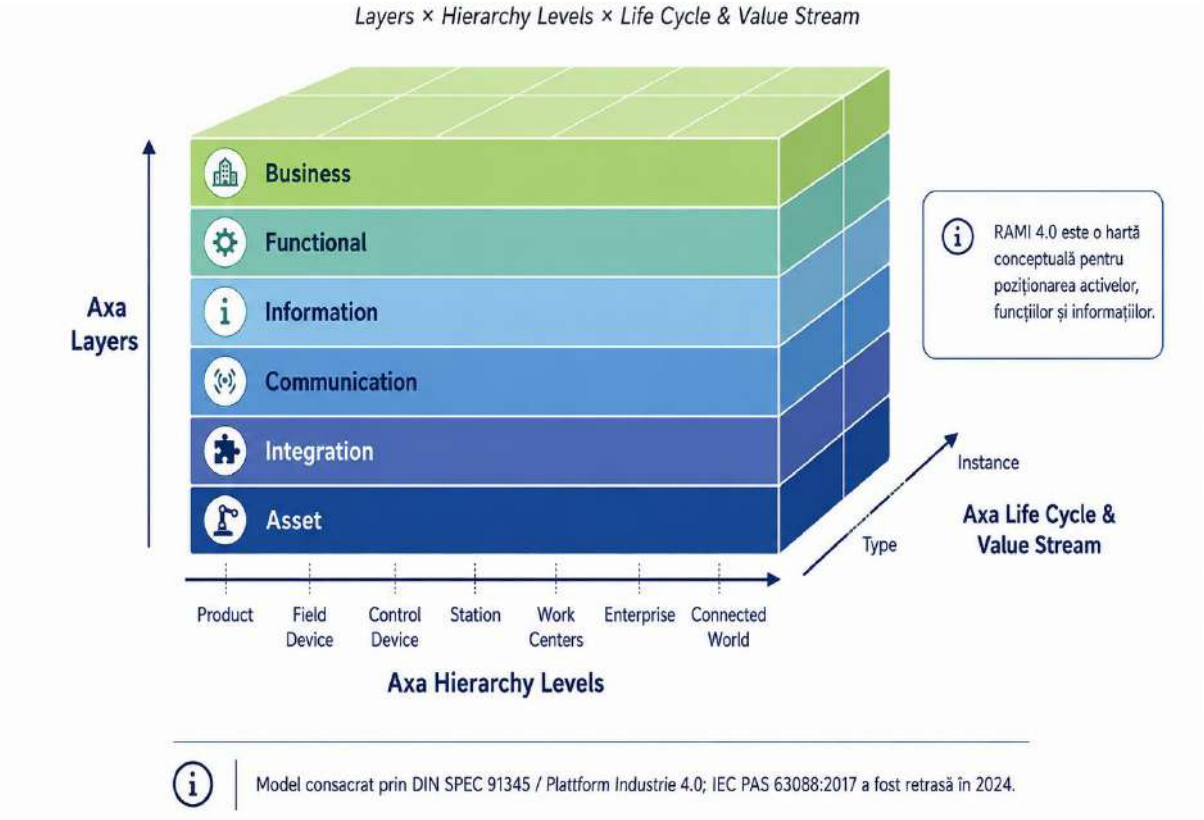


Figura 13.5. RAMI 4.0: model tridimensional Layers × Hierarchy Levels × Life Cycle. Pentru utilizare actuală se recomandă citarea RAMI 4.0 ca model de referință consacrat prin DIN SPEC 91345/Plattform Industrie 4.0 și corelarea, după caz, cu IEC 62264 și IEC 62890; IEC PAS 63088:2017 este retrasă din 2024.

Prima axă RAMI 4.0, Layers, descrie șase straturi conceptuale: Asset, Integration, Communication, Information, Functional și Business. Ele organizează perspectiva de la activul fizic și integrarea lui digitală până la informație, funcții și procese de business. Încadrarea unui echipament în aceste straturi este conceptuală și nu impune o topologie software unică.

A doua axă, Hierarchy Levels, descrie ierarhia organizațională în care se află activul: Product (produsul individual procesat), Field Device (senzorul / actuatorul individual), Control Device (PLC-ul), Station (echipamentul complet), Work Center (linia de producție), Enterprise (întreaga companie), Connected

World (lanțul valoric extern). Această axă este aliniată cu modelul ISA-95 / IEC 62264 și răspunde la întrebarea „în ce context organizațional se află activul?”.

Axa Life Cycle distinge în principal între tipul de produs/activ și instanța sa pe durata vieții, conectând fazele de dezvoltare și utilizare. IEC 62890:2020 oferă modele și termeni pentru life-cycle management. RAMI 4.0 este o hartă conceptuală: numărul de celule posibile nu reprezintă un set de cerințe care trebuie «completat», iar AAS nu este derivat mecanic din fiecare celulă a cubului [207].

13.3.3 Ecosistemul AAS: Catena-X, Manufacturing-X, DPP

Catena-X este un ecosistem de schimb suveran de date pentru lanțul valoric auto, cu standarde, servicii și reguli de utilizare a datelor. Participarea nu este o obligație juridică generală pentru industria auto; cerințele concrete pot apărea prin aderarea la ecosistem, relații bilaterale sau specificații ale partenerilor. AAS este utilizat în Catena-X pentru reprezentări de tip Digital Twin, dar ecosistemul nu trebuie redus la «AAS ca format unic de schimb» [208].

Manufacturing-X urmărește extinderea principiilor ecosistemelor de date interoperabile la sectoare industriale mai largi. Plattform Industrie 4.0 prezintă AAS ca element important pentru interoperabilitate, alături de infrastructuri de data space și reguli de suveranitate a datelor. Sub-inițiativele și proiectele se află la niveluri diferite de maturitate; nu trebuie presupusă o infrastructură unică sau compatibilitate automată cu toate implementările Catena-X [209].

Digital Product Passport (DPP) este introdus ca mecanism în Regulamentul (UE) 2024/1781 (ESPR), însă seturile de date și calendarul pentru categoriile de produse sunt stabilite prin reguli și acte specifice. Nu există o cronologie generică valabilă pentru toate produsele. Separat, Regulamentul (UE) 2023/1542 prevede, de la 18 februarie 2027, Battery Passport pentru bateriile LMT, bateriile industriale cu capacitate >2 kWh și bateriile pentru vehicule electrice. AAS poate susține implementări DPP, inclusiv prin inițiative IDTA precum DPP4.0, dar DPP nu este, prin lege, «un submodel AAS» [171, 172].

Pentru proiectant, decizia de a livra AAS se ia din cerințele clientului și ale ecosistemului de date. Un furnizor poate reutiliza AAS/submodele publicate pentru componente, dar disponibilitatea lor nu trebuie presupusă pentru întregul catalog al tuturor producătorilor Tier-1. Efortul de integrare depinde de granularitate, calitatea semanticii, mapping-ul către PLM/MES/EAM și governance; durata și beneficiul se estimează pe use case și pe toolchain-ul concret.

13.3.4 Exemplu concret: AAS pentru un senzor inductiv

Pentru exemplificare considerăm un senzor inductiv M12 industrial cu ieșire PNP și, opțional, interfață IO-Link. Exemplul AAS este DIDACTIC: câmpurile exacte depind de producător și de Submodel Templates utilizate. Un senzor standard de proximitate nu trebuie descris automat ca dispozitiv PL d/Cat. 3, iar informația AAS nu transformă o funcție standard într-o funcție safety.

În Digital Nameplate/Technical Data pot apărea producătorul, modelul, serialul, condițiile de mediu, tensiunea de alimentare, distanța nominală de detecție, tipul ieșirii și frecvența de comutare. Aceste date pot fi obținute din AAS, IO-Link IODD sau documentația furnizorului, în funcție de arhitectură. Distanța de detecție a unui senzor inductiv nu se utilizează automat pentru calculul distanței de separare conform ISO 13855; acea distanță depinde de funcția de protecție și de timpul total de oprire al sistemului.

Datele operaționale pot include ore de funcționare, număr de comutări, diagnoze, temperatură sau alte valori dacă dispozitivul și infrastructura le furnizează. Documentația poate fi referențiată prin Handover Documentation, iar informațiile de service prin șabloane de maintenance. Valorile numerice dintr-un exemplu trebuie marcate ca ilustrative și nu prezentate drept conținut publicat de un producător anonim fără sursă verificabilă.

Ca scenariu didactic, un submodel operațional definit pentru proiect ar putea expune, de exemplu, OperatingHours = 14 523 h, SwitchingCycles = 2 847 102 și CurrentState = ACTIVE, iar Handover Documentation ar putea referenția fișa tehnică, manualul de instalare și documentele de conformitate relevante. Valorile și denumirile proprietăților sunt ilustrative, nu conținut normativ al unui submodel universal. Intervalele de inspecție și piesele de schimb se preiau din documentația producătorului și din strategia de mentenanță; ele nu se deduc din simpla existență a AAS. Interoperabilitatea necesită șabloane, semantică, versiuni și interfețe compatibile, precum și integrarea cu sistemul consumator; nu este «instantanee» pentru orice sistem informațional.

13.3.5 Exemplu paralel: AAS pentru un rulment radial

Pentru o componentă mecanică fără conectivitate nativă, AAS este la fel de util pentru identitate, date tehnice, documentație și relațiile cu ansamblul. Ca exemplu didactic considerăm un rulment radial cu bile din seria 6308, etanșat pe ambele părți. Denumirea «rulment cu role cilindrice 6308-2RS1» din versiunea inițială este incorectă: seria 6308 aparține rulmenților radiali cu bile. Proprietățile exacte se preiau din catalogul producătorului și din configurația reală, fără a inventa marcaje CE sau valori de sarcină.

Un submodel de Technical Data poate conține dimensiuni, capacități de sarcină, turații limită, masă, material sau recomandări de lubrifiere. Handover Documentation poate referenția modelul CAD și fișele tehnice. Pentru componente mecanice uzuale nu se presupune existența unui marcaj CE individual; cerințele de conformitate se determină după legislația aplicabilă produsului.

Dacă ansamblul este instrumentat, datele de temperatură, vibrații și ore de funcționare pot fi asociate activului prin AAS și folosite de un model de condition monitoring/degradare. Pragurile de vibrație nu se preiau generic din vechiul ISO 10816; familia ISO 20816 se aplică în funcție de tipul mașinii și de punctul de măsurare. Estimarea duratei de viață rămase necesită un model validat și date adecvate; un B10 «real-time» nu rezultă automat din simpla existență a AAS.

Exemplul rezolvat 13.1. Structura unui Asset Administration Shell pentru stația SAP

Enunț. Beneficiarul cere ca stația SAP să fie livrată cu o identitate digitală conformă AAS. Să se propună structura de submodele și să se arate de unde provine informația din fiecare.

Pasul 1. Activul și identificatorii. Activul este stația SAP ca instanță, nu tipul de produs. AAS-ul primește un identificator global unic, iar activul un identificator propriu, legat de numărul de serie de pe plăcuța mașinii.

Pasul 2. Alegerea submodelelor. Se pornește de la use case-urile beneficiarului, nu de la o listă fixă. Pentru SAP sunt relevante patru submodele:

- Digital Nameplate: producător, tip, număr de serie, anul fabricației și marcajul CE, adică datele de pe plăcuța mașinii;
- date tehnice, după șablonul Generic Frame for Technical Data: forța de presare 5–8 kN, cursa axei Z, timpul de ciclu nominal, alimentările electrică și pneumatică;

- Handover Documentation: declarația UE de conformitate, manualul de utilizare, schemele electrice și pneumatice, protocoalele FAT și SAT;
- un submodel pentru datele de proces: pentru fiecare ansamblu, forța maximă, cursa la forța maximă și verdictul OK/NOK (§6.7.3).

Pasul 3. Sursa informației. Primele trei submodele conțin date statice, care provin din documente existente: caietul de sarcini, specificația tehnică de realizare și dosarul tehnic (Capitolul 10). Al patrulea conține date dinamice, transmise de controler prin OPC UA (§13.4). AAS-ul nu duplică informația, ci face referire la sursa ei.

Pasul 4. Verificarea. Structura se verifică prin întrebarea „ce aplicație folosește fiecare submodel?": mentenanța folosește documentația predată, sistemul de trasabilitate folosește datele de proces, iar evidența activelor folosește plăcuța digitală. Un submodel fără un consumator identificat nu se include.

Rezultat. AAS-ul SAP nu este un document nou, ci un mod standardizat de a expune informații pe care proiectul le produce oricum. Costul principal nu este tehnic, ci de disciplină: identificatorii și versiunile documentelor trebuie gestionate încă de la început.

13.4 OPC UA și integrarea verticală

AAS răspunde la întrebarea «cum descriem și identificăm activul?». OPC UA răspunde la o parte din întrebarea «cum schimbăm informații între aplicații și echipamente?». Seria IEC 62541 definește arhitectura, serviciile, information models, securitatea, mappings și PubSub. În 2025–2026 au fost publicate ediții noi pentru numeroase părți, inclusiv Part 1:2025, Part 3/4/6/7:2025, Part 5:2026, Part 14:2026 și Part 21:2026. OPC UA nu este singurul protocol posibil și nu elimină automat middleware-ul, dar oferă o bază interoperabilă puternică atunci când modelele informaționale sunt bine definite [116, 123, 124].

OPC UA continuă evoluția familiei OPC, pornită în 1996 cu OPC Classic, denumit inițial OLE for Process Control și bazat pe tehnologiile Microsoft COM/DCOM. Această arhitectură era puternic legată de ecosistemul Windows și putea crea dificultăți de configurare cross-platform, firewall și securitate. OPC UA, introdus ulterior ca arhitectură independentă de platformă, combină servicii de comunicație cu Address Space și information models și integrează mecanisme de securitate precum certificate X.509, autentificare, autorizare, semnare și criptare prin profilele de securitate aplicabile. Client-server și PubSub sunt modele de comunicație complementare; performanța și determinismul depind de profil, transport și implementare, nu rezultă automat din utilizarea OPC UA.

13.4.1 IEC 62264 / ISA-95 și integrarea între niveluri funcționale

IEC 62264/ISA-95 descrie integrarea dintre manufacturing operations și business systems printr-un model funcțional. Reprezentarea pedagogică în cinci niveluri rămâne utilă, dar nu trebuie interpretată literal ca «Field = nivel 0, PLC = 1, SCADA = 2, MES = 3, ERP = 4» pentru orice fabrică. Nivelul 0 reprezintă procesul fizic; nivelurile 1–2 acoperă sensing/manipulation și monitoring/control; nivelul 3 manufacturing operations management; nivelul 4 business planning and logistics (Figura 13.6). IEC 62264-2 a fost revizuit în 2026 [115, 210].

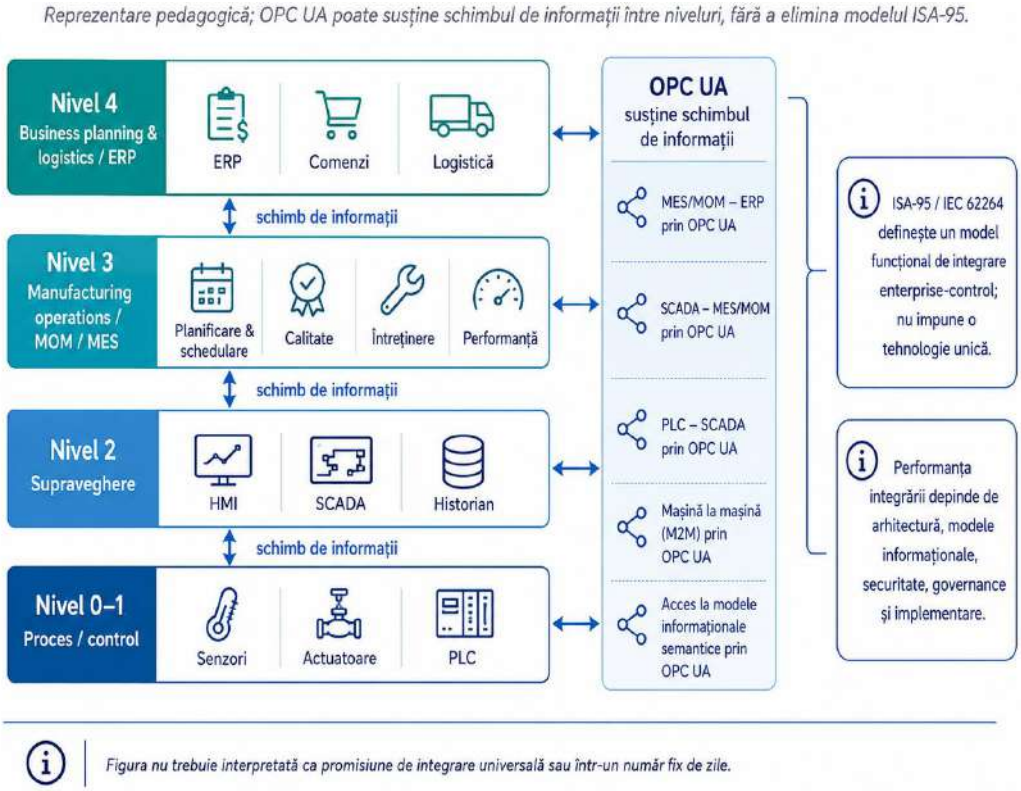


Figura 13.6. Reprezentare pedagogică a relației IEC 62264/ISA-95 dintre proces, control, manufacturing operations și business systems, cu OPC UA ca mecanism posibil de schimb de informații între niveluri. Figura nu trebuie să sugereze că OPC UA «elimină» nivelurile ISA-95 sau garantează o integrare PLC–MES într-un număr fix de zile.

Nivelul 0 reprezintă procesul fizic. Nivelurile 1 și 2 includ funcțiile de sensing/manipulation și monitoring/control, implementate prin senzori, actuatoare, controlere, HMI/SCADA și alte sisteme. Scările temporale variază de la procese rapide la monitorizare lentă; standardul definește roluri funcționale, nu timpi universali de microsecunde/milisecunde pentru fiecare nivel.

Nivelul 3 acoperă manufacturing operations management (production, quality, maintenance și inventory operations) iar nivelul 4 business planning and logistics. Produsele software MES/MOM și ERP sunt implementări posibile ale acestor funcții, dar frontierele reale depind de arhitectura organizației. Integrarea se proiectează prin obiecte informaționale, servicii și responsabilități, nu doar prin «saltul» unui protocol între niveluri.

Notă editorială. În acest capitol, SAP S/4HANA și SAP Manufacturing Execution se referă la produsele software ale companiei germane SAP SE, distincte de acronimul SAP (Stația de Asamblare prin Presare) utilizat ca studiu de caz didactic pe tot parcursul manualului. Contextul textual diferențiază fără ambiguitate cele două semnificații: produsele SAP SE apar în legătură cu MES și ERP enterprise, iar studiul de caz Stația SAP apare în legătură cu actuatoare, FMEA mecanic și commissioning.

OPC UA poate permite schimb direct de informații între funcții situate la niveluri diferite ale modelului IEC 62264 și poate reduce mapping-ul proprietar atunci când sunt folosite information models și Companion Specifications comune. Totuși, integrarea nu devine automat «directă până la ERP»: gateway-urile, DMZ-urile, MES/MOM, data governance și politicile de security pot rămâne necesare. Discovery-ul OPC UA ajută la explorarea Address Space-ului, dar onboarding-ul semantic și contractual

necesită în continuare namespace-uri, certificate, roluri și mapping. Beneficiul se măsoară prin efortul de integrare, reutilizarea interfețelor și reducerea transformărilor custom, nu printr-un timp universal de implementare.

13.4.2 Companion Specifications: interoperabilitate semantică

OPC UA oferă un mecanism comun de schimb și modelare a informației, dar interoperabilitatea reală cere mai mult decât aceeași tehnologie de transport. Furnizorii trebuie să utilizeze semantică, structuri și convenții compatibile. Companion Specifications răspund acestei nevoi prin information models standardizate pentru domenii și use case-uri concrete, reducând mapping-ul proprietar atunci când sunt implementate consecvent (Figura 13.7).

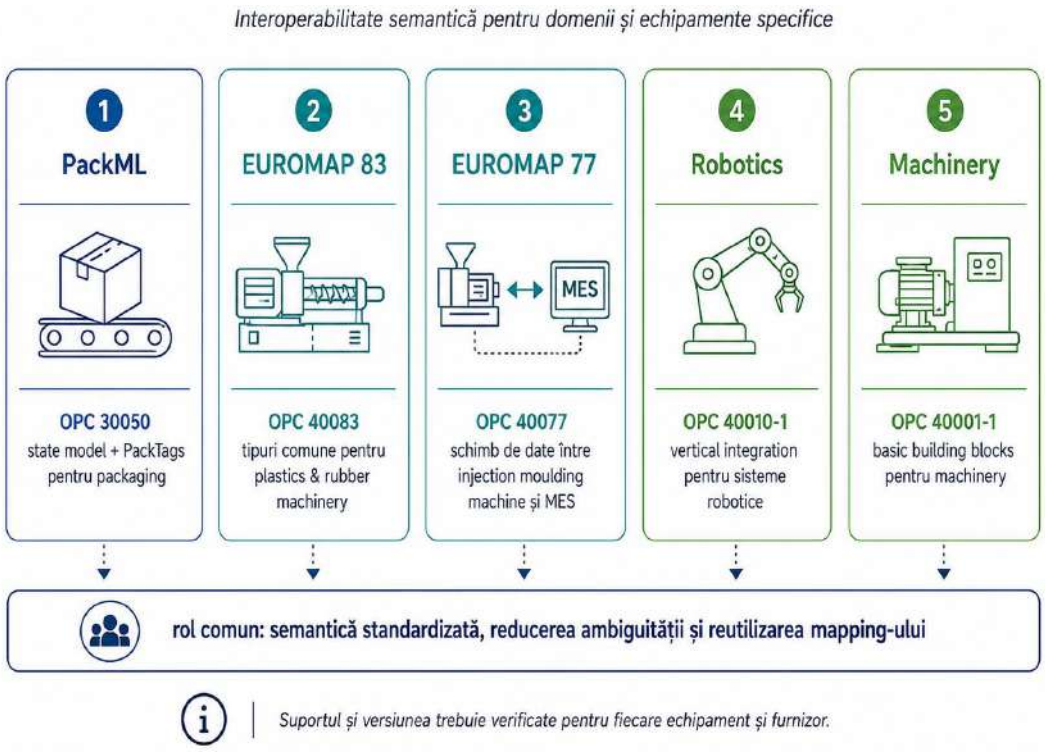


Figura 13.7. Exemple de Companion Specifications / information models OPC UA relevante pentru machinery: OPC UA for PackML (OPC 30050), EUROMAP 77/83 pentru plastics & rubber machinery, OPC UA for Robotics (OPC 40010-1) și OPC UA for Machinery (OPC 40001-1). Rolul lor este interoperabilitatea semantică; suportul și versiunea trebuie verificate pentru fiecare echipament.

OPC UA for PackML (OPC 30050) reprezintă în OPC UA concepte din PackML/OMAC. Modelul PackML include un state model și PackTags utilizate în packaging și alte aplicații. Lista clasică de 17 stări trebuie prezentată fără duplicări: Aborted, Aborting, Clearing, Stopped, Stopping, Resetting, Idle, Starting, Execute, Completing, Complete, Holding, Held, Unholding, Suspending, Suspended și Unsuspending. Implementarea concretă poate utiliza un subset conform modurilor și funcțiilor mașinii [211].

În domeniul maselor plastice, EUROMAP 83 / OPC 40083 definește tipuri comune pentru plastics and rubber machinery, iar EUROMAP 77 / OPC 40077 definește schimbul de date dintre injection moulding machine și MES. Separarea dintre «common types» și interfața IMM–MES este importantă; cele două documente nu au același rol [212].

Pentru robotică, OPC UA for Robotics Part 1: Vertical Integration (OPC 40010-1, versiune 1.02 publicată în 2025) definește un information model pentru integrarea sistemelor robotice. Pentru machinery în general, OPC UA for Machinery Part 1: Basic Building Blocks (OPC 40001-1, versiune 1.04.1 din 2026) oferă building blocks reutilizabile pentru identificare, stări, moduri, contoare și monitorizare. VDMA 40001 nu este o specificație «pentru ambalare generală» [213, 214].

13.4.3 Cybersecurity și guvernanța interfețelor

Conectivitatea Industry 4.0 extinde suprafața de atac și trebuie proiectată împreună cu safety și availability. OPC UA oferă mecanisme de autentificare, certificate, semnare/criptare, autorizare și audit, însă securitatea sistemului depinde de configurare, PKI, network segmentation, lifecycle-ul certificatelor și hardening. Seria IEC 62443 oferă cadrul relevant pentru IACS: zone/conduits, security levels, secure product development și cerințe pentru componente/sisteme. Remote access, cloud connectors și write access către controller se activează după principiul least privilege, cu logging și proceduri de revocare [6, 117, 215].

AAS, MQTT, REST și OPC UA pot coexista. Alegerea protocolului nu trebuie făcută doar după «ușurința conectării», ci după semantica necesară, determinism, bandwidth, ownership-ul datelor, confidentiality/integrity/availability și cerințele de audit. Pentru funcții care pot modifica starea fizică, canalul digital intră în analiza de risc a sistemului și trebuie să aibă limite, fallback și proceduri de change control.

> **În practică · Cum se cuantifică beneficiul Companion Specifications**
>
> Companion Specifications reduc efortul de integrare atunci când mai mulți furnizori implementează aceeași semantică și aceeași versiune a modelului. Beneficiul apare prin reutilizarea mapping-ului, testelor și dashboard-urilor, nu prin simpla existență a unui server OPC UA.
>
> Pentru un business-case se măsoară separat: ore de engineering per tip de mașină, numărul de transformări custom, defecte de mapping, durata de onboarding, testele de regresie și costul mentenanței interfețelor. Se compară baseline-ul proprietar cu arhitectura standardizată pe mai multe proiecte/mașini.
>
> Nu se recomandă publicarea unor economii de 30–45 săptămâni sau 90–135 kEUR ca valori generale fără datele proiectului. În manual, acestea pot fi folosite doar ca scenariu de calcul cu ipoteze transparente.

13.5 MBSE și SysML: proiectarea bazată pe modele

Secțiunile §13.2–§13.4 au tratat reprezentarea digitală, identitatea activului și interoperabilitatea operațională. Secțiunea de față mută accentul spre digital engineering: cum se păstrează coerente cerințele, arhitectura, interfețele, comportamentele, analizele și verificările atunci când sistemul devine complex și evoluează prin numeroase variante și modificări? MBSE (Model-Based Systems Engineering) răspunde acestei probleme prin utilizarea disciplinată a modelelor ca artefacte inginerești primare. SysML este un limbaj standard frecvent utilizat pentru modelarea sistemelor, dar MBSE este o abordare mai largă și nu este echivalentă cu folosirea obligatorie a SysML.

Într-o abordare MBSE, cerințele, arhitectura, interfețele, comportamentele, analizele și verificările pot fi relaționate într-un repository de engineering și într-un set coerent de modele. Relațiile explicite permit impact analysis, verificări de consistență și generarea sau derivarea controlată a unor documente, dacă toolchain-ul o permite. O modificare a unei cerințe nu «propagă automat» o soluție corectă

în toate disciplinele: efectele trebuie analizate, aprobate și validate prin configuration/change management. CAD, CAE, ECAD, software și modelele specializate rămân authoritative pentru informațiile pe care le stăpânesc.

13.5.1 De ce MBSE: limitele abordării exclusiv document-centric

MBSE nu înlocuiește toate documentele, ci mută sursa principală de consistență într-un model formal și într-un repository de engineering. Cerințele, arhitectura, interfețele, comportamentele și verificările pot fi relaționate explicit, iar documentele necesare contractual sau legal pot fi generate/derivate din model. Gradul de automatizare depinde de instrumente, convenții de modelare și integrarea cu PLM/ALM.

Valoarea MBSE crește odată cu numărul de cerințe, interfețe, variante și schimbări. Nu există un prag universal de «50 subsisteme» și nici o statistică robustă conform căreia 75 % dintre depășirile de cost provin din requirements/interfaces. Beneficiile urmărite sunt trasabilitatea, impact analysis, consistența interfețelor, reutilizarea modelelor și reducerea duplicării datelor. Ele trebuie demonstrate prin indicatori ai organizației, nu prin procente generale.

13.5.2 SysML 1.7 și tranziția la SysML v2.0

În 2026 coexistă două generații relevante. OMG a adoptat SysML 1.7 în iunie 2024; această familie păstrează notația clasică bazată pe diagrame și rămâne utilizată în numeroase toolchain-uri existente (Figura 13.8). OMG a aprobat SysML v2.0, KerML 1.0 și Systems Modeling API and Services în iulie 2025, iar versiunea formală SysML 2.0 este publicată cu data de adoptare septembrie 2025. SysML v2 este o reproiectare majoră, cu semantică mai precisă, notații textuale și grafice complementare și API-uri standardizate orientate spre interoperabilitate și automatizarea digital engineering [22, 216].

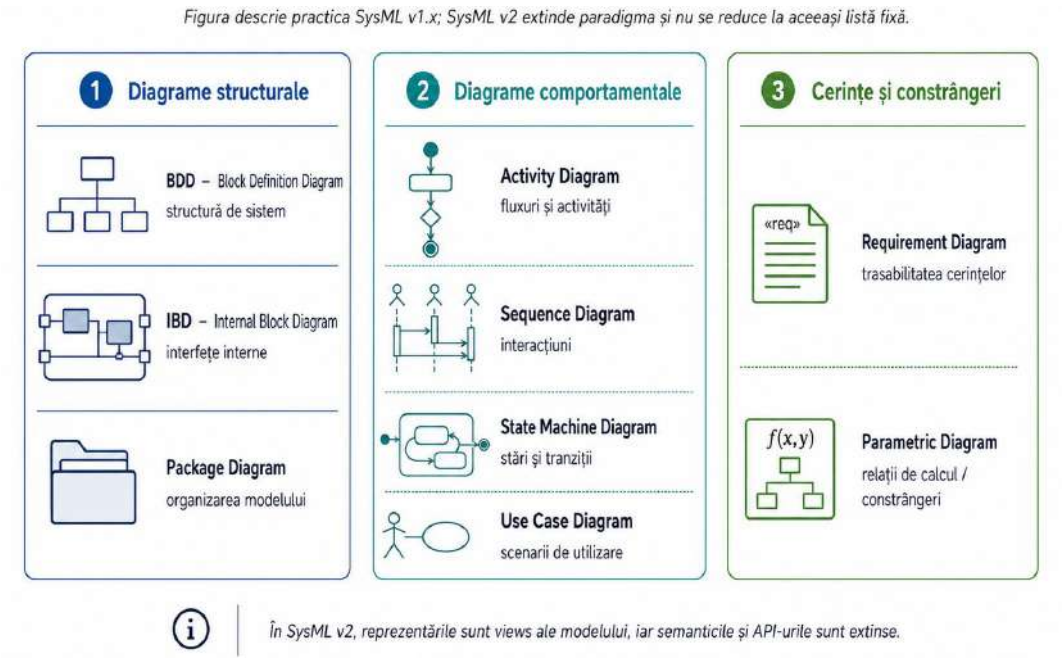


Figura 13.8. Cele nouă tipuri clasice de diagrame din SysML v1.x, grupate uzual în structurale, comportamentale, requirements și parametric. În 2026 această figură trebuie însoțită de mențiunea explicită că SysML v2.0 este standardul de generație nouă și nu se reduce la aceeași listă fixă de nouă diagrame.

În SysML v1.x, BDD, IBD și Package sunt utilizate pentru structură și organizarea modelului. Ele rămân utile pentru înțelegerea proiectelor legacy și pentru toolchain-uri care nu au migrat încă. În SysML v2, conceptele de structură sunt exprimate printr-un metamodel și sintaxe noi, iar reprezentările grafice sunt views ale modelului, nu o listă rigidă de diagrame tratată ca scop în sine.

Activity, Sequence, State Machine și Use Case sunt notații v1.x frecvent utilizate pentru comportament și interacțiuni. Alegerea reprezentării trebuie să urmeze întrebarea de engineering: flux de activități, interacțiuni temporale, stări sau use cases. Pentru control PLC, relația cu Grafcet/SFC trebuie tratată ca mapping între modele, nu ca echivalență sintactică perfectă.

Requirement și Parametric Diagram susțin trasabilitatea cerințelor și relațiile de constrângere în SysML v1.x. SysML v2 extinde semnificativ reprezentarea requirements, analysis și verification și oferă sintaxă textuală, ceea ce facilitează versionarea, interogarea și automatizarea. Modelele matematice specializate (FEA, MBS, Modelica etc.) pot fi referențiate/co-simulate, fără a fi rescrise integral în SysML.

Toolchain-ul MBSE este în tranziție. Cameo/3DEXPERIENCE, IBM Engineering Systems Design Rhapsody, Sparx Enterprise Architect, Capella/Arcadia și alte instrumente au grade diferite de suport pentru SysML v1, SysML v2, APIs și schimb de modele. Nu toate exportă nativ AutomationML și nu există o legătură universală SysML → EPLAN/TIA/NX. Interoperabilitatea trebuie demonstrată prin conectori, API-uri, mapping semantic și controlul configurației.

Pentru un subsistem mecanic, modelele SysML pot descrie structura, interfețele, comportamentul și constrângerile fără a reproduce în SysML toate detaliile CAD/CAE. Într-un exemplu de reductor, un Block Definition Diagram poate identifică motorul, cuplajul, arborii, angrenajul, rulmenții și etanșările, iar un Internal Block Diagram poate descrie porturile și fluxul de putere dintre aceste elemente. Parametrii tehnici rămân legați de sursele authoritative din CAD, PLM și cataloage, evitând duplicarea necontrolată a datelor.

Un Parametric Diagram poate lega cerințe și relații de calcul, de exemplu criterii de rezistență sau de oboseală, cu parametrii proveniți din modele CAE. Activity/State representations pot descrie commissioning-ul mecanic și deciziile de re-testare, dar duratele de run-in și limitele de aliniere se preiau din specificația proiectului și documentația componentelor, nu din praguri universale. Valoarea MBSE constă în trasabilitatea dintre cerință, model, interfață și test și în reutilizarea controlată a modelelor pentru variante; efortul de modelare se estimează per proiect.

13.5.3 Adoptarea MBSE: context industrial și tranziția către SysML v2

Adoptarea MBSE este mai matură în domenii cu sisteme complexe și cicluri lungi de dezvoltare, precum aerospace, defence și automotive, dar variază puternic între organizații și programe. Afirmații precum «toate proiectele majore» sau «modelul SysML este sursa unică de adevăr în întregul sector» sunt prea generale. Pentru un producător de echipamente, maturitatea MBSE se evaluează prin managementul cerințelor, trasabilitate, model governance, reutilizare și integrarea cu PLM/ALM/engineering tools.

În automotive și manufacturing equipment, MBSE este utilizat mai ales acolo unde complexitatea interfețelor, variantele și cerințele de safety/software justifică investiția. Alegerea instrumentului este secundară față de metoda de modelare și de ownership-ul datelor. În 2026, un aspect strategic este planul de tranziție de la ecosistemele SysML v1.x la SysML v2, fără pierderea modelelor și a trasabilității istorice.

Pentru IMM-uri, introducerea MBSE poate fi incrementală: requirements + architecture + interfaces pentru subsistemele critice, apoi extindere spre behaviour și verification. Capella/Arcadia este open-source, dar nu este pur și simplu «SysML open source»; utilizează propria metodă și metamodel. Sparx EA și alte instrumente comerciale pot oferi o barieră de intrare mai redusă, însă decizia trebuie bazată pe competențe, integrare și cost total de ownership.

Integrarea MBSE cu ECAD/MCAD/PLC este un domeniu activ de digital engineering. AutomationML, APIs, OSLC și conectorii proprietari pot transfera anumite date între instrumente, dar generarea automată completă a schemei EPLAN sau a codului PLC din SysML nu trebuie prezentată ca funcție standard disponibilă universal. Pentru fiecare toolchain se definește ce informații sunt authoritative, ce mapping-uri sunt automate și ce verificări rămân manuale [217].

13.6 Tipare de arhitectură pentru platforme Digital Twin / IIoT

Implementarea operațională a unui Digital Twin poate utiliza suite PLM/engineering integrate, platforme IIoT, servicii cloud, software de simulare și componente open-source (Figura 13.9). Piața se schimbă rapid; de aceea este mai robust să comparăm tipare de arhitectură decât să declarăm «patru platforme dominante în 2026». Criteriile relevante sunt interoperabilitatea, ownership-ul datelor, deployment-ul edge/on-prem/cloud, securitatea, integrarea cu toolchain-ul clientului, costul ciclului de viață și evitarea lock-in-ului nejustificat.

Numărul total de platforme și cotele de piață depind de definiția analistului și se modifică frecvent. Pentru proiectantul de echipamente, întrebarea nu este «care platformă câștigă piața?», ci ce interfețe și modele deschise trebuie livrate astfel încât echipamentul să poată fi integrat în ecosistemul clientului: OPC UA information models, AAS, MQTT/REST acolo unde sunt potrivite, exporturi standard, certificate și documentație de integrare.

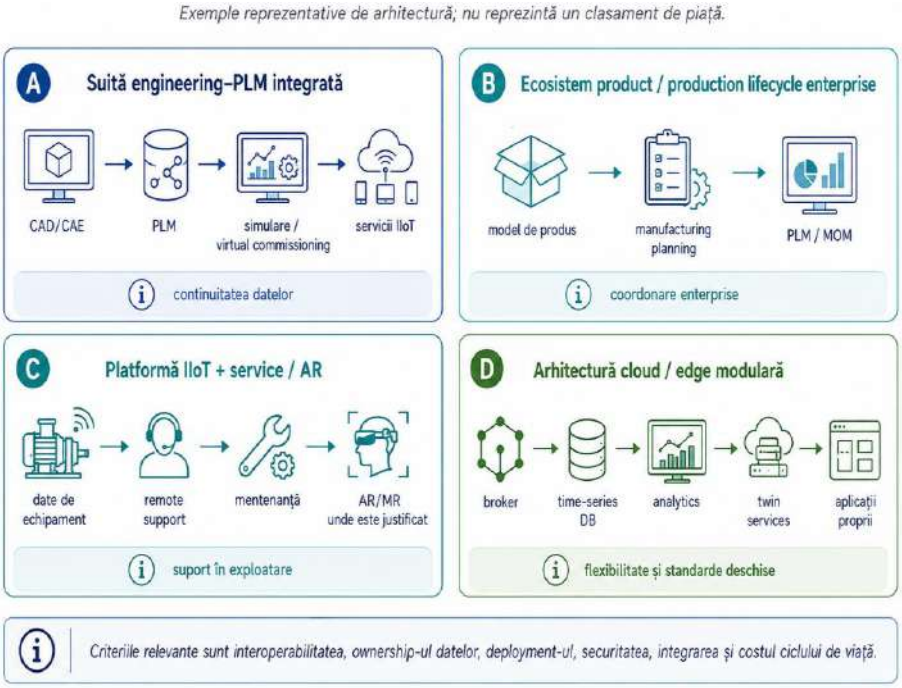


Figura 13.9. Patru tipare reprezentative de arhitectură pentru Digital Twin/IIoT: suită engineering–PLM integrată, ecosistem product/production lifecycle, platformă orientată IIoT/AR și arhitectură cloud/edge modulară. Exemplele de produse sunt ilustrative; figura nu reprezintă un clasament de piață sau o listă de «platforme dominante».

Tiparul A (suită engineering–PLM integrată) combină CAD/CAE, PLM, simulation/virtual commissioning și servicii IIoT într-un ecosistem comun. Avantajul este continuitatea datelor și identității; dezavantajele pot include costul total și dependența de ecosistem. Exemplele comerciale trebuie evaluate la versiunea și licențierea concretă, deoarece denumirile și serviciile se schimbă în timp.

Tiparul B (product/production lifecycle enterprise) pune accent pe modele de produs, manufacturing planning, simulation și PLM/MOM. Este relevant pentru organizații cu procese complexe și o strategie enterprise coerentă. Afirmațiile de «dominanță» pe un sector sau echivalența costurilor între furnizori nu pot fi generalizate fără date de piață și configurații comparabile.

Tiparul C (IIoT + service/AR) conectează date de produs și echipament cu aplicații de service, instruire, remote support și, unde este justificat, AR/MR. Valoarea apare în procese concrete de mentenanță și service; AR/MR nu este o condiție pentru Digital Twin și nici un indicator de maturitate în sine.

Tiparul D (cloud/edge modular) combină servicii cloud sau on-prem, brokeri, time-series databases, twin services, analytics și aplicații proprii. Poate utiliza componente open-source precum Eclipse Ditto, InfluxDB/TimescaleDB, Grafana și Node-RED, împreună cu implementări AAS dedicate. «Open source» nu înseamnă cost total zero: integrarea, operarea, observability, backup-ul, patching-ul și cybersecurity rămân responsabilități majore.

În practică · Stack modular/open-source pentru IIoT și Digital Twin

Pentru organizațiile care nu doresc o suită proprietară completă, un stack poate combina Eclipse Ditto sau alte twin services, time-series database, Grafana, Node-RED, broker MQTT și componente AAS dedicate. Arhitectura exactă depinde de use case și de cerințele de securitate; Eclipse Ditto nu trebuie prezentat ca implementare AAS completă prin definiție.

Licențele open-source pot reduce costurile de licențiere, dar nu elimină integrarea, hosting-ul, backup-ul, observability, patching-ul, hardening-ul și suportul. TCO trebuie calculat pe ciclul de viață și comparat cu alternativele comerciale pe aceeași funcționalitate.

Avantajul major este controlul arhitecturii și posibilitatea de a compune servicii; dezavantajul este responsabilitatea crescută pentru integrare și operare. Interoperabilitatea se păstrează prin standarde deschise, contracte de date și teste de conformitate.

13.7 Exemple industriale Industry 4.0

Exemplele următoare sunt bazate pe practici și cazuri publice ale industriei, dar sunt utilizate ca EXEMPLE DE ARHITECTURĂ ȘI METODĂ, nu ca benchmark-uri universale (Figura 13.10). Indicatorii publicați de companii trebuie atribuiți sursei și interpretați în context; ei nu demonstrează că orice implementare Industry 4.0 va produce aceleași rezultate.

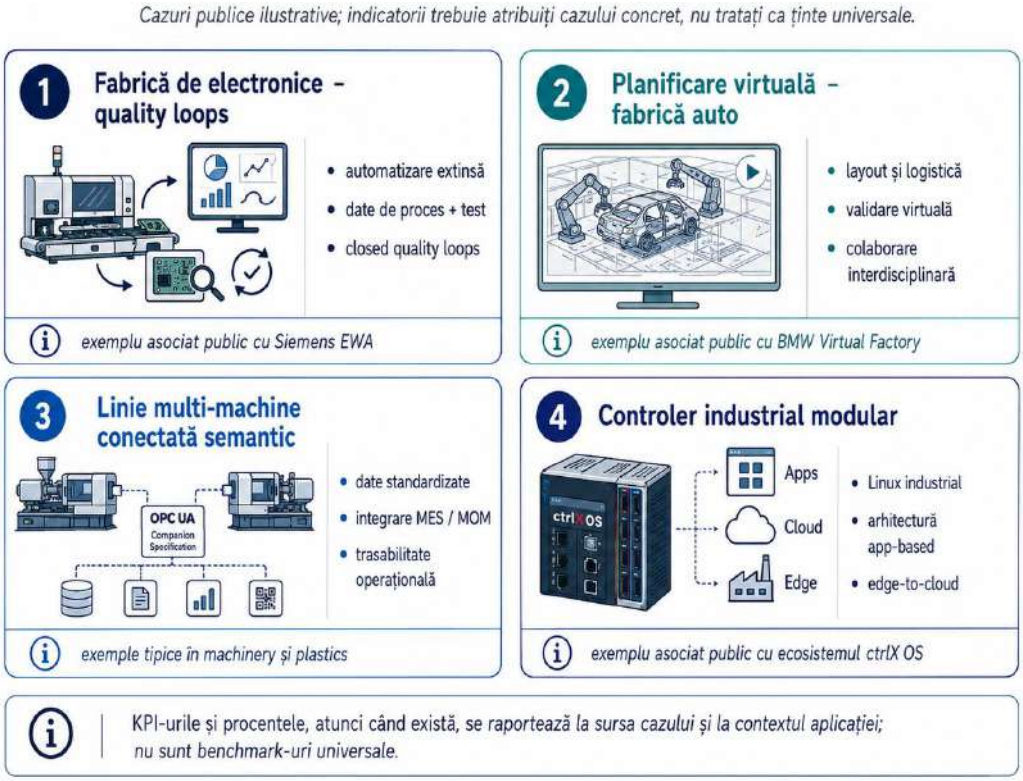


Figura 13.10. Patru tipuri de cazuri industriale relevante pentru Industry 4.0: fabrică de electronice cu digitalizare extinsă și quality loops, planificare virtuală a unei fabrici auto, linie multi-machine conectată semantic și controler industrial Linux/app-based. Valorile KPI din surse publice trebuie atribuite cazului concret, nu tratate ca ținte universale.

13.7.1 Fabrică de electronice de referință: digitalizare și quality loops

Un caz public cunoscut este Siemens Electronics Works Amberg (EWA), pentru care Siemens raportează în materialele sale tehnice o calitate a producției de 99,9990 %. Această valoare este un indicator de calitate atribuit cazului și sursei Siemens, nu OEE și nu trebuie transformată în «OEE >99 %» sau într-un benchmark general. Relevanța pentru capitol este integrarea dintre automatizare, date, testare și closed quality loops, nu reproducerea unui KPI izolat [218].

Cazul arată valoarea trasabilității și a testării integrate, dar nu demonstrează că fiecare produs are neapărat un AAS sau că orice fabrică poate atinge aceeași performanță. Pentru proiectant, lecția transferabilă este proiectarea datelor și a verificărilor împreună cu procesul fizic: identifiers, genealogy, measurements, feedback și versionarea configurației.

13.7.2 Planificare virtuală a fabricii auto: cazul BMW Debrecen

BMW Group a prezentat fabrica Debrecen drept prima sa facilitate planificată și validată complet virtual, în colaborare cu NVIDIA și folosind Omniverse pentru simulări de tip digital twin înaintea lansării producției. Cazul susține utilizarea planificării virtuale pentru layout, robotică, logistică și colaborare. În 2025, BMW Group a anunțat extinderea Virtual Factory la peste 30 de situri de producție și a proiectat, pentru propriile aplicații, reduceri ale costurilor de production planning de până la 30 %. Acest procent aparține explicit cazului BMW și nu trebuie transferat ca benchmark universal altor fabrici [219].

Beneficiile inginerești transferabile sunt: colaborarea pe un model comun, verificarea coliziunilor și accesibilității, evaluarea fluxurilor, testarea scenariilor înaintea modificărilor fizice și pregătirea operatorilor. Modelele virtuale nu înlocuiesc validarea safety și SAT pe echipamentul real; ele reduc incertitudinea și permit mutarea unor verificări mai devreme în ciclul de viață.

Catena-X, OPC UA și alte tehnologii de interoperabilitate pot completa o astfel de arhitectură, dar adoptarea lor se verifică pentru cazul concret. Pentru baterii, cerința juridică relevantă este Battery Passport din Regulamentul (UE) 2023/1542, aplicabil de la 18 februarie 2027 pentru categoriile prevăzute; aceasta nu trebuie confundată cu o obligație generală Catena-X sau cu ESPR pentru toate echipamentele.

13.7.3 Linie multi-machine: interoperabilitate semantică și optimizare globală

Într-o linie de ambalare sau îmbuteliere, valoarea Industry 4.0 apare când mașinile publică semantic stări, contoare, joburi și evenimente într-un mod coerent, astfel încât SCADA/MES/MOM să nu necesite mapping complet diferit pentru fiecare furnizor. PackML, OPC UA for Machinery și Companion Specifications specifice domeniului pot reduce acest efort. Durata integrării și reducerea timpului de oprire sunt însă dependente de linie și trebuie măsurate pe proiect.

Digital Twin-ul liniei poate fi utilizat pentru buffer sizing, scenarii de blocaj, changeover, throughput și training. Algoritmii de optimizare pot coordona vitezele mașinilor pentru obiectiv global, dar orice comandă trebuie constrânsă de limitele procesului, calitate, safety și stabilitatea controlului. Remote diagnostics necesită arhitectură de securitate, controlul accesului, logging și politici IEC 62443; conectarea directă la echipament din Internet nu este o practică acceptabilă implicit.

13.7.4 Controler industrial Linux și arhitectură app-based

Un exemplu public este ecosistemul Bosch Rexroth ctrlX AUTOMATION/ctrlX OS. Producătorul descrie ctrlX OS ca sistem de operare industrial bazat pe Linux, capabil de funcționare real-time, cu arhitectură modulară și app-based și cu utilizare de la field/edge până la cloud. Analogia «smartphone industrial» poate explica modularitatea software, dar controller-ul rămâne un sistem industrial cu cerințe de determinism, safety, security și lifecycle support diferite de un dispozitiv consumer [220].

Arhitecturile app-based permit separarea funcțiilor PLC, IoT, baze de date, AI/vision și servicii de conectivitate, dar suprafață de atac și managementul dependențelor cresc. Pentru proiectant sunt esențiale versionarea aplicațiilor, compatibility matrix, signed updates, backup/restore, role-based access și o politică de patching. Numărul de aplicații din marketplace se schimbă continuu și nu trebuie fixat ca valoare de manual fără o dată și sursă.

Direcția este relevantă pentru convergența IT/OT: runtime-ul de control nu mai trebuie să fie singura funcție a controlerului, iar software-ul poate fi extins modular. Această flexibilitate nu elimină PLC-urile clasice și nu implică o tranziție inevitabilă a tuturor producătorilor către aceeași arhitectură; alegerea depinde de determinism, safety, support, cybersecurity și modelul de business al aplicației.

13.8 Studiu de caz integrat: scenariu conceptual Digital Thread pentru SAP

Pentru configurația SAP de referință, se propune un scenariu de Digital Thread care ar conecta cerințele REQ–P01/REQ–P02/REQ–T01, desenul tub–carcasă, dispozitivul CL1/CL2, axa electrică Z, versiunile rețetelor, viitoarele măsurări sincronizate F–z, configurația as-built și eventualele ECR/ECO. Cele șase faze sunt o convenție didactică a cărții, nu o taxonomie ISO obligatorie. Artefactele de validare, înregistrările de operare și legăturile dintre instrumente sunt livrabile propuse; până la realizarea și verificarea stației, figura nu demonstrează un Digital Thread implementat sau un Digital Twin operațional (Figura 13.11).

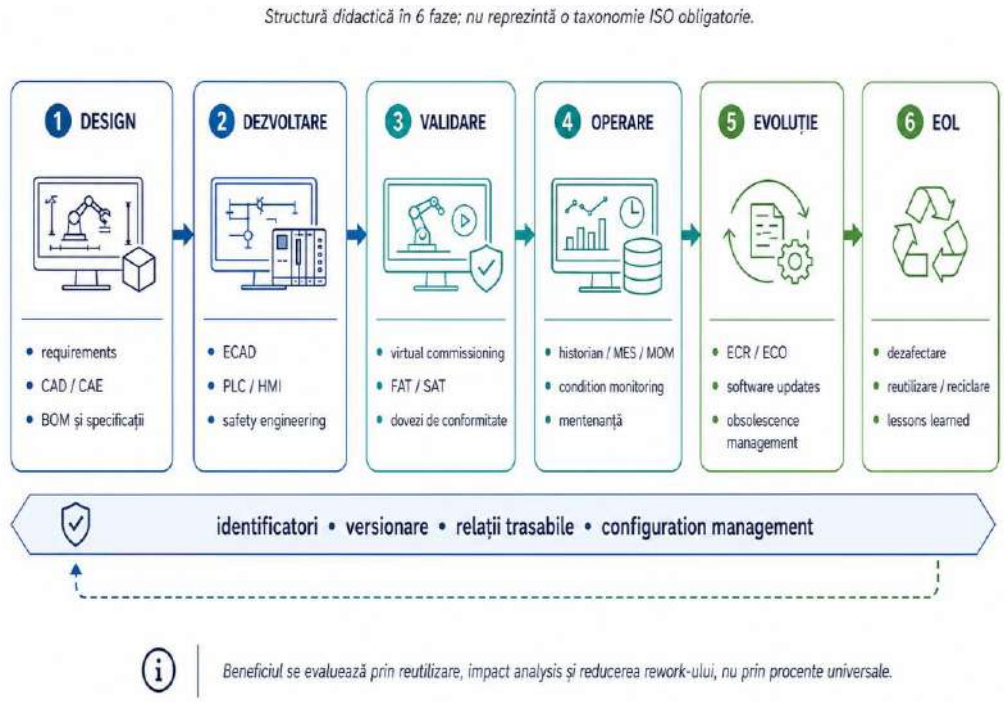


Figura 13.11. Scenariu conceptual propus de Digital Thread pentru stația SAP în șase faze: Design, Dezvoltare, Validare, Operare, Evoluție și EOL. Datele și artefactele sunt conectate prin identificatori, versionare și relații trasabile. Beneficiul se evaluează prin reutilizare, impact analysis și reducerea rework-ului, nu prin procente universale.

Faza 1. DESIGN: modele CAD/CAE, cerințe și arhitectură. Ieșirile sunt versiuni controlate de modele, BOM și specificații, gestionate într-un repository/PLM. Dacă MBSE este utilizat, relațiile către requirements și interfaces se păstrează explicit. Alegerea NX, CATIA, Inventor sau altui instrument nu schimbă principiul Digital Thread.

Faza 2. DEZVOLTARE: ECAD, software de control, HMI și safety engineering. EPLAN, TIA Portal, SISTEMA sau alte instrumente pot participa la toolchain; integrarea dintre ele poate fi automată sau semi-automată. Digital Thread cere identificatori și versionare coerentă, nu presupune că fiecare semnal PLC este conectat automat bidirecțional la orice artefact ECAD/MBSE.

Faza 3. VALIDARE: dacă vor fi executate, Virtual Commissioning, FAT/SAT și evaluarea conformității vor genera dovezi de verificare/validare și o configurație acceptată. Acestea sunt livrabile planificate în studiul SAP, nu teste realizate sau un marcaj CE obținut. Dovezile ar putea fi gestionate ca documente

și date corelate prin AAS/PLM; nu este necesară transformarea fiecărui document tehnic în submodel AAS.

Faza 4. OPERARE: într-o implementare viitoare, datele din control, historian/MES/MOM, condition monitoring și sistemele de mentenanță ar putea actualiza reprezentări digitale adecvate unor cazuri de utilizare definite. Nici achiziția operațională, nici sincronizarea cu un Digital Twin nu au fost demonstrate pentru conceptul SAP. Eventuale predicții de defectare vor necesita validarea orizontului și incertitudinii; KPI-urile vor avea definiții și ferestre de măsurare stabile.

Faza 5. EVOLUȚIE: ECR/ECO, obsolescence management, software updates și schimbările fizice sunt gestionate prin configuration management. Durata de exploatare poate fi lungă, dar nu se fixează universal la 15–25 ani. Orice modificare relevantă trebuie să mențină legătura dintre configurația fizică, software, documentație și evaluările safety/conformity.

Faza 6. EOL: demontarea, reutilizarea, reciclarea și transferul informațiilor de lifecycle se documentează în funcție de legislația și categoria produsului. Un DPP se utilizează numai dacă produsul intră în domeniul cerințelor aplicabile; Digital Thread poate păstra oricum datele necesare pentru circularitate și lessons learned.

Beneficiile unui Digital Thread implementat ar putea fi cuantificate prin timpul de engineering, defecte de configurare, timpul de impact analysis, reutilizarea variantelor, diagnostic și calitatea handoverului. În cazul SAP, aceasta este o propunere de evaluare: nu există încă date de exploatare care să permită atribuirea unei reduceri măsurate de rework, a unui ROI sau a unui procent universal de eficiență.

Pentru subsistemul mecanic, firul digital poate conecta requirements → CAD/CAE → BOM/desene → date de asamblare și FAT → configurație as-built → condition monitoring → ECR/ECO. AAS poate ajuta la identitatea componentelor și la asocierea documentelor/datelor, dar nu este obligatoriu ca fiecare rulment sau șurub să aibă propriul AAS. Modelele de degradare se alimentează din date validate și pot utiliza Weibull/B10 sau alte metode doar în domeniul lor de aplicare.

13.9 Concepte cheie și întrebări de reflecție

13.9.1 Recapitulare: conceptele de bază

- Industrie 4.0 a fost conturată în 2011–2013 și a evoluat într-un ecosistem de standarde și arhitecturi pentru interoperabilitate, active digitale și integrarea IT/OT. În 2026, proiectantul trebuie să combine modele, date, identitate, semantică și cybersecurity, nu doar conectivitate.
- Digital Shadow, Digital Twin și Digital Thread sunt concepte complementare. Taxonomia Shadow/Twin bazată pe direcția fluxului de date provine din literatura de manufacturing; Digital Thread descrie continuitatea pe lifecycle și este tratat explicit de ISO 23247-5:2026. Nu există procente universale de adopție asociate acestor termeni.
- Scara 0–4 din capitol este un cadru pedagogic de capabilitate digitală: Offline/local → Monitorizare conectată → Digital Shadow → Digital Twin → Digital Thread. Ea nu este un model oficial de maturitate al Plattform Industrie 4.0 sau WEF și nu atribuie poziții procentuale României fără date verificabile.
- AAS = reprezentare digitală standardizată a unui activ. IEC 63278-1:2023 definește structura AAS; IDTA publică metamodel, API și numeroase Submodel Templates. Nu există șase submodele universale obligatorii pentru orice echipament.

- RAMI 4.0 = model de referință tridimensional Layers × Hierarchy Levels × Life Cycle, consacrat prin DIN SPEC 91345. IEC PAS 63088:2017 a fost retrasă în 2024; modelul RAMI 4.0 continuă să fie utilizat în ecosistemul Plattform Industrie 4.0.
- Catena-X și Manufacturing-X sunt ecosisteme/inițiative pentru schimb de date interoperabil și suveran. ESPR introduce cadrul DPP, cu cerințe stabilite pe grupe de produse; separat, Battery Passport se aplică de la 18 februarie 2027 bateriilor LMT, bateriilor industriale cu capacitate >2 kWh și bateriilor pentru vehicule electrice prevăzute de Regulamentul (UE) 2023/1542.
- OPC UA = seria IEC 62541 pentru schimb de informații independent de platformă, cu information models, client-server și PubSub. IEC 62264/ISA-95 rămâne modelul funcțional pentru enterprise-control integration; OPC UA poate conecta niveluri, dar nu «anulează» arhitectura și nu garantează timpi universali de integrare.
- Companion Specifications = information models OPC UA pentru domenii specifice. Exemple corecte: OPC UA for PackML (OPC 30050), EUROMAP 77/83, OPC UA for Robotics (OPC 40010-1) și OPC UA for Machinery (OPC 40001-1).
- MBSE = abordare model-based pentru requirements, architecture, behaviour, analysis și verification, cu trasabilitate și configuration management. Documentele pot fi generate sau derivate din modele, dar gradul de automatizare depinde de toolchain.
- SysML 1.7 (iunie 2024) rămâne relevant pentru proiectele legacy și pentru notația clasică; SysML 2.0, versiune formală din septembrie 2025, introduce o semantică reproiectată, notații textuale/grafice complementare și API-uri standardizate. Figura celor «9 diagrame» descrie SysML v1.x, nu întreaga paradigmă SysML v2.
- Platformele Digital Twin/IIoT se aleg după use case și ecosistem: suite integrate engineering–PLM, platforme lifecycle/MOM, arhitecturi IIoT/service și stack-uri cloud/edge modulare. Open source reduce licențierea, dar nu elimină costurile de integrare, operare și security.
- Cazurile industriale trebuie citite contextual: Siemens Amberg publică o rată de calitate foarte ridicată, BMW Debrecen este un caz public de fabric planning complet virtual, liniile multi-machine arată valoarea semanticii comune, iar ctrlX ilustrează controlul Linux/app-based. KPI-urile nu sunt benchmark-uri universale.
- Digital Thread pe SAP conectează Design → Dezvoltare → Validare → Operare → Evoluție → EOL prin identificatori, versionare și relații trasabile. Beneficiul se evaluează prin reutilizare, impact analysis și reducerea rework-ului, nu printr-un procent fix.

13.9.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării și discuției în echipă. Răspunsurile sintetice apar după fiecare întrebare; pentru exersarea independentă, se recomandă parcurgerea întâi a întrebării fără consultarea răspunsului.

Q1. Explicați diferența dintre Digital Shadow și Digital Twin. Dați câte un exemplu pe stația SAP. Digital Shadow: datele din SAP actualizează automat un dashboard/historian și un model de stare, fără ca modelul să trimită automat comenzi. Digital Twin: modelul sincronizat este utilizat pentru diagnostic, predicție sau optimizare și poate, dacă arhitectura o permite, propune ori transmite setpoint-uri printr-o interfață controlată. Orice comandă automată trebuie validată, limitată de safety/process constraints și securizată; bidirecționalitatea nu echivalează cu autonomie nelimitată.

Q2. Ce submodele AAS ați selecta pentru stația SAP?
Nu există «cele șase submodele standard obligatorii». O selecție realistă poate include: Digital Nameplate pentru identificare; Generic Frame for Technical Data; Handover Documentation pentru manuale/desene/certificate; submodele pentru time-series/operațional data unde sunt necesare; Maintenance Instructions/Predictive Maintenance; Hierarchical Structures/BOM și, dacă use case-ul o cere, Carbon Footprint sau Simulation Models. Fiecare se alege din catalogul IDTA și se versionează conform proiectului.
Q3. Pentru integrarea PLC–MES/MOM, ce date pot fi publicate prin OPC UA?
Se selectează un information model adecvat: PackML/OPC 30050 pentru un use case compatibil, OPC UA for Machinery pentru building blocks generale sau un model specific domeniului. Datele pot include stări, contoare, job/recipe, alarme, KPI și identificatori de produs. MES/MOM consumă aceste informații numai după definirea namespace-urilor, semanticii, quality/timestamp, security și ownership-ului. Durata integrării se estimează din complexitatea mapping-ului, infrastructură și cerințele de validare.
Q4. De ce este utilă planificarea virtuală a unei fabrici înainte de construcție?
Pentru verificarea layout-ului și coliziunilor, evaluarea fluxurilor și logisticii, ergonomiei și accesibilității, colaborarea între discipline, pregătirea programelor/traiectoriilor și instruire. Beneficiile se cuantifică prin change orders evitate, lead time, rework și ramp-up. BMW Group raportează că Virtual Factory este extinsă la peste 30 de situri și proiectează, pentru propriile aplicații, reduceri ale costurilor de production planning de până la 30 %; valoarea este specifică acestui caz și nu devine benchmark universal. Simularea nu înlocuiește validarea safety și SAT pe echipamentul real.
Q5. Cum ar arăta un Digital Thread complet pentru stația SAP?
DESIGN: requirements + CAD/CAE + BOM, versionate; DEZVOLTARE: ECAD, PLC/HMI, safety engineering și mapping de interfețe; VALIDARE: Virtual Commissioning, FAT/SAT și dovezi de conformitate legate de configurația as-built; OPERARE: OPC UA/MES/MOM, historian și condition monitoring; EVOLUȚIE: ECR/ECO, software updates și obsolescence management; EOL: dezafectare, circularitate și lessons learned. Firul se menține prin identificatori, configuration management și relații trasabile. AAS, SysML, PLM, AutomationML și OPC UA pot susține diferite segmente, dar niciun instrument nu este obligatoriu în toate fazele.

13.10 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 13.1. Volumul datelor de sincronizare pentru un Digital Twin

Enunț. Un model de proces al stației SAP este sincronizat cu 50 de semnale eșantionate la 100 Hz. Fiecare valoare ocupă 4 octeți, iar marca de timp 8 octeți. Estimați debitul de date și volumul pe oră, fără și cu o compresie prin bandă moartă care reduce volumul de 10 ori.

Răspuns. Debitul este $50 \cdot 100 \cdot (4 + 8) = 60\,000$ octeți/s = 60 kB/s, adică aproximativ 216 MB/h. Cu bandă moartă, volumul scade la circa 21,6 MB/h. Decizia de arhitectură privește ce semnale au nevoie

de 100 Hz (de exemplu forța în faza de presare) și ce semnale pot fi transmise doar la schimbare; un Digital Twin util nu copiază toate datele, ci pe cele necesare cazului de utilizare.

Problema 13.2. Pasul de simulare pentru Virtual Commissioning

Enunț. În Virtual Commissioning, PLC-ul real rulează un task de 2 ms, iar modelul trebuie să reproducă momentul atingerii capetelor de cursă ale unui cilindru cu cursa parcursă în 0,3 s, cu o eroare de cel mult 1 ms. Propuneți pasul maxim al modelului și justificați.

Răspuns. Pasul modelului trebuie să fie cel mult 1 ms, impus de rezoluția temporală cerută pentru evenimente; este totodată jumătate din perioada task-ului PLC, astfel încât fiecare ciclu PLC vede o stare actualizată a modelului. Un pas de 10 ms ar decala evenimentele cu până la 10 ms și ar ascunde erori de secvență. Verificarea se face comparând, pentru aceeași secvență, momentele evenimentelor din model cu cele măsurate pe mașina reală.

Problema 13.3. Asocierea datelor stației SAP la submodelele AAS

Enunț. Asociați următoarele date submodelelor AAS din Exemplul rezolvat 13.1: numărul de serie, forța maximă de presare nominală, manualul de utilizare, curba forță–cursă a ansamblului nr. 1 024, anul fabricației, declarația UE de conformitate, cursa axei Z.

Răspuns. Digital Nameplate: numărul de serie și anul fabricației. Date tehnice: forța maximă de presare nominală și cursa axei Z. Handover Documentation: manualul de utilizare și declarația UE de conformitate. Submodelul de date de proces: curba forță–cursă a ansamblului nr. 1 024, legată de identificatorul piesei. Primele trei categorii sunt statice, provin din documentele proiectului și se versionează; ultima este dinamică și provine din controler.

14 Tendințe emergente în proiectarea echipamentelor de fabricație

Cobot · RMS · AMR · AI Act · Cybersecurity · ESPR · TSN/5G

Despre acest capitol

Capitolele 1–13 au construit nucleul disciplinei: proiectarea sistematică, subsistemele funcționale, controlul, safety, documentația tehnică, fiabilitatea, integrarea și Digital Twin. Capitolul 14 nu înlocuiește acest nucleu, ci îl extinde spre teme care influențează deja specificarea, integrarea și exploatarea echipamentelor: robotică colaborativă, sisteme reconfigurabile, logistică autonomă, AI, cybersecurity, sustenabilitate/DPP și rețele industriale deterministe.

Componenta de reglementare trebuie însă tratată diferențiat. AI Act se aplică etapizat și a fost modificat în iulie 2026 prin Regulamentul (UE) 2026/1744; obligațiile pentru anumite sisteme high-risk au termene distincte în 2027 și 2028. Cyber Resilience Act are aplicare generală din 11 decembrie 2027, cu obligațiile de raportare ale producătorilor aplicabile din 11 septembrie 2026. NIS2 vizează organizațiile din categoriile și pragurile definite de directivă și de transpunerea națională. ESPR este un regulament-cadru, iar cerințele concrete de ecodesign și DPP se stabilesc prin acte delegate pentru grupe de produse. Prin urmare, aceste instrumente nu trebuie prezentate ca un set unic de obligații CE deja identice pentru orice echipament în 2026.

Capitolul structurează șapte direcții emergente și le leagă de deciziile proiectantului: ce trebuie verificat la nivel de safety, arhitectură, interoperabilitate, documentație, cybersecurity și lifecycle. Secțiunea finală reia stația SAP ca scenariu didactic integrator. Capitolul este astfel o hartă de orientare pentru proiecte 2026–2030, nu o listă de tehnologii care trebuie adoptate în mod universal.

Standarde și referințe normative aplicabile

ISO 10218-1:2025 și ISO 10218-2:2025, cerințe de safety pentru roboți industriali, aplicații robotizate și celule.

ISO/TS 15066:2016, specificație tehnică pentru operații colaborative, inclusiv ghidaj biomecanic pentru PFL; rămâne publicată, în corelare cu seria ISO 10218:2025.

ISO 13855:2024, poziționarea și dimensionarea mijloacelor de protecție în raport cu apropierea corpului uman.

ISO 3691-4:2023, cerințe de safety și verificare pentru vehicule industriale fără conducător și sistemele lor, incluzând AGV/AMR.

Regulamentul (UE) 2024/1689 (AI Act), în forma consolidată după Regulamentul (UE) 2026/1744: clasificare și obligații AI aplicabile etapizat.

ISO/IEC TR 5469:2024, Artificial intelligence, Funcțional safety and AI systems; reper tehnic pentru relația dintre AI și safety.

IEC 62443-3-2:2020, IEC 62443-3-3:2013, IEC 62443-4-1:2018 și IEC 62443-4-2:2019, risk assessment, zones/conduits și cerințe de securitate IACS.

Regulamentul (UE) 2024/2847: Cyber Resilience Act; aplicare generală din 11 decembrie 2027, cu Art. 14 aplicabil din 11 septembrie 2026.

Directiva (UE) 2022/2555: NIS2; cerințe de management al riscurilor și raportare pentru entități aflate în domeniul de aplicare.

Regulamentul (UE) 2024/1781: ESPR și Working Plan 2025–2030; cerințele DPP sunt definite prin acte specifice produselor. Regulamentul (UE) 2023/1542 introduce Battery Passport de la 18 februarie 2027 pentru categoriile de baterii prevăzute.

IEEE 802.1 TSN (inclusiv Qbv, Qbu/802.3br și 802.1CB) și 3GPP Release 16+: mecanisme pentru comunicații deterministe/low-latency, cu performanțe dependente de profil și implementare.

Obiective de învățare

La parcurgerea integrală a acestui capitol, cititorul va fi capabil:

- să situeze direcțiile emergente în continuitatea metodologiei din Capitolele 1–13;
- să analizeze implicațiile de proiectare ale roboticii colaborative și ale logisticii autonome (AMR);
- să compare paradigmele de fabricație DMS, FMS și RMS;
- să identifice obligațiile introduse de AI Act, de seria IEC 62443 și Cyber Resilience Act și de Regulamentul ESPR pentru echipamentele de fabricație;
- să evalueze rolul TSN și al 5G industrial în convergența IT/OT.

Cunoștințe prealabile

Capitolul presupune parcurgerea Capitolelor 1–13, în special a capitolelor despre siguranța funcțională (9), documentația tehnică (10) și Digital Twin (13), pe care direcțiile emergente le extind.

Glosar de termeni și acronime

Termen / acronim	Definiție
AAS	Asset Administration Shell: reprezentare digitală standardizată a unui activ în ecosistemul Industrie 4.0 (IEC 63278 / specificațiile IDTA).
AGV	Automated Guided Vehicle, vehicul ghidat automat, de regulă pe trasee/infrastructură prestabilite.
AI	Artificial Intelligence, inteligență artificială.

Termen / acronim	Definiție
AIA	AI Act, Regulamentul (UE) 2024/1689, în forma consolidată aplicabilă.
AMR	Autonomous Mobile Robot, robot mobil autonom; poate utiliza SLAM și alte metode de localizare/navigație.
CBSF	Collision body / force-pressure measurement device: dispozitiv pentru măsurarea forței și presiunii de contact în validarea aplicațiilor PFL.
CRA	Cyber Resilience Act, Regulamentul (UE) 2024/2847.
DMS	Dedicated Manufacturing System, sistem de fabricație dedicat.
DPP	Digital Product Passport, pașaport digital al produsului; setul de date și drepturile de acces sunt stabilite de legislația aplicabilă categoriei de produs.
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation, Regulamentul (UE) 2024/1781.
FMS	Flexible Manufacturing System, sistem de fabricație flexibil.
HG	Hand Guiding, ghidare manuală în cadrul unei operații colaborative, cu funcții de safety adecvate.
IDS	Intrusion Detection System, sistem de detecție a intruziunilor.
LiDAR	Light Detection and Ranging: tehnologie de măsurare a distanței cu lumină laser.
MEC	Multi-access Edge Computing: resurse de calcul plasate aproape de utilizator/echipament în arhitectura de rețea.
MFA	Multi-Factor Authentication, autentificare multifactor.
NIS2	Network and Information Security Directive 2, Directiva (UE) 2022/2555.
PFL	Power and Force Limiting: metodă de operare colaborativă bazată pe limitarea puterii/forței și validarea contactelor relevante.
PROFIsafe	Profil de comunicație pentru funcțional safety peste PROFINET/PROFIBUS; nu înlocuiește mecanismele de cybersecurity.
RAN	Radio Access Network, rețea de acces radio.
RMS	Reconfigurable Manufacturing System, sistem de fabricație reconfigurabil.
SBOM	Software Bill of Materials: inventar structurat al componentelor software și al relațiilor/dependențelor relevante.
SL	Security Level: concept IEC 62443; nivelurile target/capability se stabilesc pe baza riscului pentru zone și conduits, nu printr-o corespondență universală cu nivelurile de automatizare.
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping, localizare și cartografiere simultană.
SMS	Safety-rated monitored stop / oprire monitorizată de safety: metodă de colaborare în care mișcarea periculoasă este oprită în condițiile definite.
SSM	Speed and Separation Monitoring, monitorizarea vitezei și separării pentru menținerea condițiilor de safety.

Termen / acronim	Definiție
TSN	Time-Sensitive Networking: familie de mecanisme IEEE 802.1 pentru comunicații Ethernet cu proprietăți temporale controlate.
UPF	User Plane Function, funcție a planului de utilizator în 5G Core.
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication: categorie 5G pentru cerințe stricte de latență și fiabilitate; valorile efective depind de configurația rețelei și de serviciu.

Harta capitolului

Parcursul capitolului: §14.1 Introducere, direcții emergente și continuitate metodologică; §14.2 Robotica colaborativă, cobot și ISO 10218 / ISO/TS 15066; §14.3 Paradigme de fabricație, DMS, FMS, RMS; §14.4 Logistică autonomă, AMR și ISO 3691-4; §14.5 Inteligența artificială și safety, AI Act (UE) 2024/1689; §14.6 Cybersecurity industrială, IEC 62443, CRA și NIS2; §14.7 Sustenabilitate și Digital Product Passport, ESPR; §14.8 TSN și 5G industrial, convergență IT/OT; §14.9 Sinteză V-Model integrată pe SAP; §14.10 Concepte cheie și întrebări de reflecție.

14.1 Introducere: direcții emergente și continuitate metodologică

Proiectarea echipamentelor de fabricație se sprijină pe un nucleu metodologic relativ stabil: definirea cerințelor, arhitectura de sistem, evaluarea riscului, proiectarea subsistemelor, verificarea și validarea (Figura 14.1). Standardele, instrumentele și arhitecturile concrete evoluează însă continuu. De aceea, stabilitatea disciplinei trebuie înțeleasă ca stabilitate a principiilor de engineering, nu ca neschimbare a ediților de standard, a tehnologiilor sau a obligațiilor legale.

În jurul acestui nucleu apar cerințe noi generate atât de tehnologie, cât și de reglementare. Robotica colaborativă permite operații fără separare fizică permanentă numai atunci când evaluarea riscului și funcțiile de safety justifică această arhitectură. AI Act, CRA, NIS2 și ESPR introduc obligații etapizate și dependente de rol, produs și sector; ele nu se aplică uniform tuturor echipamentelor în aceeași dată. Tendințele emergente extind, prin urmare, V-Model-ul și artefactele de proiectare cu noi cerințe de interoperabilitate, cybersecurity, lifecycle data și validare.

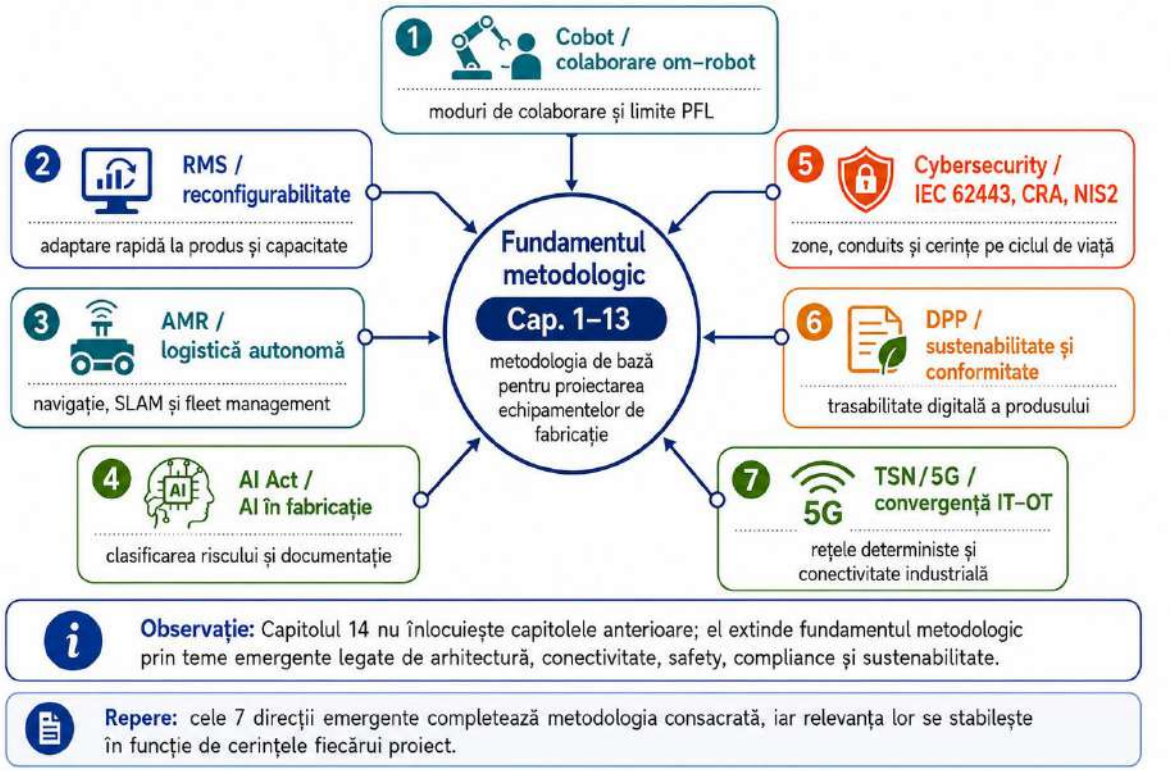


Figura 14.1. Poziționarea celor șapte direcții emergente în raport cu fundamentul metodologic dezvoltat în Capitolele 1–13. Aplicabilitatea fiecărei direcții depinde de cerințele și arhitectura proiectului.

Capitolul structurează șapte direcții. Trei secțiuni au o componentă regulatorie dominantă (§14.5 AI Act, §14.6 Cybersecurity (CRA + NIS2) și §14.7 ESPR + DPP) iar patru secțiuni tratează tehnologii/arhitecturi în evoluție: §14.2 robotica colaborativă, §14.3 RMS, §14.4 AMR și §14.8 TSN/5G. Sinteza §14.9 leagă conceptele capitolelor anterioare prin scenariul SAP, iar §14.10 propune o recapitulare și întrebări de reflecție.

În practică · De ce aceste șapte direcții și nu altele

Selecția nu este exhaustivă. Additive manufacturing, AR/MR, edge AI, semantic data spaces sau noi materiale pot fi la fel de relevante în anumite sectoare. Criteriul folosit aici este impactul direct asupra arhitecturii și responsabilităților proiectantului de echipamente, combinat cu o maturitate suficientă pentru proiecte 2026–2030.

Cele șapte direcții sunt tratate ca probleme de proiectare, nu ca obligații uniforme de achiziție: cobot, validarea interacțiunii și a aplicației; RMS, modularitate și interfețe; AMR, safety și docking/handshake; AI, clasificare juridică și arhitecturi safety-aware; cybersecurity, IEC 62443, CRA și cerințele clientului NIS2; ESPR/DPP, pregătirea datelor de lifecycle în funcție de actele aplicabile; TSN/5G, opțiuni de comunicație atunci când use case-ul justifică cerințe deterministe sau mobilitate.

14.2 Robotica colaborativă: cobot și ISO 10218 / ISO/TS 15066

Robotica industrială poate utiliza separare fizică, protective devices sau combinații de măsuri, în funcție de evaluarea riscului. Seria ISO 10218:2025 tratează separat robotul industrial (Part 1) și aplicațiile/celulele robotizate (Part 2), iar ISO 13855:2024 oferă cerințe pentru poziționarea și dimensionarea anumitor safeguards. Alegerea unei celule clasice cu separare sau a unei operații colaborative nu se

face după eticheta robotului, ci după task, viteze, energii, tool/workpiece, accesul persoanelor și funcțiile de safety disponibile [12], [149], [154].

Operațiile colaborative permit proiectarea unor task-uri în care operatorul și sistemul robotizat împart spațiul sau interacționează controlat. ISO 10218-1:2025 și ISO 10218-2:2025 sunt edițiile curente ale standardelor de bază; versiunile din 2011 sunt retrase. ISO/TS 15066:2016 rămâne publicată și furnizează ghidaj suplimentar pentru operații colaborative, inclusiv contacte PFL. Conținut relevant din ISO/TS 15066 a fost preluat, unde a fost adecvat, în revizia ISO 10218-2:2025, fără ca cele două părți ISO 10218 să fi fost „consolidate” într-un singur standard [12], [13], [154].

14.2.1 Patru metode consacrate de operare colaborativă

În practica ISO 10218/ISO/TS 15066 sunt utilizate patru metode consacrate: safety-rated monitored stop, hand guiding, speed and separation monitoring și power and force limiting (Figura 14.2). Ele nu reprezintă trepte de „siguranță” și pot fi combinate în aceeași aplicație. Selectarea și combinarea lor rezultă din risk assessment și din modul real în care operatorul, robotul, scula și piesa interacționează.

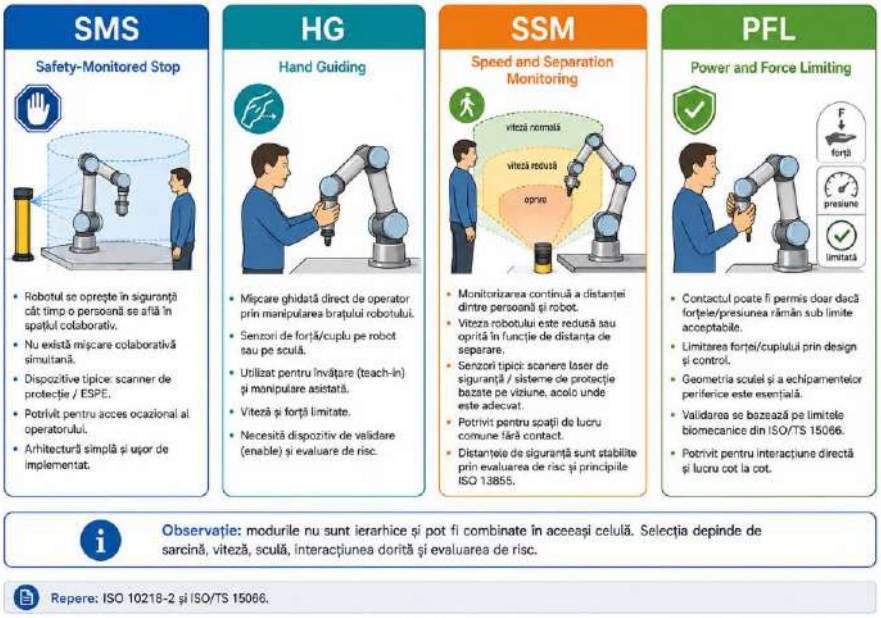


Figura 14.2. Patru metode consacrate de operare colaborativă: SMS, HG, SSM și PFL. Figura este o sinteză didactică; nivelul de risc și măsurile necesare se stabilesc la nivelul aplicației, nu prin alegerea unei etichete de mod.

Safety-rated monitored stop (SMS) este potrivit atunci când mișcarea periculoasă trebuie oprită cât timp persoana se află în spațiul colaborativ, iar reluarea funcționării trebuie să respecte condițiile de restart prevăzute de arhitectura de safety. Detectarea accesului poate utiliza ESPE, scanner sau alte protective devices adecvate. Nu orice robot industrial dobândește această funcție prin simpla adăugare a unui scanner: robotul, controlerul, dispozitivul de protecție și logica de integrare trebuie să suporte și să valideze funcțiile safety necesare.

Hand Guiding (HG) permite ghidarea manuală a mișcării printr-un dispozitiv de ghidare și funcții de safety corespunzătoare. Implementarea poate utiliza măsurarea forței/cuplului sau alte soluții ale producătorului; limitele de viteză, forță și modul de activare sunt specifice sistemului și evaluării de risc. HG este utilizat frecvent la teach-in, manipulare asistată și poziționare fină.

Speed and Separation Monitoring (SSM) menține o separare protectivă între persoană și pericolele sistemului robotizat prin monitorizarea poziției și adaptarea stării/vitezei sistemului. Sensing-ul poate utiliza scanere, camere safety-rated sau alte tehnologii adecvate. Protective separation distance și răspunsul sistemului se determină conform cerințelor aplicației și standardelor aplicabile, inclusiv ISO 10218-2:2025 și, unde este relevant, ISO 13855:2024; nu există o singură lege de interpolare a vitezei valabilă pentru orice celulă [12], [149].

Power and Force Limiting (PFL) este utilizat atunci când contactul previzibil dintre sistem și persoană poate fi limitat la valori acceptabile. Conformitatea depinde de întregul sistem: robot, end-effector, piesă, viteză, poziție, zone de trapping și natura contactului. Un robot PFL nu înseamnă automat „fără gard” și nici „contact fără risc”; dacă unele pericole nu pot fi reduse suficient prin PFL, se adaugă SSM, safeguards sau alte măsuri.

14.2.2 Contacte PFL și limite biomecanice

ISO/TS 15066:2016 oferă date și ghidaj biomecanic pentru evaluarea contactelor tranzitorii și cvasi-statice în aplicații PFL. Valorile depind de zona corporală și de tipul contactului și trebuie utilizate împreună cu evaluarea riscului și cu cerințele ISO 10218:2025 (Figura 14.3). Ele nu trebuie prezentate ca o garanție universală că orice contact sub o singură valoare numerică este lipsit de leziuni [13].

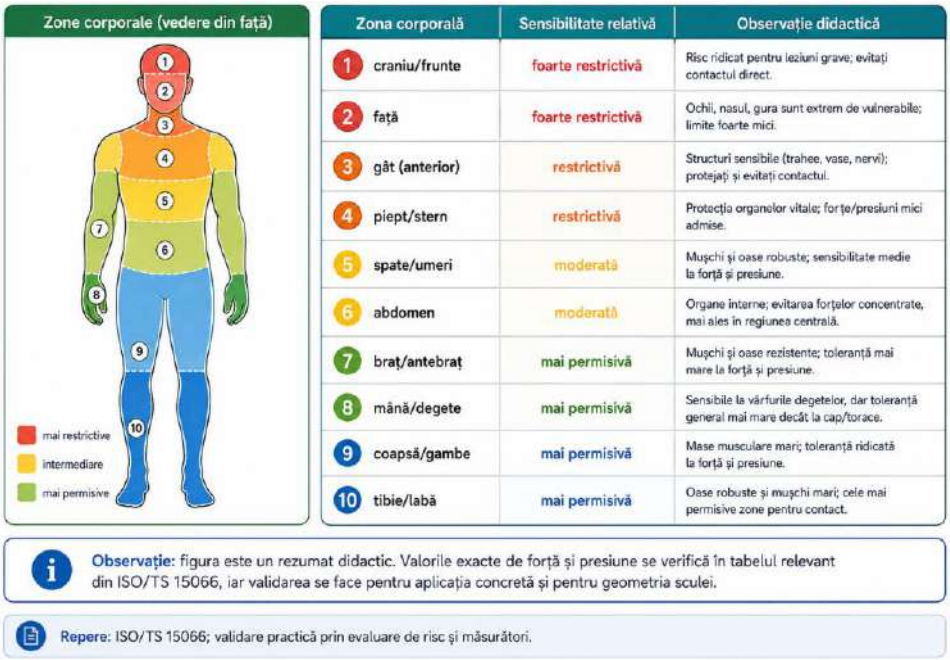


Figura 14.3. Sinteză didactică a zonelor corporale relevante pentru validarea PFL. Culorile și calificativele din figură sunt numai orientative și nu reprezintă o ierarhie normativă de toleranță; valorile exacte de forță și presiune, tipul de contact și procedura de măsurare se verifică în ISO/TS 15066 și în analiza de risc a aplicației.

Aplicarea practică începe prin identificarea contactelor previzibile și a zonelor corporale posibil expuse, inclusiv contactul cu tool-ul și piesa. Apoi se evaluează energia, viteza, masa efectivă, rigiditatea, geometria și posibilitatea de trapping/crushing pentru scenariile relevante. Parametrii robotului și traiectoriile se ajustează astfel încât contactele validate să rămână în domeniul acceptat al aplicației. Calculele sunt utile pentru pre-dimensionare, dar nu înlocuiesc testarea configurației reale atunci când standardul și evaluarea riscului o cer.

Validarea PFL poate include măsurători de forță și presiune cu dispozitive de test adecvate, în puncte și configurații reprezentative ale scenariilor de contact. Rezultatele se documentează în validarea safety. Responsabilitatea demonstrației de conformitate aparține operatorului economic care își asumă rolul de producător/integrator conform legislației aplicabile; implicarea unui laborator sau organism terț poate fi utilă ori cerută de procedura de conformitate, dar nu este o regulă universală pentru orice celulă cobot [12], [13], [28].

În practică · Atenție particulară: scula și piesa manipulată

Într-o aplicație PFL, evaluarea contactului nu se oprește la corpul robotului. End-effectorul, piesa manipulată, punctele de strivire și muchiile accesibile pot domina riscul prin geometrie, rigiditate sau concentrare locală a presiunii.

Proiectarea trebuie să reducă muchiile agresive și proeminențele acolo unde este posibil, să controleze zonele de trapping/crushing și să valideze contactele relevante în configurația reală a aplicației. Dacă un contact nu poate fi făcut acceptabil prin PFL, sunt necesare alte măsuri de reducere a riscului, inclusiv separare, SSM sau protecții locale.

Responsabilitatea pentru integrarea sigură aparține producătorului/integratorului aplicației în limitele rolurilor juridice asumate; faptul că robotul este comercializat drept „cobot” nu certifică automat întreaga celulă.

14.2.3 Implementare practică și demonstrarea conformității

Implementarea unei aplicații colaborative trebuie să înceapă cu definirea interacțiunii om–robot și cu un risk assessment preliminar încă din concept/ofertare. Această analiză verifică dacă task-ul poate fi realizat în PFL, dacă este necesară separarea dinamică prin SSM ori dacă anumite faze trebuie protejate prin safeguards convenționale. O verificare timpurie reduce riscul de redesign tardiv al sculei, traiectoriei sau layout-ului.

O celulă colaborativă poate include robot cu funcții safety integrate, end-effector proiectat pentru interacțiunea prevăzută, protective devices pentru SSM sau acces, safety controller/F-CPU, comunicații safety și mijloace clare de informare a operatorului. Arhitectura exactă este determinată de task și de risk assessment. Costul nu poate fi exprimat prin intervale universale: payload-ul, reach-ul, tool-ul, sensing-ul, validarea și integrarea în linie pot schimba substanțial bugetul.

Înainte de punerea în funcțiune se verifică implementarea măsurilor de reducere a riscului și se validează funcțiile de safety, inclusiv scenariile de contact PFL dacă sunt relevante. Modificarea tool-ului, piesei, vitezelor, traiectoriilor sau logicii poate constitui o schimbare relevantă și impune re-evaluare. Distincția importantă este între validarea tehnică a aplicației și o eventuală certificare terță; aceasta din urmă depinde de cadrul legal, procedura de conformitate și cerințele contractuale.

Exemplul rezolvat 14.1. Distanța de separare pentru încărcarea SAP cu un robot colaborativ

Enunț. Se analizează o variantă în care un robot colaborativ încarcă tuburile în dispozitivul SAP, iar operatorul poate intra în zona de lucru. Metoda aleasă este monitorizarea vitezei și a separării (SSM). Să se estimeze distanța minimă de separare de protecție la care robotul trebuie să înceapă oprirea.

Pasul 1. Relația de calcul. Conform ISO/TS 15066, distanța minimă de separare de protecție este:

$$S_p = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \tag{14.1}$$

unde S_h este deplasarea omului în timpul de reacție al sistemului și în timpul de oprire al robotului, S_r, deplasarea robotului în timpul de reacție, S_s, distanța de oprire a robotului, C, distanța de intruziune, iar Z_d și Z_r, incertitudinile de poziție ale omului (date de senzor) și ale robotului.

Pasul 2. Ipoteze (valori didactice). Viteza omului v_h = 1,6 m/s, valoarea de deplasare folosită în ISO 13855; timpul de reacție al sistemului T_r = 0,1 s; timpul de oprire al robotului T_s = 0,3 s; viteza robotului v_r = 0,5 m/s; distanța de oprire S_s = 0,10 m; distanța de intruziune C = 0,20 m; incertitudinile $Z_d + Z_r$ = 0,10 m.

Pasul 3. Calculul.

$$S_h = v_h \cdot (T_r + T_s) = 1{,}6 \cdot 0{,}4 = 0{,}64 \text{ m} \quad (14.2)$$

$$S_r = v_r \cdot T_r = 0{,}5 \cdot 0{,}1 = 0{,}05 \text{ m} \quad (14.3)$$

$$S_p = 0{,}64 + 0{,}05 + 0{,}10 + 0{,}20 + 0{,}10 = 1{,}09 \text{ m} \quad (14.4)$$

Pasul 4. Interpretarea. Distanța de aproximativ 1,1 m este dominată de termenul S_h, adică de timpul total de reacție și de oprire. Reducerea vitezei robotului are efect mic; reducerea timpului de oprire (prin altă configurație de frânare, o masă mai mică în mișcare sau limitarea vitezei în zona comună) are efect mare. Dacă dispunerea celulei nu permite această distanță, se trece la metoda limitării puterii și a forței (PFL), care cere verificarea prin măsurare a forțelor și a presiunilor de contact față de limitele biomecanice din ISO/TS 15066.

Rezultat. Calculul nu înlocuiește evaluarea riscului. Valorile reale de oprire se iau din datele producătorului robotului, măsurate în configurația aplicației, iar soluția se validează în celulă (§14.2).

14.3 Paradigme de fabricație: DMS, FMS, RMS

Organizarea producției poate fi descrisă prin trei paradigme relevante (DMS, FMS și RMS) care urmăresc compromisuri diferite între specializare, flexibilitate, capacitate și adaptabilitate [221]. Aceste paradigme nu formează o succesiune liniară și coexistă în industria contemporană. Pentru proiectant, alegerea arhitecturii dominante influențează direct structura mecanică, electrică, de control și informațională a echipamentului.

Figura 14.4 compară conceptual cele trei paradigme (DMS, FMS și RMS) din perspectiva varietății, volumului, flexibilității și reconfigurabilității.

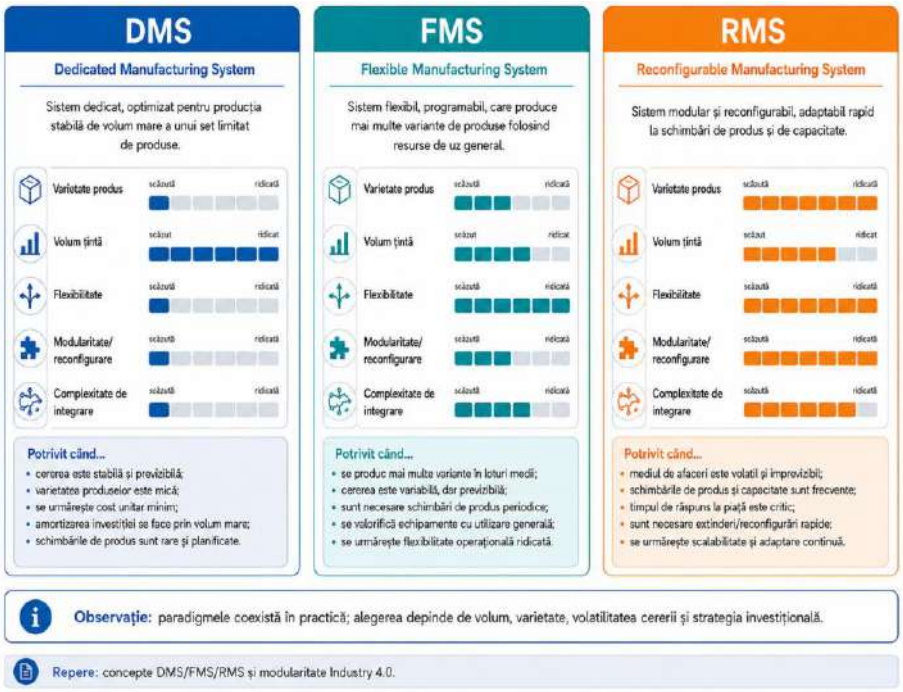


Figura 14.4. Comparație conceptuală între DMS, FMS și RMS. Pozițiile relative sunt orientative și ilustrează diferențe de varietate, volum, flexibilitate și reconfigurabilitate; nu reprezintă praguri normative sau reguli economice universale.

14.3.1 DMS: Dedicated Manufacturing System

DMS (sistem de fabricație dedicat) este o arhitectură orientată spre un produs sau o familie restrânsă de produse, cu resurse specializate și flux de proces stabil. Liniile de transfer și echipamentele dedicate pot atinge productivitate ridicată atunci când cererea și procesul sunt predictibile, însă modificările majore de produs pot necesita schimbări hardware substanțiale. Avantajele economice depind de volum, utilizare, lifecycle și costul schimbării; nu există un prag universal de volum de la care DMS devine automat soluția optimă.

Exemplele DMS includ linii de transfer, procese de mare cadență și echipamente dedicate unei familii restrânse de produse. Avantajul este optimizarea pentru task-ul stabil; dezavantajul este costul schimbării atunci când produsul sau procesul se modifică semnificativ. Pragurile de volum, investiția și costul pe piesă sunt specifice sectorului și business case-ului și nu trebuie transformate în valori universale.

14.3.2 FMS: Flexible Manufacturing System

FMS (Flexible Manufacturing System) combină resurse programabile și sisteme de manipulare/control pentru a produce o familie de piese sau variante cu schimbări predominant software, de program, fixture sau tool. Configurațiile pot varia de la celule flexibile până la sisteme cu mai multe mașini, stocare și transport automat. Gradul real de flexibilitate este limitat de capabilitățile fizice ale resurselor, tooling, metrologie și control, nu doar de numărul programelor disponibile.

FMS este potrivit când varietatea și schimbările de produs justifică resurse versatile și reprogramabile. Comparativ cu un sistem dedicat, poate avea costuri de capital și operaționale diferite și o utilizare mai complexă, dar raportul economic depinde de mixul de produse, utilizare, changeover, disponibilitate și durata de viață. Multiplicatori de cost, intervale ROI sau praguri de volum trebuie tratate numai ca rezultate ale unui business case concret.

14.3.3 RMS: Reconfigurable Manufacturing System

RMS (Reconfigurable Manufacturing System) este asociat cu lucrările lui Yoram Koren [222] și urmărește adaptarea deliberată a capacității și funcționalității printr-o arhitectură modulară. Spre deosebire de flexibilitatea predominant programabilă a unui FMS, RMS pune accent pe reconfigurarea structurii sistemului: adăugarea, eliminarea, schimbarea sau rearanjarea modulelor și capabilităților. Reconfigurabilitatea depinde de interfețe mecanice, electrice, de control, safety și date proiectate explicit pentru schimbare [223].

Tehnologii precum OPC UA, Asset Administration Shell, AutomationML, managementul configurației și platformele de orchestrare pot reduce efortul de integrare și pot descrie capabilități/interfețe ale modulelor. Ele sunt însă facilitatori, nu garanții de „plug-and-produce”: semantică compatibilă, profile de comunicație, safety, cybersecurity, parametrizare și verificarea fizică a interfețelor rămân necesare [5], [116], [195], [217].

În industrie există implementări cu diferite grade de reconfigurabilitate: de la fixtures și module de proces schimbabile până la celule și linii modulare. Este mai riguros să se evalueze timpul și resursele

de reconfigurare, efortul de revalidare, capacitatea de scale-up/down și impactul asupra quality/safety decât să se atribuie RMS-ului un procent fix de cost suplimentar sau un timp universal de reconfigurare.

> **În practică · Convergența FMS și RMS**
>
> Frontiera dintre flexibilitate și reconfigurabilitate este mai utilă ca spectru de capabilități decât ca etichetă rigidă. Un FMS poate include module schimbabile și interfețe standardizate, iar un RMS poate utiliza aceeași infrastructură digitală ca un FMS avansat.
>
> Pentru proiectant contează cerințele măsurabile: ce se schimbă, software, sculă, modul sau layout; câtă intervenție și recalibrare sunt acceptate; ce interfețe mecanice/electrice/date trebuie stabilizate; cum este gestionată configurația. OPC UA, AAS și alte standarde pot sprijini interoperabilitatea, dar nu fac reconfigurarea „plug-and-produce” în mod automat.

Reconfigurarea rapidă este limitată adesea de interfețele fizice și de necesitatea recalibrării: un modul ușor de conectat electric, dar dificil de poziționat, aliniat sau validat, nu oferă o reconfigurare eficientă. De aceea, proiectarea RMS trebuie să trateze simultan docking-ul mecanic, utilities, datele, safety, cybersecurity și configuration management.

Pentru interfețele de fluid, standardul trebuie ales după tehnologie: ISO 6150:2018 se referă la cuplaje rapide cilindrice pentru pneumatică, în timp ce ISO 16028:2023 și ISO 7241:2023 se referă la familii de cuplaje rapide hidraulice. Alegerea concretă depinde de presiune, debit, contaminare, posibilitatea conectării sub presiune și cerințele de interchangeability. Pentru energie și semnale electrice se pot utiliza conectori modulari industriali, iar pentru poziționare sunt utile sisteme de centrare/fixare repetabilă și principii de localizare cinematică. Valorile de repetabilitate și forță trebuie preluate din specificația soluției selectate, nu generalizate [224].

Reperele cinematice, pinii de centrare și sistemele zero-point pot reduce efortul de repoziționare, dar precizia finală trebuie verificată la nivelul funcției echipamentului. Un RMS bine proiectat urmărește ca reconfigurarea să fie previzibilă și verificabilă, însă costul incremental și perioada de recuperare depind de frecvența schimbărilor, valoarea timpului de oprire și reutilizarea modulelor; nu există un procent universal aplicabil.

14.4 Logistică autonomă: AMR și ISO 3691-4

Logistica internă a fabricilor (transportul materialelor între depozit, stații de producție și zone de expediție) poate utiliza operatori, transportoare, AGV-uri și AMR-uri, în combinații adaptate fluxului. AGV-urile pot folosi trasee și repere predefinite, în timp ce AMR-urile extind capabilitatea de localizare și planificare dinamică. Diferența nu trebuie redusă la opoziția „vechi versus nou”: alegerea depinde de predictibilitatea fluxului, layout, safety, cost total, fleet management și integrarea cu stațiile fixe.

AMR-urile extind logistica internă prin navigație flexibilă, de regulă fără ghidaj fizic continuu. SLAM, localizarea pe hartă, infrastructura de referință, fiducialele sau alte tehnici pot fi combinate în funcție de mediu. Avantajul față de un traseu rigid este capacitatea de replanning și adaptare, dar această flexibilitate aduce cerințe suplimentare de safety, fleet management, cybersecurity și interfață cu stațiile fixe.

14.4.1 Diferența AGV–AMR și rolul SLAM

Figura 14.5 compară conceptual vehiculele AGV și AMR și arată rolul etapelor de bază ale SLAM.

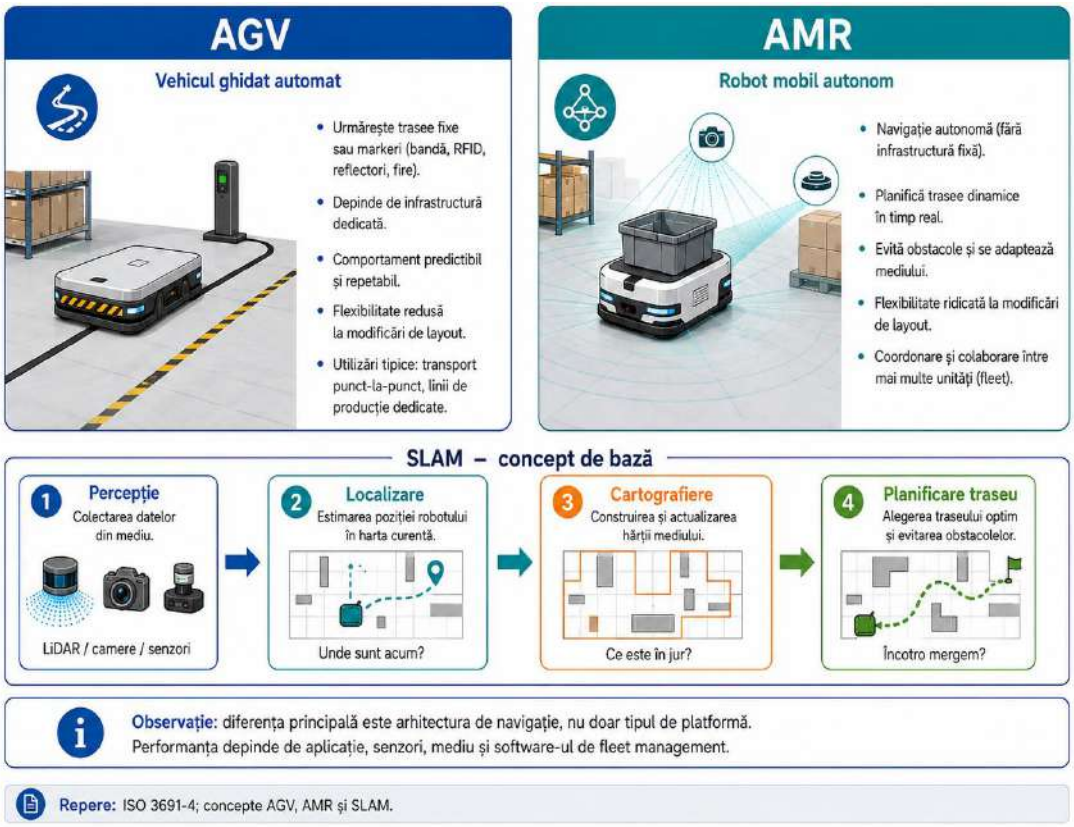


Figura 14.5. Comparație conceptuală AGV–AMR și rolul etapelor de bază ale SLAM. Performanța de navigație depinde de senzori, mediu, algoritmi, infrastructură și software-ul de fleet management.

AGV este o denumire folosită pentru vehicule ghidate automat, care pot urma trasee definite prin bandă magnetică, reflectori, ghidaj optic, marcaje sau alte infrastructuri. Această abordare poate oferi comportament foarte previzibil și este în continuare adecvată multor aplicații. ISO 3691-4:2023 este ediția publicată curentă pentru driverless industrial trucks și include explicit exemple precum AGV și AMR; versiunea 2020 a fost înlocuită. La data auditului editorial (27 septembrie 2026), o ediție nouă era deja în dezvoltare ca ISO/DIS 3691-4, astfel încât proiectele reale trebuie să verifice ediția aplicabilă la momentul specificării și punerii în funcțiune [225].

AMR utilizează localizare și planificare dinamică a traseului, frecvent cu LiDAR, camere și algoritmi SLAM/localization. Acuratețea de navigație nu poate fi rezumată printr-o singură valoare: depinde de senzori, hartă, suprafețe, geometria mediului, încărcare, viteză și algoritm. Pentru operații de docking sau manipulare precisă se utilizează adesea o etapă suplimentară de localizare fină (repere mecanice, fiduciale, senzori sau vision) separată de navigația globală.

14.4.2 Cerințe de safety: ISO 3691-4:2023

ISO 3691-4:2023 specifică cerințe de safety și mijloace de verificare pentru driverless industrial trucks și sistemele lor. Standardul acoperă atât vehiculul, cât și aspecte ale sistemului de operare și trebuie utilizat împreună cu documentația producătorului și cu evaluarea riscului aplicației. Nu este corect să se reducă cerințele standardului la o singură formulă sau la un set generic de senzori [225].

Proiectarea safety trebuie să trateze detectarea persoanelor/obstacolelor în direcțiile relevante, protective fields, viteza, oprirea, stabilitatea încărcăturii, emergency stop, modurile de operare și interacțiunea cu stațiile fixe. Distanța de protecție trebuie să acopere comportamentul real de oprire și incertitudinile relevante. Comunicarea/handshake-ul cu un PLC staționar poate fi necesară pentru proces, dar arhitectura și nivelul safety al acestei interfețe se stabilesc din risk assessment.

Verificarea opririi trebuie să considere condițiile cele mai defavorabile specificate pentru aplicație (viteză, sarcină, suprafață, direcție și timpi de reacție) și să fie confirmată experimental conform procedurilor relevante. Formula S = K × T + C aparține anumitor contexte de poziționare a safeguards și nu trebuie prezentată ca formula universală a ISO 3691-4 pentru toate AMR-urile.

Oferta de AMR-uri industriale acoperă o plajă largă de sarcini, geometrii și strategii de navigație. Selectarea nu trebuie făcută printr-un clasament generic de producători, ci prin payload și centru de masă, viteză, turning envelope, docking, battery/charging strategy, safety functions, fleet management, API-uri, cybersecurity, condiții de mediu și service. Fleet management devine esențial atunci când mai multe vehicule împart resurse și intersecții.

14.4.3 Interfața fizică AMR–stație: de la navigație la docking

Poziționarea necesară pentru navigație nu este în mod automat suficientă pentru transferul precis al unei piese, palete sau pentru preluarea cu un manipulator. Cerința corectă este stabilită de procesul de transfer. De aceea se separă adesea „global navigation” de „fine docking”: AMR-ul ajunge într-o zonă de destinație, apoi o interfață mecanică și/sau senzorială realizează alinierea finală.

Soluțiile de fine docking pot include suprafețe și ghidaje auto-centrante, opritoare și pini de referință, conveioare cu centrare, fiduciale optice, LiDAR/vision local sau măsurare directă a reperului. Alegerea depinde de payload, toleranța de transfer, acces, uzură, contaminare și repetabilitate. Unghiurile, toleranțele și acuratețile trebuie dimensionate și validate pentru soluția concretă; valori precum ±1 mm sau ±0,1 mm nu sunt caracteristici universale ale acestor principii.

Dimensionarea structurii și a dispozitivului de transfer trebuie să considere sarcina, centrul de masă și încărcările dinamice în accelerare, frânare și manevre, conform limitelor și instrucțiunilor producătorului AMR și calculelor structurale ale integratorului. Un factor de siguranță unic nu poate fi prescris pentru toate platformele. În plus, modificarea suprastructurii poate afecta stabilitatea și safety-ul vehiculului și trebuie evaluată împreună cu producătorul/integratorul.

14.5 Inteligența artificială și safety: AI Act (UE) 2024/1689

AI este deja utilizată în echipamente pentru vision-based inspection, predictive maintenance, anomaly detection, optimizarea unor parametri și suport decizional. Din perspectiva proiectării, întrebarea critică nu este dacă o metodă folosește o rețea neuronală, ci ce intended purpose are, ce decizie influențează, ce date și limite are și ce se întâmplă la eroare sau degradare.

AI Act, Regulamentul (UE) 2024/1689, se aplică etapizat și a fost modificat în iulie 2026 prin Regulamentul (UE) 2026/1744. Pentru echipamente, clasificarea high-risk nu rezultă din simplul fapt că există AI într-o mașină. Conform art. 6(1), trebuie analizat dacă AI este safety component (sau produs) acoperit de legislația din Anexa I și dacă produsul relevant este supus unei evaluări de conformitate de către terță parte. Art. 6(1a) exclude din noțiunea de safety component utilizările exclusiv non-safety pentru user

assistance, performance optimisation, service efficiency, automation, convenience sau quality control; art. 6(1b) readuce în categoria safety component sistemele a căror defectare ar pune în pericol sănătatea sau siguranța. Art. 6(1c) precizează suplimentar că o evaluare terță cerută numai pentru riscuri fără legătură cu sănătatea și siguranța, precum anumite riscuri de spectru radio sau interferență electromagnetică, nu satisface prin ea însăși condiția art. 6(1)(b) [159], [162].

14.5.1 Hartă didactică a obligațiilor AI Act

Figura 14.6 propune o hartă didactică a regimurilor stabilite de AI Act.

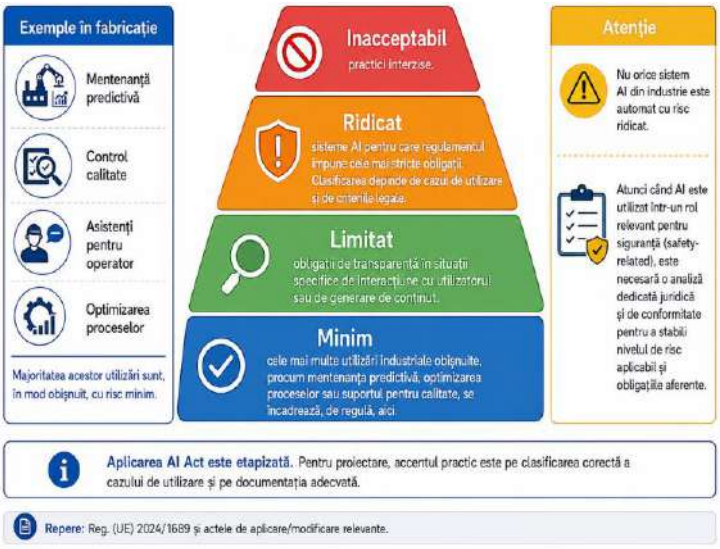


Figura 14.6. Hartă didactică a regimurilor AI Act. „Piramida în patru niveluri” este o simplificare pedagogică: juridic trebuie diferențiate practicile interzise (art. 5), sistemele high-risk (art. 6 și anexele relevante), obligațiile de transparență pentru anumite sisteme (art. 50), precum și celelalte sisteme AI și regulile distincte pentru GPAI.

Practicile interzise sunt definite punctual la art. 5 și nu trebuie tratate ca un simplu „nivel” pe aceeași scară cu high-risk. Pentru proiectarea echipamentelor de fabricație, cele mai multe dintre aceste practici nu sunt use case-uri obișnuite, dar proiectantul trebuie să verifice intended purpose-ul și contextul de utilizare atunci când sunt implicate biometrie, monitorizarea persoanelor sau inferențe despre acestea.

Pentru high-risk există două căi principale. Art. 6(1) privește AI ca safety component/produs în corelare cu legislația de armonizare din Anexa I și cu cerința de third-party conformity assessment; după modificarea din 2026, obligațiile Chapter III Sections 1–3 pentru această categorie se aplică de la 2 august 2028. Art. 6(2) privește use case-urile din Anexa III, pentru care aceleași secțiuni se aplică de la 2 decembrie 2027. Un robot industrial sau un sistem de vision nu este high-risk doar prin denumirea tehnologiei; clasificarea se face pe intended purpose și criteriile legale [159], [162].

Așa-numitul „risc limitat” este o etichetă explicativă folosită frecvent pentru sistemele asupra cărora se aplică anumite obligații de transparență, dar AI Act nu construiește formal o piramidă cu patru niveluri exhaustive. Art. 50 stabilește obligații pentru situații precum interacțiunea directă cu persoane, anumite sisteme de emotion recognition/biometric categorisation și conținut sintetic, în condițiile și la datele prevăzute de regulament.

Pentru multe aplicații industriale non-safety (de exemplu quality inspection, predictive maintenance sau optimizare care nu afectează o funcție de protecție) nu se aplică regimul high-risk doar pentru că se

utilizează AI. Rămân însă relevante alte obligații legale, contractuale, cybersecurity, data governance, calitatea modelului și validarea inginerească. Nu este justificată o afirmație de tip „95 % din AI industrial este risc minim” fără o bază statistică și o definiție de eșantion.

14.5.2 AI și siguranța funcțională: limitele unei corespondențe directe

Standardele de funcțional safety precum ISO 13849-1 și IEC 62061 utilizează modele și indicatori pentru arhitecturi safety-related, inclusiv rate de defect hardware și măsuri împotriva erorilor sistematice. Modelele AI introduc alte surse de eroare (distribuția datelor, acoperirea scenariilor, robustness, drift și specificarea incompletă a mediului) care nu pot fi reduse direct la PFH_D prin simpla raportare a unei acurateți de clasificare.

Un model ML poate avea inferență reproductibilă pentru aceeași implementare și aceleași intrări, dar performanța sa în lumea reală este statistică și dependentă de domeniul de date. O valoare precum „99,3 % accuracy” nu este echivalentă cu probabilitatea de defect periculos a unei funcții safety și nu poate demonstra singură un PL sau SIL. Validarea trebuie să trateze scenariile, limitele operaționale, independența datelor de test și comportamentul în afara distribuției.

Un pattern relevant este utilizarea AI pentru percepție/estimare, cu o funcție safety separată sau cu mecanisme independente care mențin sistemul într-un domeniu sigur atunci când AI eșuează ori iese din condițiile validate. ISO/IEC TR 5469:2024 oferă un cadru pentru relația dintre AI și funcțional safety și discută inclusiv utilizarea funcțiilor non-AI pentru asigurarea siguranței. Acesta este ghidaj tehnic, nu o rețetă universală de certificare. La 27 septembrie 2026, ISO/IEC CD TS 22440-1, -2 și -3 se aflau încă în dezvoltare la nivel de Committee Draft; ele nu trebuie citate ca standarde internaționale publicate [160], [226].

În practică · Pattern-uri pentru AI în vecinătatea funcțiilor safety

În aplicațiile în care AI contribuie la percepție, estimare sau clasificare, un pattern util este separarea dintre funcția AI și o cale de safety cu comportament și limite verificabile. ISO/IEC TR 5469:2024 discută explicit relația dintre AI și funcțional safety, inclusiv utilizarea unor funcții non-AI pentru asigurarea siguranței sistemelor controlate de AI.

Pattern-uri posibile includ: AI pentru detecție + limită/supervizor safety-rated; monitorizarea distribuției și a degradării performanței; fallback într-o stare sigură atunci când încrederea sau condițiile de operare ies din domeniul validat; canale independente/diverse pentru pericole cu severitate ridicată.

Aceste arhitecturi nu transformă automat sistemul într-unul certificat și nu modifică prin ele însele clasificarea juridică AI Act. Clasificarea și evaluarea conformității se fac după intended purpose, rolul AI în safety și legislația aplicabilă.

14.6 Cybersecurity industrială: IEC 62443, CRA și NIS2

Cybersecurity-ul echipamentelor industriale a devenit o cerință de engineering odată cu creșterea conectivității OT/IT și a dependenței de software. Incidente precum Stuxnet și TRITON au demonstrat că atacurile asupra sistemelor industriale pot afecta disponibilitatea procesului și, în anumite arhitecturi, pot interacționa cu funcții safety. Pentru proiectant, consecința este integrarea cybersecurity în lifecycle (de la arhitectură și dezvoltare până la update, vulnerability handling și dezafectare) nu tratarea securității ca un add-on după commissioning.

Pentru proiectant sunt relevante trei niveluri diferite de cerințe. Seria IEC 62443 este un corpus tehnic de cybersecurity pentru IACS, utilizat contractual sau ca reper de engineering. Cyber Resilience Act (Regulamentul (UE) 2024/2847) stabilește cerințe pentru produse cu elemente digitale și are aplicare generală din 11 decembrie 2027, cu obligațiile de raportare ale art. 14 aplicabile din 11 septembrie 2026. NIS2 (Directiva (UE) 2022/2555) stabilește obligații pentru anumite organizații/entități și operează prin transpunerea națională. Cele trei instrumente sunt complementare, dar nu sunt aceeași obligație și nu se aplică tuturor actorilor în același mod [6], [143], [227].

14.6.1 IEC 62443: zones and conduits, definite prin risc

Seria IEC 62443 acoperă politici, procese, risk assessment, cerințe la nivel de sistem și cerințe pentru dezvoltarea/componenta de produs. Pentru arhitectură, IEC 62443-3-2:2020 cere definirea system under consideration, partiționarea în zones and conduits, evaluarea riscului pentru fiecare și stabilirea target security level (SL-T) (Figura 14.7). Numărul de zone și nivelurile țintă nu sunt prescrise printr-o piramidă universală Field–Control–Operations–Enterprise [228].

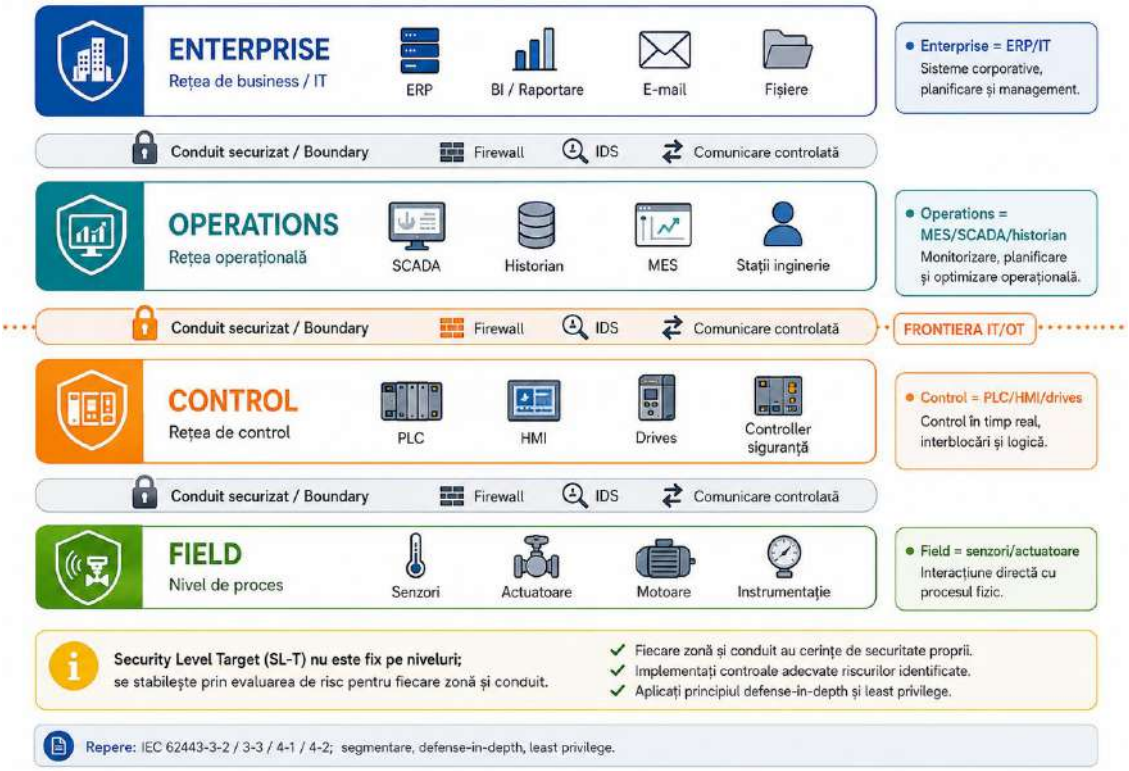


Figura 14.7. Exemplu pedagogic de segmentare IEC 62443 în zone și conduits. Topologia este ilustrativă, iar Security Level Target și controalele se stabilesc prin evaluarea de risc pentru fiecare zonă și conduit.

Într-un exemplu de echipament se pot separa o zonă Field și o zonă Control, dar nivelul SL-T se determină din threat/risk și consecințe, nu din denumirea zonei. Protocoalele de funcțional safety, precum PROFIsafe, rezolvă cerințe de safety și nu trebuie confundate cu autentificarea/criptografia de cybersecurity. Security controls se aleg separat: hardening, identity/access management, segmentation, certificate management, secure update și logging, după caz.

Operations și Enterprise pot constitui alte zone sau pot fi subdivizate mai fin în funcție de asset-uri și trust boundaries. Firewall-ul industrial, jump host-ul, IDS/monitoring, DMZ-ul și data diode sunt pattern-uri posibile, nu cerințe identice pentru fiecare proiect. Canalul OT–IT este adesea critic, dar sensurile permise de trafic și politicile de acces trebuie definite din data flows și use case, nu prin regula generică „push OT→IT, blocaj invers”.

14.6.2 Cyber Resilience Act: cerințe pentru produs

Cyber Resilience Act (Regulamentul (UE) 2024/2847) acoperă, cu excepțiile prevăzute de regulament, produse cu elemente digitale a căror utilizare include o conexiune logică sau fizică directă ori indirectă la un dispozitiv sau rețea (Figura 14.8). Pentru echipamente industriale conectate, implicațiile pot fi semnificative: cybersecurity by design, gestionarea vulnerabilităților pe support period, secure-by-default configuration, security updates și informații adecvate pentru utilizator/integrator [143].

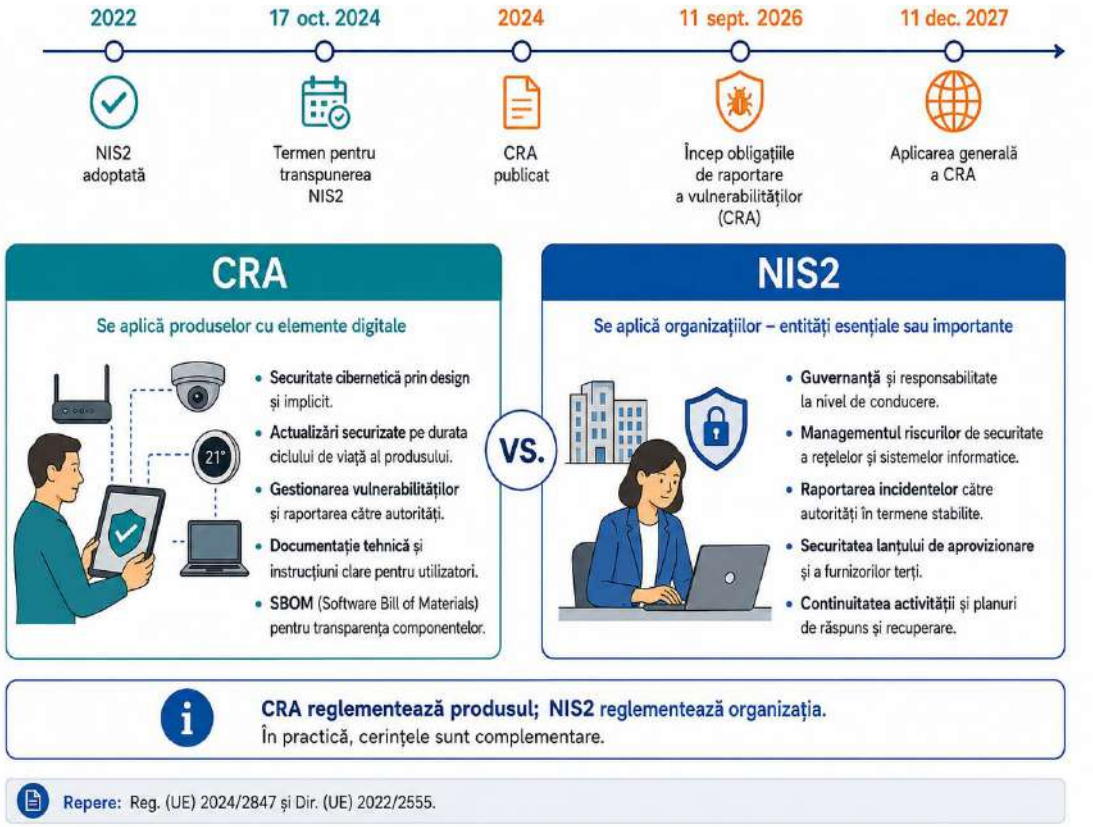


Figura 14.8. CRA și NIS2: diferența dintre cerințele aplicabile produselor cu elemente digitale și cele aplicabile organizațiilor aflate în domeniul NIS2, împreună cu reperele temporale principale ale aplicării.

Pentru un produs industrial aflat în domeniul CRA, proiectarea trebuie să demonstreze cerințele esențiale de cybersecurity relevante: reducerea suprafeței de atac, controlul accesului, protecția confidențialității/integrității unde este necesar, minimizarea datelor, reziliență, logging și actualizare securizată. Documentația tehnică descrie arhitectura, procesele de vulnerability handling, risk assessment-ul cybersecurity, standardele/specificațiile aplicate și testele de conformitate.

CRA cere producătorului să identifice și să documenteze vulnerabilitățile și componentele software, inclusiv printr-un SBOM machine-readable cel puțin pentru dependențele top-level. SBOM-ul face parte

din procesele/documentația producătorului; regulamentul nu impune publicarea sau livrarea sa integrală fiecărui utilizator în toate cazurile. Art. 14, aplicabil din 11 septembrie 2026, introduce raportarea vulnerabilităților exploatate activ și a incidentelor severe. Pentru o vulnerabilitate exploatată activ sunt prevăzute early warning în cel mult 24 h, notificare în cel mult 72 h și raport final cel târziu la 14 zile după disponibilitatea unei măsuri corective sau de atenuare; pentru un incident sever sunt prevăzute early warning în 24 h, notificare în 72 h și raport final în termen de o lună de la notificarea incidentului [143].

14.6.3 NIS2: cerințe pentru organizații

NIS2 se aplică entităților de tipurile enumerate în Annex I și II care îndeplinesc criteriul de mărime al directivei sau intră prin excepțiile/deciziile prevăzute. „Manufacturing” din Annex II nu înseamnă orice fabrică: sunt enumerate, între altele, medical devices, computer/electronic/optical products, electrical equipment, machinery and equipment n.e.c., motor vehicles și other transport equipment. Prin urmare, formula „peste 50 angajați SAU peste 10 milioane EUR = automat NIS2 pentru orice manufacturing” este prea simplificată; trebuie verificate activitatea NACE, mărimea, excepțiile și cadrul național aplicabil [227]. În România, reperul de transpunere este OUG nr. 155/2024, aprobată cu modificări și completări prin Legea nr. 124/2025; cadrul a primit modificări ulterioare, astfel încât verificarea se face pe forma națională în vigoare la data proiectului [229].

Pentru entitățile aflate în scope, NIS2 cere măsuri proporționale și risk-based: politici de analiză a riscului, incident handling, business continuity, supply-chain security, secure acquisition/development/maintenance, evaluarea eficacității măsurilor, cyber hygiene/training, criptografie și, unde este adecvat, MFA/continuous authentication. Pentru incidente semnificative, directiva prevede o secvență de raportare cu early warning în 24 h, incident notification în 72 h și final report ulterior, nu o singură notificare „în 24 h” [227].

Pentru furnizorul de echipamente, efectul practic al NIS2 apare frecvent prin cerințele de supply-chain security ale clientului: asset inventory, hardening, patching, vulnerability disclosure, remote access control, logs și documentație de integrare. Cerințele contractuale pot include SBOM și rezultate de security testing. Arhitectura IEC 62443 poate facilita integrarea în rețeaua clientului, dar o zonă „Z2” nu este obligatorie prin NIS2 și nu trebuie presupusă fără arhitectura concretă a fabricii.

14.7 Sustenabilitate și Digital Product Passport: ESPR

Regulamentul (UE) 2024/1781, Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR), este un regulament-cadru pentru stabilirea cerințelor de ecodesign aplicabile produselor. Nu înseamnă că toate produsele au deja, din 2026, aceleași cerințe juridice privind durabilitatea, reparabilitatea, conținutul reciclat sau DPP. Cerințele concrete sunt introduse prin delegated acts/horizontal measures pentru grupele prioritizate în Working Plan 2025–2030 [171], [230].

Pentru proiectantul de echipamente, abordarea robustă este „design ready for evidence”: să poată documenta materiale, consumuri, reparabilitate, piese de schimb, software, lifecycle și informații necesare dezmembrării, acolo unde acestea sunt relevante. Atunci când o categorie de produs intră sub un act ESPR, cerințele și indicatorii specifici din acel act devin cerințe de design și de conformitate. DPP este obligatoriu numai pentru categoriile și la datele stabilite de legislația aplicabilă.

14.7.1 Digital Product Passport: structură și calendar

Digital Product Passport este mecanismul prin care informații structurate despre produs pot fi puse la dispoziție, cu identificare și drepturi de acces, în condițiile ESPR sau ale altor acte sectoriale (Figura 14.9). Setul exact de date nu este universal. Un reper deja stabilit este Battery Passport: Regulamentul (UE) 2023/1542 îl cere de la 18 februarie 2027 pentru bateriile LMT, bateriile industriale cu capacitate mai mare de 2 kWh și bateriile pentru vehicule electrice [172].

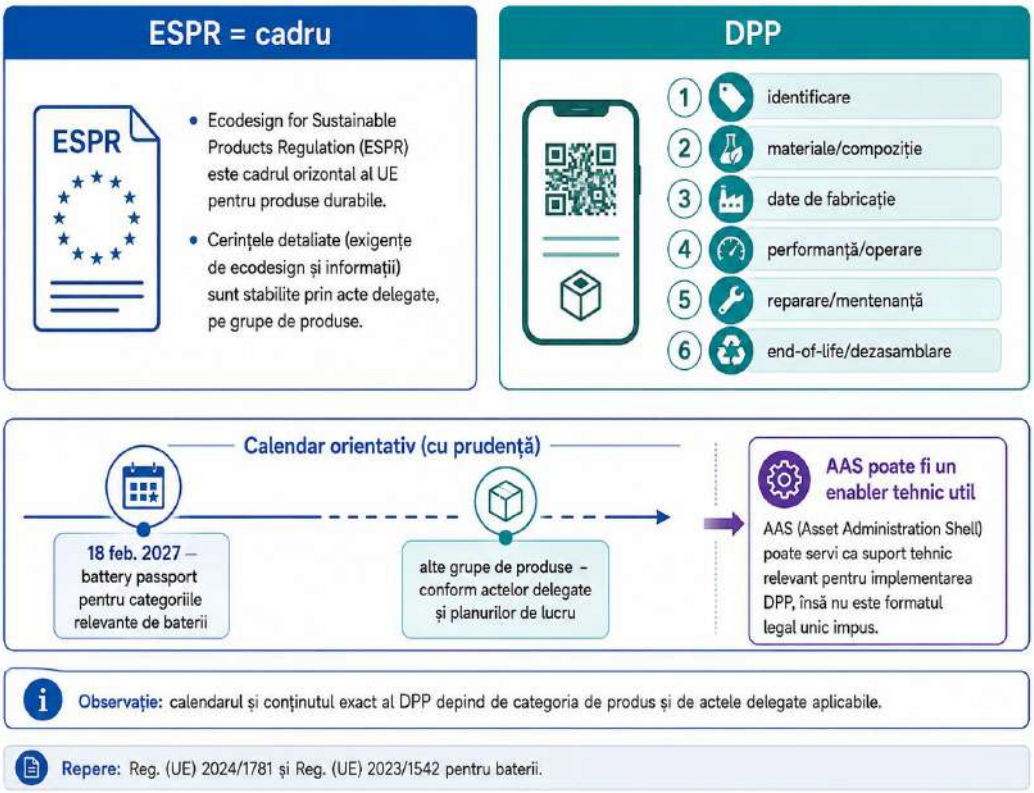


Figura 14.9. ESPR și Digital Product Passport: structură conceptuală și calendar prudent. Cerințele și termenele DPP depind de grupa de produse și de actele delegate aplicabile; Battery Passport are separat termenul legal de 18 februarie 2027 pentru categoriile relevante.

Tehnic, ESPR cere interoperabilitate, identificare și control al accesului pentru DPP, iar detaliile de date se stabilesc în actele aplicabile. Nu este corect să se afirme că DPP este în mod legal „JSON-LD, AAS-conform" sau că are întotdeauna exact șase layere. Pentru proiectare, este utilă o schemă didactică de categorii (identificare, materiale/compoziție, informații de fabricație relevante, performanță/utilizare, reparare și end-of-life) dar conținutul obligatoriu și accesul se preiau din legislația produsului [171].

În 2026, standardizarea europeană DPP a depășit faza de simplă inițiere: CEN-CLC/JTC 24 a dezvoltat o primă serie de opt standarde europene pentru infrastructura Digital Product Passport (EN 18216, EN 18219, EN 18220, EN 18221, EN 18222, EN 18223, EN 18239 și EN 18246) iar CEN-CENELEC raporta în iulie 2026 că șase dintre cele opt fuseseră deja citate în Jurnalul Oficial al Uniunii Europene. Aceste standarde sunt transversale și independente de produs; datele obligatorii pentru un produs rămân stabilite de legislația și actele aplicabile categoriei respective [231]. În industrie, AAS și inițiative precum DPP4.0 pot fi utilizate ca infrastructură de implementare pentru anumite use case-uri, mai ales când

aceeași reprezentare digitală deservește engineering, operations și sustainability. AAS nu este însă formatul legal unic impus de ESPR [5], [171].

14.7.2 Implicații în proiectarea echipamentelor

Indiferent de calendarul unui delegated act, principiile de design for durability, repair, disassembly, energy/resource efficiency și trasabilitatea materialelor sunt relevante pentru lifecycle engineering. Ele devin obligații juridice numai în măsura în care legislația aplicabilă produsului le cere. Pentru proiectant, avantajul integrării timpurii este evitarea unei arhitecturi care nu poate produce datele sau dovezile solicitate ulterior.

Design for disassembly urmărește separarea controlată a componentelor și materialelor la service și end-of-life: îmbinări accesibile, evitarea legăturilor ireversibile acolo unde nu sunt funcțional necesare, identificarea materialelor și documentarea secvenței de demontare. Alegerea trebuie echilibrată cu safety, rigiditate, sealing, cost și procesul de fabricație; sudura sau adezivii nu sunt „greșiți” în sine dacă use case-ul îi justifică.

Design for energy efficiency include dimensionarea corectă a motoarelor și acționărilor, reducerea pierderilor, recuperarea energiei acolo unde ciclul o justifică, managementul stărilor idle/standby și măsurarea consumurilor relevante. Clasele IE și soluțiile regenerative se aleg pentru aplicația concretă; afirmația că un motor supradimensionat „consumă întotdeauna mai mult” trebuie înlocuită cu analiza punctului de funcționare și a profilului de sarcină.

Material data / material passport poate fi susținut printr-un BOM extins cu material, masă, substanțe relevante, proveniență și informații de reciclare, în măsura în care aceste date sunt disponibile și necesare. Pentru material declaration, reperul IEC actual este IEC 82474-1:2025, care stabilește cerințe și ghidaj pentru conținutul, formatul și schimbul declarațiilor de material și extinde abordarea anterioară IEC 62474 inclusiv spre material efficiency și circularity; standardul nu impune o soluție software unică [232]. Transferul automat al acestor date într-un DPP la livrare depinde de cerințele legale și de arhitectura informațională ale proiectului.

14.8 TSN și 5G industrial: convergență IT/OT

Rețelele industriale au evoluat de la fieldbus-uri specializate la multiple familii Industrial Ethernet și, mai recent, la mecanisme standard Ethernet pentru timing și convergență. TSN nu este o „a treia generație” care anulează protocoalele industriale existente; este o familie de mecanisme IEEE 802.1 care poate fi utilizată de profile/protocoale industriale pentru sincronizare, scheduling, preemption și redundanță.

Convergența IT/OT înseamnă reutilizarea controlată a infrastructurii și tehnologiilor de rețea, nu amestecarea necondiționată a traficului. TSN poate oferi bounded latency pentru fluxuri programate și coexistenta cu best-effort, dacă rețeaua este configurată end-to-end corespunzător. 5G adaugă mobilitate și servicii QoS pentru use case-uri wireless. Safety, cybersecurity și availability trebuie însă proiectate separat și validate pentru fiecare flux critic.

14.8.1 Time-Sensitive Networking: IEEE 802.1

Time-Sensitive Networking este un set de mecanisme IEEE pentru Ethernet time-sensitive. Exemple relevante: IEEE 802.1Qbv, time-aware shaping/scheduled traffic; IEEE 802.1Qbu împreună cu IEEE 802.3br, frame preemption; IEEE 802.1CB, Frame Replication and Elimination for Reliability. Rezultatul nu este o latență universală, ci capacitatea de a proiecta fluxuri cu proprietăți temporale și de disponibilitate controlate atunci când toate elementele de pe traseu acceptă profilul și configurația necesare (Figura 14.10) [233].

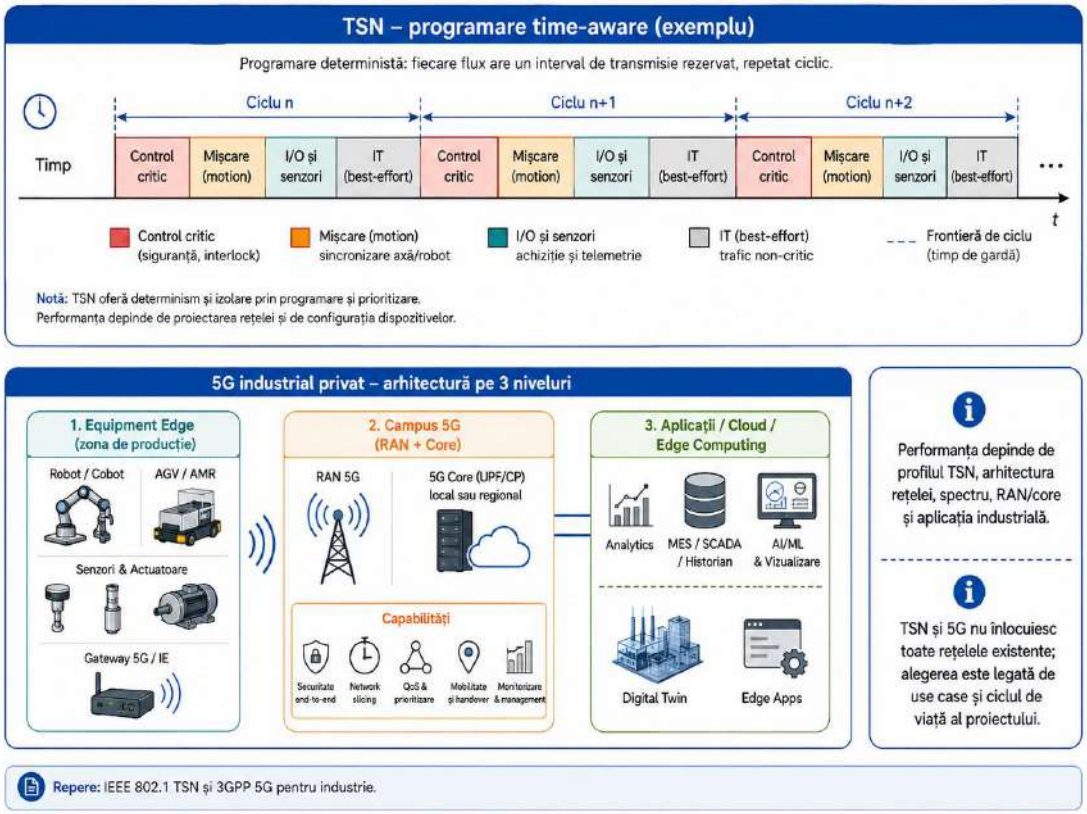


Figura 14.10. TSN time-aware scheduling și arhitectură conceptuală de rețea 5G industrială privată. Performanța depinde de profil, configurație, spectru, RAN/core și use case; figura nu exprimă limite universale de latență.

În 2026, suportul TSN există în mai multe ecosisteme industriale, dar maturitatea și interoperabilitatea depind de profil, furnizor, switch-uri, end devices și toolchain. Nu este justificată o regulă de tip „sub 10 ani folosește Ethernet clasic, peste 15 ani folosește TSN”. Decizia trebuie bazată pe cerințe: sincronizare, jitter, convergență, topologie, migrare, lifecycle support și compatibilitatea cu infrastructura clientului.

14.8.2 Private 5G pentru fabrici

3GPP Release 16 și versiunile ulterioare au extins capabilitățile 5G relevante pentru industrie, inclusiv URLLC și integrarea cu TSN. Valorile de latență și reliability publicate pentru 5G reprezintă obiective/capabilități definite pentru anumite scenarii și configurații; nu trebuie echivalate automat cu o garanție end-to-end a aplicației industriale sau cu performanța unei rețele cablate [234].

O rețea private 5G poate utiliza gNB, 5G Core cu funcții precum UPF, edge computing și mecanisme de QoS/slicing, în funcție de arhitectură. Spectrul și regimul de licențiere sunt naționale/regionale: banda 3,8–4,2 GHz nu este o „bandă industrială unică alocată în toată UE”. Proiectantul trebuie să verifice cadrul de spectru al țării, acoperirea, interferența, handover-ul, redundanța și integrarea cu rețeaua OT.

Use case-uri relevante includ conectivitatea AMR, echipamente reconfigurabile, vision cu bandwidth ridicat, remote support și AR/VR. Fezabilitatea depinde de densitate, mobilitate, trafic, latență, securitate și infrastructura existentă. Exemplele publice ale unor fabrici pot ilustra posibilități, dar costurile și economiile nu pot fi generalizate; intervalele fixe de investiție au fost eliminate din text.

În practică · Integrarea TSN cu 5G

3GPP a introdus suport pentru integrarea cu TSN începând cu Release 16 și l-a extins ulterior. Ideea este ca rețeaua 5G să poată participa într-o arhitectură time-sensitive prin mecanisme de sincronizare, QoS și integrare cu domeniul TSN.

Acest lucru nu înseamnă că o legătură 5G oferă în orice configurație aceleași garanții ca un segment Ethernet TSN cablat și nici că o funcție safety, precum E-Stop, poate fi mutată pe wireless fără o analiză și o validare funcțional-safety specifice. Cerințele de latență, disponibilitate, jitter, acoperire, handover și failure response se stabilesc pentru use case.

Pentru echipamente mobile sau reconfigurabile, 5G/TSN poate deveni o opțiune arhitecturală importantă; decizia trebuie fundamentată prin cerințe și teste de performanță, nu printr-o regulă de future-proofing universală.

14.9 Sinteză V-Model integrată pe SAP

Capitolele 1–13 utilizează SAP ca fir conductor, dar nu toate exemplele numerice descriu aceeași configurație: baseline-ul conceptual este ansamblul tub–carcasă, presat pe axa electrică Z, cu fixare pneumatică CL1/CL2; presarea pneumatică/hidraulică, alte produse și cadența de 360 piese/oră apar exclusiv ca variante ALT. Modelul V sintetizează trasabilitatea dintre cerințe, proiectare, calcule, control, safety, fiabilitate, documentație, date și verificări planificate. Prezentarea artefactelor și a etapelor nu demonstrează prin ea însăși nici performanțe industriale, nici validare FAT/SAT, nici conformitate legală obținută (Figura 14.11).

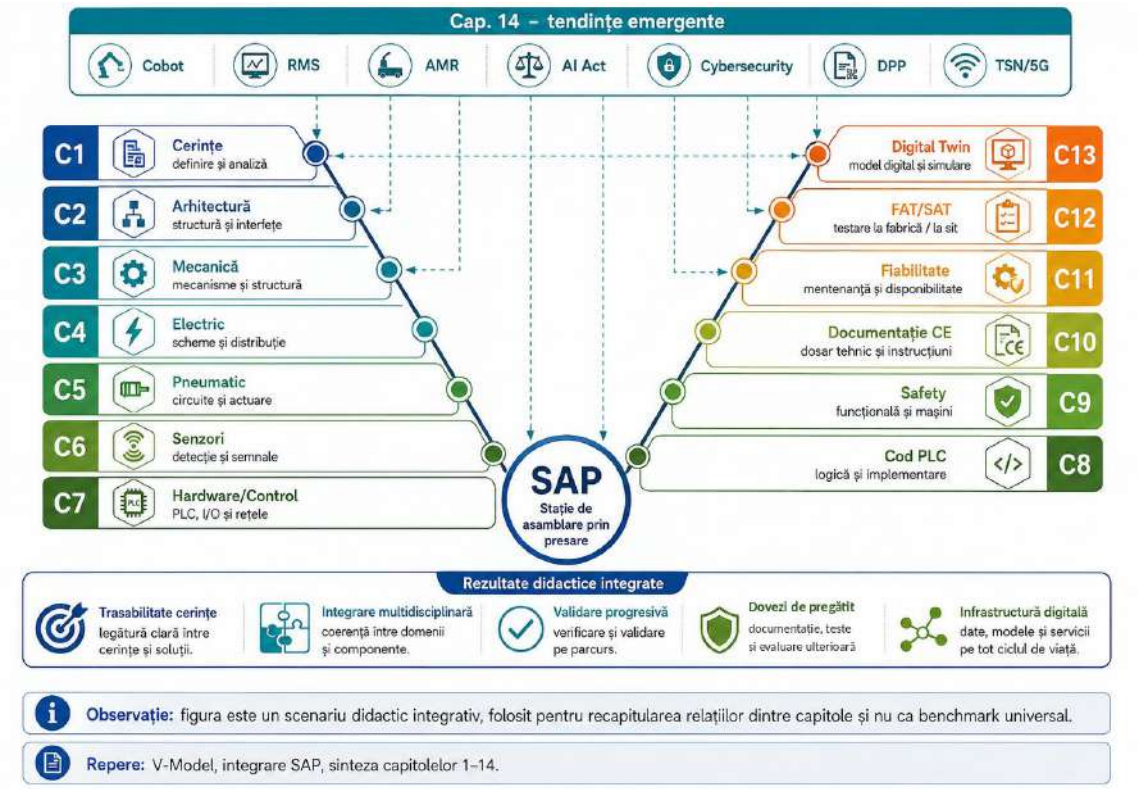


Figura 14.11. V-Model integrat pe stația SAP, cu Capitolele 1–13 și Capitolul 14 ca strat transversal de teme emergente. Figura este o sinteză didactică a obiectivelor și livrabilelor propuse; caseta „Dovezi de pregătit" indică activități viitoare de documentare, testare și evaluare, nu conformitate demonstrată sau marcaj CE obținut.

Faza de cerințe și arhitectură (C1–C2) definește, pentru scenariul didactic SAP, cadența, cerințele de fiabilitate/mentenabilitate, integrarea în linie și obligațiile de conformitate. Caietul de sarcini, specificația tehnică de realizare și matricea de trasabilitate leagă nevoia de business de cerințele verificabile și de deciziile de design. Valorile numerice folosite în exemplu trebuie interpretate ca date ale scenariului, nu ca praguri recomandate pentru alte echipamente.

Faza de proiectare a subsistemelor (C3–C6) transformă cerințele SAP în arhitecturi mecanice, electrice, pneumatice și de instrumentație. Componentele și dimensiunile concrete din exemplu au rol didactic; într-un proiect real se selectează din calcul, standarde, environment, lifecycle și cerințele clientului. Valoarea metodologică este menținerea interfețelor și a trasabilității între subsisteme.

Faza de control și safety (C7–C9) leagă PLC, I/O, drive-ul axei electrice Z, HMI și secvența CL1/CL2–Z de pericolele definite prin evaluarea riscului. Controlerul safety, dispozitivele de protecție și nivelurile PLr/PL atins se stabilesc numai după specificarea și validarea funcțiilor; ele nu sunt performanțe atribuite automat modelului conceptual. Exemplele numerice și arhitecturile din variantele ALT se păstrează ca exerciții distincte.

Faza de documentație, fiabilitate și validare (C10–C12) construiește technical documentation conform Regulamentului (UE) 2023/1230, Annex IV Part A, plus analiza de fiabilitate și planurile FAT/SAT. Durata FAT/SAT, numărul de punchlist items și clasificarea A/B/C sunt specifice contractului/scenariului; clasificarea punchlist nu este o cerință universală de standard. C13 adaugă reprezentarea digitală și integrarea informațională prin tehnologii precum AAS și OPC UA, în măsura în care use case-ul le cere.

Panoul „Rezultate didactice integrate” din Figura 14.11 enunță obiective și livrabile propuse, nu rezultate verificate pe un echipament construit. În particular, caseta „Dovezi de pregătit” indică documentația, testele și dovezile care trebuie realizate pentru evaluarea ulterioară a conformității, iar verificarea/validarea progresivă reprezintă activități de planificat și executat. Cadența de 120 ansambluri/oră și forța maximă de proiectare de 8 kN rămân ipoteze preliminare, iar acceptanța, nivelurile de siguranță și performanțele nu sunt demonstrate. Aplicarea modelului V nu garantează buget, termen, OEE sau obținerea marcajului CE; acestea depind de proiectare, evaluarea riscurilor și dovezi efective.

Capitolul 14 funcționează ca strat transversal: pentru un proiect viitor se verifică, după caz, aplicația colaborativă (§14.2), reconfigurabilitatea (§14.3), logistica AMR (§14.4), clasificarea și obligațiile AI (§14.5), cybersecurity (§14.6), ecodesign/DPP (§14.7) și cerințele de rețea (§14.8). Niciuna dintre tehnologii nu este obligatorie doar pentru că proiectul este realizat după 2026; obligațiile juridice și opțiunile tehnice se stabilesc din scope, intended purpose și cerințele clientului.

Firul subsistemului mecanic ilustrează bine caracterul integrativ al disciplinei: dimensionarea și interfaces din proiectarea detaliată, poziționarea safeguards, FMEA și dimensionarea pentru fiabilitate, verificările mecanice la FAT/SAT, instrumentarea pentru condition monitoring și, în proiectele reconfigurabile, docking-ul și demontabilitatea. Listele de verificări din manual sunt ghiduri didactice și trebuie adaptate aplicației. Coerența rezultă din trasabilitatea acelorași componente și interfețe pe întreg lifecycle-ul, nu din aplicarea mecanică a unui număr fix de verificări.

14.9.1 De la concept la echipament industrial: verificare, validare și conformitate

Studiul SAP se încheie printr-o foaie de parcurs pentru dezvoltarea ulterioară a stației, nu prin prezentarea unui echipament construit sau certificat. Configurația analizată rămâne ansamblul tub–carcasă, cu presare electrică pe axa Z, fixare pneumatică CL1/CL2 și monitorizare F–z. Cadența de 120 ansambluri/oră și forța maximă de proiectare de 8 kN sunt ipoteze didactice; valorile și soluțiile din variantele ALT nu se transferă în această configurație fără controlul modificării.

Patru procese distincte structurează traseul: verificarea proiectului demonstrează îndeplinirea cerințelor specificate; validarea experimentală stabilește dacă echipamentul realizat corespunde nevoilor aplicației și utilizării prevăzute; FAT/SAT documentează acceptanța pentru criteriile și condițiile convenite; evaluarea conformității demonstrează îndeplinirea cerințelor legale aplicabile. Nici simularea, nici un FAT promovat nu substituie automat evaluarea conformității. Pentru regulile detaliate se vor utiliza §9.13, §10.8 și §12.8.

Milestone-uri și condiții de trecere

Reperele M0–M7 constituie o convenție didactică de management al proiectului, nu o succesiune normativă obligatorie. Fiecare punct de decizie trebuie închis prin livrabile identificate, criterii aprobate și înregistrarea problemelor deschise (Tabelul 14.1). Evaluarea riscurilor se actualizează transversal, inclusiv după modificări constructive și rezultate experimentale.

Tabelul 14.1. Foaia de parcurs SAP: obiectivul, livrabilul și criteriul de trecere pentru fiecare milestone (cadru didactic).

Reper	Livrabil demonstrabil	Condiție de trecere
M0 Cerințe și configurație	Specificație revizuită, limite de sistem, cerințe măsurabile, matrice REQ–DES–TEST; versiune SAP identificată.	Fiecare cerință are proprietar, formulare verificabilă și metodă de demonstrare propusă.

Reper	Livrabil demonstrabil	Condiție de trecere
M1 Riscuri și strategie	Evaluare de risc preliminară, cerințe safety, măsuri de reducere și identificarea legislației aplicabile.	Pericolele cunoscute și riscurile asociate au tratament documentat; cerințele rezultate intră în proiect.
M2 Proiect de detaliu	CAD și desene, calcul îmbinare, dimensionare Z/CL1–CL2, scheme, selecție senzori și buget metrologic.	Verificările proiectului sunt trasabile; aspectele critice nerezolvate nu sunt transferate tacit în fabricație.
M3 Verificare virtuală	Modele și rapoarte de simulare: GRAFCET, PLC, interblocări de proces, coliziuni, timpi de ciclu.	Scenariile planificate sunt acoperite; ipotezele și limitele modelelor sunt consemnate.
M4 Încercări subsisteme	Banc/prototip identificat, protocoale, date F–z, încercări CL1/CL2, calibrare, buget de incertitudine.	Criteriile aprobate sunt satisfăcute în condițiile de încercare documentate; altfel se reia proiectarea.
M5 Sistem integrat	Teste pe stația as-built, moduri de defectare, calitatea produsului, validare pentru fiecare funcție safety.	Dovezile acoperă cerințele relevante; neconformitățile care împiedică acceptanța sunt închise.
M6 FAT / SAT	Planuri aprobate, rapoarte FAT/SAT, run-at-rate, punchlist, semnături și configurația testată.	Sunt îndeplinite criteriile contractuale aplicabile și condițiile de închidere stabilite în protocol.
M7 Conformitate	Documentația tehnică finală, evaluare de risc actualizată, dovezi, instrucțiuni și procedura aplicabilă de conformitate.	Producătorul a îndeplinit obligațiile legale aplicabile înainte de introducerea pe piață sau punerea în funcțiune.

Notă de aplicare. M4–M7 nu sunt considerate realizate pentru SAP conceptual. Într-un proiect real, etapele pot fi iterative, cu verificări parțiale și revizuiri ale evaluării riscului; ordinea de mai sus exprimă logica dovezilor, nu un calendar contractual (Tabelul 14.2).

Trasabilitatea dovezilor: criteriul care leagă disciplinele

Pentru fiecare cerință, studentul trebuie să identifice soluția, metoda de verificare, dovada obiectivă și decizia (Figura 14.12). Identificatorii, versiunea configurației, condițiile încercării, incertitudinea relevantă și rezultatele brute permit auditarea deciziei. O schemă coerentă sau un grafic afișat pe HMI nu constituie singur dovadă de validare.



Figura 14.12. Lanțul de trasabilitate cerință–soluție–metodă–dovadă–decizie pentru dezvoltarea ulterioară a stației SAP (schemă metodologică originală).

Elemente critice specifice configurației SAP

Tabelul 14.2. Elemente ale stației SAP și dovezi necesare pe traseul de verificare și validare.

Element	Dovada de proiectare / încercare	Repere
Îmbinare tub–carcasă	Geometrie și toleranțe, interferență, F(z) necesară, deteriorare și calitate verificată independent.	M2 / M4 / M5
Axă electrică Z	Forță, cursă, ghidare, rigiditate, încălzire, profil dinamic și comportament la defect.	M2 / M4 / M5
Fixare CL1/CL2	Forțe și poziții de fixare, stabilitate, confirmări și reacție la pierderea aerului.	M2 / M4 / M5
Instrumentație F–z	Domeniu adecvat, calibrare, incertitudine, sincronizare și integritatea datelor.	M2 / M4 / M5
PLC / HMI	Secvență S0–S8, moduri, diagnostic, erori și interblocări de proces.	M3 / M5
Funcții de siguranță	Evaluare de risc, specificație, verificare și validare distinctă pentru fiecare funcție implementată.	M1–M5
Productivitate	Timp de ciclu și cadență în condițiile definite, inclusiv alimentare și opriri relevante.	M5 / M6
Conformitate	Încadrare juridică, cerințe aplicabile, documentație, procedură și dovezi finale.	M1–M7

Două precauții sunt esențiale. Pentru axa verticală Z, STO nu garantează de la sine împiedicarea coborârii gravitaționale: reținerea și reacția la pierderea energiei se proiectează din evaluarea riscurilor. Pentru produs, încadrarea curbei F–z într-o fereastră nu demonstrează automat conformitatea geometrică sau funcțională; este necesară o verificare independentă a calității îmbinării.

Criteriu de încheiere a studiului de caz

La final, studentul trebuie să poată pregăti o matrice cerință–dovadă, un registru preliminar de risc, un plan de încercări și un registru de milestone-uri cu criterii de trecere. Încadrarea legală, edițiile standardelor, statutul armonizării și eventualul rol al unui organism notificat se verifică pentru produsul efectiv și la data evaluării. Pentru conceptul SAP nu se emit rapoarte experimentale fictive, declarație UE de conformitate sau marcaj CE.

14.10 Concepte cheie și întrebări de reflecție

14.10.1 Recapitulare: conceptele de bază ale Capitolului 14

- Cobot / operații colaborative: SMS, HG, SSM și PFL sunt metode consacrate. PFL poate permite contact previzibil numai în condițiile validate ale aplicației; tool-ul, piesa și trapping/crushing hazards fac parte din analiză.
- ISO 10218-1:2025 și ISO 10218-2:2025 sunt edițiile curente pentru robot și aplicația/celula robotizată. ISO/TS 15066:2016 rămâne reper suplimentar pentru colaborare/PFL; ISO 13855:2024 este ediția curentă pentru poziționarea/dimensionarea safeguards relevante [12], [13], [149], [154].
- DMS / FMS / RMS descriu poziționări diferite între specializare, flexibilitate și reconfigurabilitate. Nu există praguri universale de volum, cost sau ROI; capabilitățile și business case-ul decid arhitectura.
- AGV / AMR: ISO 3691-4:2023 este ediția publicată curentă pentru driverless industrial trucks, iar o ediție nouă se află în dezvoltare. Navigația globală și fine docking-ul trebuie tratate separat atunci când transferul cere precizie mai mare [225].

- AI Act: piramida „patru niveluri” este o simplificare didactică. Pentru echipamente se verifică art. 6, intended purpose și rolul AI în safety. Obligațiile Chapter III Sections 1–3 se aplică de la 2 decembrie 2027 pentru art. 6(2)/Annex III și de la 2 august 2028 pentru art. 6(1)/Annex I, conform formei consolidate după Regulamentul (UE) 2026/1744 [159], [162].
- AI și siguranța funcțională: un indicator de exactitate (accuracy) nu este PFHD. ISO/IEC TR 5469:2024 oferă ghidaj; separarea dintre AI și o cale safety verificabilă este un pattern posibil, nu o regulă universală de certificare [160], [226].
- IEC 62443: zones/conduits și SL-T se definesc prin risk assessment. O schemă Field–Control–Operations–Enterprise este un exemplu, nu topologia normativă a oricărui IACS [228].
- CRA: aplicare generală din 11 decembrie 2027; Art. 14 reporting din 11 septembrie 2026. Producătorul documentează cybersecurity risk și vulnerability handling, inclusiv SBOM; livrarea/publicarea SBOM către orice client nu este o obligație generică identică în toate cazurile [143].
- NIS2: scope-ul depinde de tipul de entitate/sector din Annex I–II, mărime și transpunere națională; nu orice companie de manufacturing cu un singur prag financiar este automat inclusă. Măsurile sunt risk-based și includ supply-chain security [227], [229].
- ESPR / DPP: ESPR este un regulament-cadru; setul DPP și datele de aplicare se stabilesc prin acte pentru grupe de produse. Battery Passport are termenul legal 18 februarie 2027 pentru categoriile prevăzute de Regulamentul (UE) 2023/1542 [171], [172], [230].
- AAS poate susține implementări DPP și reutilizarea datelor de lifecycle, dar ESPR nu impune AAS ca format legal unic. Interoperabilitatea și seturile de date se definesc prin cadrul DPP aplicabil [5], [171], [231].
- TSN: Qbv, Qbu/802.3br și 802.1CB sunt mecanisme pentru scheduling, preemption și redundanță. Latența rezultă din profilul și configurația end-to-end, nu dintr-o valoare implicită a etichetei „TSN” [233].
- Private 5G / URLLC: Release 16+ oferă capabilități relevante pentru industrie și integrare cu TSN, dar latența/reliability depind de scenariu, radio, core, edge și load. Spectrul pentru rețele locale se verifică la nivel național [234].

14.10.2 Întrebări de reflecție

Următoarele întrebări sunt destinate autoevaluării la încheierea cursului. Ele cer integrarea conceptelor în decizii de proiectare. Răspunsurile sunt modele de raționament, nu „rețete” universale; în proiecte reale, standardele, legislația și cerințele clientului trebuie verificate în ediția aplicabilă.

Q1. Un client cere o celulă cobot pentru asamblare side-by-side. Cum decideți între PFL, SSM sau o combinație? Porniți de la task și contactele previzibile. PFL este posibil numai dacă robotul, toolul și piesa permit ca toate contactele relevante, inclusiv trapping/crushing, să fie aduse în domeniul validat. SSM este potrivit când separarea trebuie menținută prin sensing și controlul vitezei/oprire. O combinație poate fi eficientă când faze diferite ale ciclului au hazards diferite. Nu există un prag universal, de exemplu „150 N = PFL imposibil”; se verifică zona corporală, tipul contactului, geometria, energia și valorile/procedurile aplicabile din ISO 10218:2025 și ISO/TS 15066 [12], [13], [154].

Q2. Un echipament folosește Computer Vision AI pentru controlul calității. Cum se analizează sub AI Act? Mai întâi se definește intended purpose. Dacă AI este folosit exclusiv pentru quality control non-safety, art. 6(1a) clarifică faptul că nu este safety component doar din acest motiv. Dacă

însă failure/malfunction al AI ar pune în pericol sănătatea sau siguranța, art. 6(1b) îl poate aduce în categoria safety component; apoi trebuie verificate condițiile art. 6(1), inclusiv legislația Annex I și third-party conformity assessment. Separat se verifică eventualele use case-uri Annex III și obligațiile de transparență. Dacă sistemul este high-risk, se aplică cerințele AI Act la data corespunzătoare categoriei: 2 decembrie 2027 pentru art. 6(2)/Annex III și 2 august 2028 pentru art. 6(1)/Annex I. Arhitectura cu o cale safety independentă poate reduce riscul tehnic, dar nu „reclasifică" automat AI-ul fără analiza legală a intended purpose-ului [159], [162].

Q3. Un client din România are 80 de angajați și 25 M EUR cifră de afaceri. Este automat NIS2 și ce documentație îi livrați? Nu se poate decide numai din aceste două valori. Se verifică mai întâi dacă activitatea entității se încadrează într-un tip din Annex I sau II NIS2 (de exemplu anumite categorii de manufacturing), apoi criteriul de mărime, excepțiile și cadrul național aplicabil. În România, analiza trebuie făcută în raport cu OUG nr. 155/2024, aprobată cu modificări și completări prin Legea nr. 124/2025, în forma în vigoare la data evaluării [227], [229]. Ca furnizor, pregătiți documentația de cybersecurity necesară produsului și contractului: arhitectură și hardening, secure configuration, update/vulnerability process, informații despre remote access, asset/software inventory și, unde este relevant, SBOM și rezultate de security testing. Clientul integrează echipamentul în propriul risk management, asset inventory, patching, access control și incident response. Pentru CRA, art. 14 reporting se aplică producătorilor din 11 septembrie 2026, iar aplicarea generală a regulamentului începe la 11 decembrie 2027 [143].

Q4. Pentru un echipament cu lifecycle lung, cum se face future-proofing fără supra-investiție? Se proiectează mai întâi „puncte de opțiune": separarea interfețelor, rezerve controlate de I/O/network/compute, updateability, secure boot/credential management, documentarea materialelor, configuration management și posibilitatea de înlocuire a componentelor cu risc de obsolescence. TSN, 5G, AAS, edge AI sau modularitatea RMS se introduc dacă cerințele și roadmap-ul clientului justifică investiția. Pentru fiecare opțiune se compară costul incremental cu costul probabil al retrofitului, timpul de oprire și riscul de obsolescence. Procentele fixe de +3 %, +8 % sau „20–30 % future-proofing" nu sunt transferabile între proiecte și nu trebuie folosite ca reguli generale.

Q5. La sfârșitul cursului PeF, ce trei mesaje ar trebui reținute? (1) Proiectarea echipamentelor este o disciplină sistemică bazată pe cerințe, modele, verificare și validare; metodologia structurează creativitatea, nu o înlocuiește. (2) Safety, cybersecurity și conformitatea sunt constrângeri de proiectare integrate din concept, nu „add-ons" de final; nivelul măsurilor rezultă din risc și din legislația aplicabilă. (3) Inginerul de echipamente este integrator de sisteme: valoarea sa constă în gestionarea interfețelor mecanice, electrice, software, informaționale și umane astfel încât echipamentul să funcționeze coerent pe întreg lifecycle-ul.

14.11 Probleme propuse cu răspunsuri

Problemele de mai jos aplică relațiile și metodele capitolului pe situații din proiectarea stației SAP sau a unor echipamente similare. Valorile numerice sunt didactice; răspunsul indică rezultatul și criteriul de decizie, iar verificarea finală se face pe datele proiectului real și în documentația producătorilor. Se recomandă rezolvarea independentă înaintea consultării răspunsului.

Problema 14.1. Distanța minimă de separare pentru monitorizarea vitezei și separării

Enunț. Pentru o celulă colaborativă se adoptă (valori didactice): v_h = 1,6 m/s, T_r = 0,08 s, T_s = 0,25 s, v_r = 0,4 m/s, distanța de oprire a robotului S_s = 0,06 m, C = 0,20 m și $Z_d + Z_r$ = 0,10 m. Determinați distanța minimă de separare de protecție.

Răspuns. $S_h = v_h \cdot (T_r + T_s) = 1{,}6 \cdot 0{,}33 \approx 0{,}528$ m; $S_r = v_r \cdot T_r = 0{,}4 \cdot 0{,}08 = 0{,}032$ m. $S_p = 0{,}528 + 0{,}032 + 0{,}06 + 0{,}20 + 0{,}10 \approx 0{,}92$ m. Termenul dominant rămâne S_h, deci reducerea timpului de oprire are efectul cel mai mare. Valorile reale ale timpilor și distanțelor de oprire se iau din datele producătorului robotului, măsurate în configurația aplicației.

Problema 14.2. Câștigul de timp al unei soluții reconfigurabile

Enunț. O stație produce trei variante, cu două schimbări de variantă pe săptămână. Pe varianta dedicată, schimbarea durează 45 min; o soluție reconfigurabilă cu interfețe cu punct zero și rețete o reduce la 10 min. Estimați timpul câștigat pe an (48 de săptămâni de producție) și ce trebuie comparat înainte de decizie.

Răspuns. Câștigul este $(45 - 10) \cdot 2 \cdot 48 = 3\,360$ min ≈ 56 h/an de timp productiv. Decizia se ia comparând valoarea acestor ore (producție suplimentară sau ore suplimentare evitate) cu costul suplimentar al interfețelor, al rețetelor, al validării fiecărei configurații și al mentenanței; reconfigurabilitatea se justifică prin numărul real de variante și schimbări, nu ca valoare în sine.

Problema 14.3. Costul energetic al scăpărilor de aer comprimat

Enunț. Un compresor livrează 1 000 NL/min, iar scăpările reprezintă 10 % din debit. Energia specifică a producerii aerului este 0,12 kWh/Nm^3, timpul de funcționare 4 000 h/an, iar prețul energiei 0,20 €/kWh (valori didactice). Estimați costul anual al scăpărilor.

Răspuns. Debitul scăpărilor este 100 NL/min = 6 Nm^3/h, deci 6 · 0,12 = 0,72 kWh pe oră. Pe an: 0,72 · 4 000 = 2 880 kWh, adică aproximativ 576 €. Pentru proiectant, concluzia este că alegerea racordurilor, a lungimii traseelor și posibilitatea izolării zonelor fără consum influențează costul de exploatare și amprenta energetică, care pot fi cerute în pașaportul digital al produsului.

Anexa A. Șablon de caiet de sarcini

Bază metodologică: Capitolul 2 (§2.3 criteriile SMART, §2.4 caietul de sarcini și specificația tehnică de realizare); VDI 2519, ISO/IEC/IEEE 29148.

Caietul de sarcini descrie ce trebuie realizat și de ce, independent de soluție. Șablonul urmează ordinea în care beneficiarul își clarifică cerințele: contextul, limitele echipamentului, cerințele propriu-zise și condițiile de acceptare. Structura documentului este prezentată în Tabelul A.1, iar tabelul de cerințe, completat pentru stația SAP, în Tabelul A.2.

A.1 Structura documentului

Tabelul A.1. Structura caietului de sarcini.

Nr.	Secțiune	Conținut minim
1	Identificarea documentului	Proiect, beneficiar, versiune, dată, aprobări, istoricul reviziilor
2	Context și obiective	Scopul echipamentului, produsul prelucrat (desen, materiale, variante), volum și cadență, durata de utilizare prevăzută
3	Limitele echipamentului	Amplasament; alimentări (electrică, aer comprimat, rețea); interfețe informaționale (MES/ERP, OPC UA); mediu (temperatură, praf, grad IP); operatori și calificarea lor
4	Cerințe	Tabelul de cerințe (Tabelul A.2), fiecare cerință cu identificator unic
5	Cerințe normative și de documentație	Legislația aplicabilă (Regulamentul (UE) 2023/1230), standardele cerute, limba și formatul documentației, identitatea digitală (AAS), dacă este cerută
6	Acceptanța	Etapele FAT și SAT, criteriile generale, documentele care se predau (Anexa B)
7	Condiții contractuale	Termene, garanție, piese de schimb, instruire, suport după livrare

A.2 Tabelul de cerințe

Categoriile recomandate sunt: F, funcțională, P, performanță și proces, Q, calitate, S, siguranță, N, normativă, I, interfață și M, mentenanță și disponibilitate. Rândurile din Tabelul A.2 reiau cerințele stației SAP definite în Capitolul 2 și în Exemplul rezolvat 2.1.

Tabelul A.2. Tabelul de cerințe: model de completare pentru stația SAP.

ID	Categorie	Cerință (formulare verificabilă)	Prioritate	Metoda de verificare	Moment	Sursa
F-01	Funcțională	Asamblare prin presare axială a unui tub într-o carcasă; ajustaj și geometrie conform desenului produsului	Obligatorie	Demonstrație: ciclu complet	FAT	Tehnologie
P-01	Performanță	Timp de ciclu mediu ≤ 30 s (120 de ansambluri pe oră)	Obligatorie	Test: 50 de cicluri, timp înregistrat de PLC	FAT	Producție

ID	Categorie	Cerință (formulare verificabilă)	Prioritate	Metoda de verificare	Moment	Sursa
P-02	Proces	Forță de presare reglabilă între 5 și 8 kN; eroarea de măsurare ≤ 2 % din valoarea indicată	Obligatorie	Test cu traductor de referință, în trei puncte	FAT	Tehnologie
Q-01	Calitate	Cota de inserare H = 25,00 ± 0,15 mm, cu $C_{pk} \geq 1,33$	Obligatorie	Studiu de capabilitate (Exemplul rezolvat 12.1)	FAT	Calitate
S-01	Siguranță	Funcțiile de siguranță rezultă din evaluarea riscului conform ISO 12100; fiecare atinge PL_r stabilit	Obligatorie	Analiză și validare conform ISO 13849-2	Înainte de FAT	Legislație

A.3 Lista de verificare a calității cerințelor

Înainte de transmiterea caietului de sarcini către ofertanți se verifică următoarele:

☐ fiecare cerință are un identificator unic, care nu se refolosește după ștergere;

☐ fiecare cerință este verificabilă și are metoda și momentul verificării precizate;

☐ nu apar termeni neverificabili („rapid”, „robust”, „ușor de întreținut”) fără mărimea care îi definește;

☐ cerințele nu impun soluții; unde o soluție este impusă, motivul este precizat;

☐ fiecare cerință are o sursă identificată: persoana sau documentul din care provine;

☐ cerințele contradictorii au fost identificate și rezolvate, de exemplu prin acoperișul Casei Calității (§2.6).

Anexa B. Protocol de acceptanță FAT/SAT

Bază metodologică: Capitolul 12 (§12.2 FAT, §12.3 SAT, §12.8 studiul de caz pentru stația SAP).

Protocolul se pregătește înainte de test și se aprobă de ambele părți. Fiecare verificare trimite la o cerință din caietul de sarcini sau din specificația tehnică de realizare: o verificare fără cerință-sursă nu are criteriu de acceptare. Antetul protocolului este prezentat în Tabelul B.1, fișa de verificare în Tabelul B.2, iar lista de neconformități în Tabelul B.3.

B.1 Antetul protocolului

Tabelul B.1. Antetul protocolului de acceptanță.

Câmp	Conținut
Echipament / număr de serie	[de completat]
Versiune software (PLC, HMI, drive-uri)	[de completat]
Documente de referință	Caietul de sarcini v[...], specificația tehnică de realizare v[...], planul de test v[...]
Locul și data	Sediul furnizorului (FAT) / amplasamentul beneficiarului (SAT)
Participanți și roluri	Furnizor: [...]; beneficiar: [...]; observatori: [...]
Precondiții verificate	Documentația este disponibilă; mijloacele de măsurare sunt etalonate (certificate atașate); piesele de test sunt disponibile în cantitatea convenită; condițiile de mediu sunt cele specificate

B.2 Fișa de verificare

Verificările se grupează pe cele șase domenii din §12.2.2: mecanică, electrică, pneumatică/fluidică, funcționare secvențială, safety și performanță. Rândurile din Tabelul B.2 verifică cerințele SAP din Tabelul A.2.

Tabelul B.2. Fișa de verificare FAT/SAT: model de completare pentru stația SAP.

Nr.	Domeniu / cerință	Verificare și criteriu de acceptare	Metodă / mijloc de măsurare	Rezultat	Conform (D/N)	Observații
1	Performanță P-01	Timp de ciclu: media pe 50 de cicluri ≤ 30 s	Înregistrare PLC			
2	Proces P-02	Precizia forței: eroare ≤ 2 % la 5; 6,5 și 8 kN	Traductor de referință etalonat			
3	Calitate Q-01	Capabilitatea cotei H: $C_{pk} \geq 1{,}33$ pe 50 de piese, după verificarea stabilității și a sistemului de măsurare	Mijloc de măsurare validat prin MSA			
4	Secvență F-02	Detectarea pieselor NOK: toate cele 10 defecte induse sunt detectate și respinse	Defecte induse controlat			
5	Safety S-01	Presarea nu pornește fără confirmarea C1/C2	Simularea lipsei fiecărei confirmări			

Nr.	Domeniu / cerință	Verificare și criteriu de acceptare	Metodă / mijloc de măsurare	Rezultat	Conform (D/N)	Observații
6	Safety S-01	Axa Z se oprește cu STO la deschiderea protecției, în timpul prevăzut în validare	Test funcțional, cu timpul înregistrat			

B.3 Lista de neconformități (punchlist)

Decizia de expediere se ia pe baza criteriilor contractuale și a stării neconformităților, nu pe baza unei clasificări generice (§12.2.3); de aceea, Tabelul B.3 înregistrează impactul convenit contractual al fiecărei neconformități.

Tabelul B.3. Lista de neconformități (punchlist).

Nr.	Neconformitate	Cerință afectată	Impact asupra expedierii / recepției (conform contractului)	Responsabil	Termen	Stare
…						

B.4 Decizia și semnăturile

☐ Acceptat.

☐ Acceptat cu lista de neconformități din Tabelul B.3, cu termenele convenite.

☐ Neacceptat: se repetă verificările: […].

Protocolul se semnează de reprezentanții furnizorului și ai beneficiarului, cu numele, funcția, data și locul. La SAT se adaugă verificarea după transport și instalare (nivelare, alimentări, legare la pământ), integrarea cu sistemele fabricii, producția de probă în condiții reale și transferul documentației finale „as-built”.

Anexa C. Formular DFMEA (metoda AIAG-VDA)

Bază metodologică: Capitolul 11 (§11.3 FMEA AIAG-VDA și cei 7 pași, §11.4 exemple complete); AIAG-VDA FMEA Handbook.

Formularul urmează cei șapte pași ai metodei, iar coloanele foii de analiză din Tabelul C.1 sunt grupate pe pași, astfel încât analiza să poată fi citită de la structură la acțiuni.

C.1 Antetul analizei: Pasul 1, planificare și pregătire

Antetul precizează obiectul analizei și limitele lui, interfețele incluse și cele excluse, echipa (proiectare mecanică, electrică, automatizare, calitate, mentenanță), ipotezele de lucru, data și revizia.

C.2 Foaia de analiză: Pașii 2–6

Tabelul C.1. Foaia de analiză DFMEA: model de completare pentru clema CL1 a stației SAP.

Structură (Pasul 2)	Funcție și cerință (Pasul 3)	Efect (FE) / Mod (FM) / Cauză (FC) (Pasul 4)	Prevenire / detecție actuală	S / O / D / AP (Pasul 5)	Acțiune, responsabil, termen (Pasul 6)	S / O / D / AP după acțiune
Clema CL1 (cilindru + distribuitor 5/2)	Menține tubul în poziție pe toată durata presării	FE: deplasarea piesei, cota H în afara toleranței (Q-01) FM: forță de fixare insuficientă FC: presiune de alimentare scăzută	Prevenire: dimensionare cu factor de siguranță (§5.7.4); regulator cu manometru Detecție: confirmarea C1; monitorizarea presiunii	[de evaluat]	[de completat]	[de completat]

C.3 Reguli de lucru

- ratingurile S, O și D se stabilesc de echipă pe baza tabelelor din handbook și nu se preiau din alte proiecte fără justificare;
- prioritatea acțiunilor se stabilește prin Action Priority (AP), care acordă severității rolul dominant; produsul S × O × D nu se folosește pentru prioritizare (§11.3.1);
- fiecare acțiune are un responsabil și un termen; după implementare, ratingurile se reevaluează pe baza dovezilor, nu a intenției;
- Pasul 7 documentează rezultatele și comunicarea lor, iar analiza se actualizează la fiecare modificare de proiect (§12.5).

Anexa D. Registrul de riscuri și lista funcțiilor de siguranță

Bază metodologică: Capitolul 9 (§9.2 evaluarea riscului conform ISO 12100, §9.3 PL conform ISO 13849-1); Capitolul 10 (Modulul C al documentației tehnice).

Anexa reunește cele trei documente de lucru ale evaluării riscului: limitele mașinii (Tabelul D.1), registrul de riscuri (Tabelul D.2) și lista funcțiilor de siguranță (Tabelul D.3). Estimările de risc și nivelurile PL_r sunt lăsate necompletate intenționat: ele rezultă din analiza fiecărui proiect.

D.1 Limitele mașinii

Tabelul D.1. Limitele mașinii.

Tip de limită	Conținut
Limite de utilizare	Utilizarea prevăzută, utilizarea greșită previzibilă, modurile de funcționare, categoriile de utilizatori
Limite de spațiu	Zona de lucru, zonele de acces, spațiul pentru mentenanță
Limite de timp	Durata de viață, intervalele de mentenanță
Faze ale ciclului de viață	Transport, montaj, punere în funcțiune, producție, reglaj, curățare, mentenanță, dezafectare

D.2 Registrul de riscuri

Registrul aplică metoda în trei trepte din §9.2.2: proiectare intrinsec sigură, protecții și funcții de siguranță, informații pentru utilizare.

Tabelul D.2. Registrul de riscuri: model de completare pentru stația SAP.

Nr.	Faza / zona	Pericol și situație periculoasă	Estimarea riscului	Treapta 1. Proiectare	Treapta 2. Protecții / funcții de siguranță	Treapta 3. Informații	Risc rezidual / verificare
R-01	Producție: încărcare; zona de presare, axa Z	Strivire: mâna operatorului între poanson și piesă în timpul coborârii axei	[de evaluat]	Limitarea spațiului accesibil în zona de presare	Protecție cu interblocare sau dispozitiv optoelectronic, cu distanța conform ISO 13855; STO pe axa Z (SF-01)	Instruire, marcaje	[de evaluat]; validarea SF-01
R-02	Mentenanță; circuitul pneumatic CL1/CL2	Mișcare neașteptată: intervenție în dispozitiv cu circuitul sub presiune	[de evaluat]	Evacuarea controlată a aerului la izolare (§5.7.4)	Supapă de izolare cu posibilitate de blocare	Procedură de izolare a energiei	[de evaluat]; test funcțional

D.3 Lista funcțiilor de siguranță

Tabelul D.3. Lista funcțiilor de siguranță: model de completare.

ID	Funcția (eveniment → reacție → stare sigură)	PL_r	Arhitectură și PL atins	Componente / timp de răspuns	Validare (ISO 13849-2)
SF-01	Deschiderea protecției zonei de presare → STO pe axa Z și frâna de menținere → axa oprită și menținută	[din evaluarea riscului]	Categorie, $MTTF_D$, DC_{avg}, CCF: [de completat]; PL atins: [SISTEMA]	[de completat]	[referința raportului]
SF-02	Lipsa confirmării C1/C2 → blocarea pornirii presării → presarea nu poate porni	[din evaluarea riscului]	[de completat]	[de completat]	[de completat]

O funcție de siguranță este completă numai când are PL_r stabilit, PL atins demonstrat ($PL \geq PL_r$) și raport de validare. Funcțiile de siguranță folosesc dispozitive proprii, distincte de senzorii de proces (§6.7.3).

Anexa E. Lista de verificare pentru documentația tehnică și marcajul CE

Bază metodologică: Capitolul 10 (§10.2 structurarea documentației pe modulele A–G, §10.3 declarația UE de conformitate, §10.7 procesul integrat); Regulamentul (UE) 2023/1230, Anexele IV și V.

Lista de verificare urmează ordinea în care se închide documentația unui echipament: completitudinea dosarului tehnic pe module (Tabelul E.1), conținutul declarației UE de conformitate și verificările finale dinaintea aplicării marcajului CE.

E.1 Documentația tehnică pe module

Tabelul E.1. Documentația tehnică pe module: lista de verificare.

Modul	Conținut verificat	✓
A. Descriere generală și identificare	Descrierea mașinii, funcțiile, limitele, configurația, vederi de ansamblu	☐
B. Desene, scheme și date de proiectare	Ansamblu general, subansambluri, piese critice; scheme electrice, pneumatice și hidraulice; lista de materiale	☐
C. Evaluarea riscurilor	Registrul de riscuri (Anexa D), măsurile de reducere aplicate, riscul rezidual	☐
D. Calcule, verificări și teste	Calculele de dimensionare, rapoartele de test, validarea funcțiilor de siguranță	☐
E. Informații pentru utilizator	Instrucțiunile de utilizare, inclusiv în format digital, marcajele și avertizările	☐
F. Legislație, standarde și specificații	Actele normative și standardele aplicate, cu edițiile; părțile aplicate, dacă aplicarea este parțială	☐
G. Înregistrări de verificare și validare	Protocoalele FAT/SAT (Anexa B), lista de neconformități închisă, revizia „as-built”	☐

E.2 Declarația UE de conformitate: cele 10 elemente (Anexa V, Partea A)

☐ (1) identificarea mașinii: produs, tip, model, lot sau număr de serie;

☐ (2) numele și adresa producătorului și, după caz, ale reprezentantului autorizat;

☐ (3) pentru mașinile de ridicat instalate permanent, adresa locului de utilizare (dacă este cazul);

☐ (4) mențiunea că declarația este emisă pe răspunderea exclusivă a producătorului;

☐ (5) obiectul declarației, descris astfel încât să permită trasabilitatea, inclusiv o imagine, dacă este necesară;

☐ (6) legislația de armonizare a Uniunii cu care produsul este declarat conform;

☐ (7) referințele standardelor armonizate sau ale specificațiilor comune aplicate; părțile aplicate, dacă aplicarea este parțială;

☐ (8) datele organismului notificat și ale certificatului, dacă este cazul;

☐ (9) mențiunea privind procedura de control intern al producției, dacă este cazul;

☐ (10) informații suplimentare; locul și data emiterii; numele, funcția și semnătura persoanei care semnează în numele producătorului.

E.3 Înainte de aplicarea marcajului CE

☐ procedura de evaluare a conformității a fost stabilită corect pentru categoria mașinii (§10.7);

☐ documentația tehnică corespunde reviziei „as-built” și are o matrice de completitudine față de Anexa IV;

☐ toate funcțiile de siguranță sunt validate (Tabelul D.3);

☐ instrucțiunile sunt disponibile în limba cerută în statul de utilizare;

☐ declarația UE de conformitate este semnată și însoțește mașina;

☐ marcajul CE și plăcuța de identificare sunt aplicate conform regulilor de marcare.

Glosar consolidat

Glosarul reunește termenii și acronimele definite în glosarele de început ale capitolelor. Pentru termenii definiți în mai multe capitole se păstrează definiția cea mai completă, iar coloana „Cap.” indică toate capitolele în care termenul este definit. Simbolurile mărimilor sunt reunite separat, în Lista simbolurilor.

Termen	Definiție	Cap.
21 CFR Part 11	Reglementare FDA pentru anumite înregistrări electronice și semnături electronice. Se aplică atunci când sunt utilizate înregistrări electronice în domeniul cerințelor FDA/predicate rules; cerințele concrete depind de context.	6, 12
AAS (Asset Administration Shell)	Reprezentare digitală standardizată a unui activ industrial. IEC 63278-1:2023 definește structura AAS; metamodelul, API-urile și Submodel Templates sunt dezvoltate în specificațiile IDTA. Nu există o listă universală de șase submodele obligatorii pentru orice activ.	1, 13
Acțiune	Comportament asociat unei etape. În implementările SFC pot fi utilizați calificatori de acțiune; exemplele N, S, R, L, D și P sunt o punte spre software, nu o clasificare mecanică a actuatorului.	8
AHP	engl.: Analytic Hierarchy Process, proces de analiză ierarhică pentru decizii multicriteriale	2
AI / AO	Analog Input / Analog Output, semnale analogice continue, tipic 0-10 V sau 4-20 mA.	7
AIAG	Automotive Industry Action Group: organizație industrială care publică manuale, ghiduri și resurse de calitate pentru lanțul automotive; co-editor al AIAG & VDA FMEA Handbook.	11
AIAG-VDA 2019	AIAG–VDA FMEA: AIAG & VDA FMEA Handbook, 1st Edition; metodologia armonizată a fost publicată inițial în 2019, iar ediția curent comercializată de AIAG este prima ediție, a două tipărire. Ghidul acoperă Design FMEA, Process FMEA și Supplemental FMEA for Monitoring and System Response; aplicabilitatea contractuală se verifică pentru clientul/OEM relevant.	11
Alarm flooding	Situație în care numărul și dinamica alarmelor depășesc capacitatea operatorului de a le evalua și trata corect; se controlează prin raționalizare, prioritizare și monitorizarea performanței.	7
ALM/RM	engl.: Application Lifecycle Management / Requirements Management, gestionarea ciclului de viață al aplicației și a cerințelor	2
AMR	engl.: Autonomous Mobile Robot, robot mobil autonom, capabil să își adapteze traseul prin localizare și navigație	1
Anexa IV	Anexa Regulamentului (UE) 2023/1230 privind documentația tehnică: Partea A pentru mașini și produse asociate, Partea B pentru mașini parțial finalizate. Nu este lista categoriilor cu risc ridicat.	10
AP	Action Priority: prioritate H/M/L determinată din tabelele AIAG–VDA pe baza combinației S, O și D. AP indică necesitatea de a analiza/optimiza acțiunile; nu este o clasificare juridică a riscului și nu înlocuiește evaluarea de risc safety.	11
AUTO	Mod de operare automată în care secvența de producție se execută conform condițiilor și interblocărilor definite; funcțiile de siguranță rămân active conform arhitecturii.	8

Termen	Definiție	Cap.
Auto-certificare	Formulare informală pentru situațiile în care procedura aplicabilă permite controlul intern al producției; eligibilitatea se stabilește conform art. 25 și Anexei I, nu printr-un procent general de piață.	10
AutomationML (AML)	Format XML deschis standardizat în IEC 62714 pentru schimb de date de engineering între instrumente eterogene. Interoperabilitatea concretă depinde de profile, mapping și suportul fiecărui instrument.	13
B10 / B10d	B10 / B10d: cuantile de durată de viață. B10 indică punctul la care 10 % din populație a cedat în condițiile definite; B10d se referă la defectări periculoase și poate fi utilizat în estimarea MTTFd pentru componente relevante de safety, conform datelor producătorului și standardului aplicabil.	11
B10d	Număr de cicluri la care 10% din componentele electromecanice ating defectarea periculoasă.	9
B2MML	Business To Manufacturing Markup Language: reprezentare XML a modelelor ISA-95, utilizată pentru schimbul de informații între sisteme de manufacturing operations și business, în funcție de arhitectura implementată.	13
Bathtub Curve	Curba căzii de baie: reprezentare grafică a evoluției ratei de defectare în timp; cele trei zone uzuale sunt mortalitatea infantilă, viața utilă și uzura.	11
BDD	engl.: Block Definition Diagram, diagramă de definire a blocurilor în SysML	1
BGS	Background Suppression, capabilitate a senzorilor optici difuzi de a ignora reflexiile din spatele țintei.	6
BOM	Bill of Materials: listă structurată de materiale/componente pentru configurația controlată; conținutul și nivelul de detaliu depind de procesul organizației.	1, 2, 3, 7, 10
Buget timp ciclu	Descompunerea timpului total de ciclu pe faze ale procesului, cu identificarea fazelor care pot fi paralelizate; instrument de decizie mecanică privind cinematica și concurenta actuatorilor.	8
Burn-in	Burn-in: solicitare/operare controlată utilizată în anumite produse pentru screening-ul defectelor timpurii. Durata, nivelul de solicitare și oportunitatea burn-in-ului sunt dependente de tehnologie; nu există o durată universală aplicabilă mașinilor industriale.	11
C	Termen suplimentar al metodei ISO 13855, dependent de dispozitiv, rezoluție și geometria accesului; se preia din cazul normativ aplicabil.	9
CAD	engl.: Computer-Aided Design, proiectare asistată de calculator	2
Caiet de sarcini (Lastenheft)	Documentul redactat de beneficiar care definește ce trebuie realizat: cerințele funcționale și non-funcționale, independent de soluție; bază pentru ofertă și acceptare (în germană, Lastenheft).	8, 10
CAPEX	engl.: Capital Expenditure, cheltuieli de capital	2
Catena-X	Ecosistem și set de standarde pentru schimb suveran de date în lanțul valoric auto. Participarea poate rezultă din cerințe ale ecosistemului sau ale partenerilor comerciali, dar nu este o obligație juridică universală pentru întregul sector auto.	13
CC	Cerințele clientului, etichetă didactică locală pentru zona QFD; a nu se confunda cu marcajul CE.	2
CCF	Common Cause Failure, defectări ale mai multor canale generate de aceeași cauză. ISO 13849-1 cere măsuri sistematice împotriva CCF; nu se reduce la un singur factor β.	9
Ciclogramă	Diagramă timp–mișcare care reprezintă evoluția temporală a actuatorilor sau fazelor unui ciclu de producție; instrument utilizat pentru analiza concurenței, timpului de ciclu și posibilelor conflicte de mișcare.	8
Cleanroom	Cameră curată clasificată în funcție de concentrația particulelor și de cerințele procesului. Clasa și activitățile de calificare/monitorizare sunt determinate de aplicație și de standardele/reglementările sectoriale.	12
CMM	engl.: Coordinate Measuring Machine, mașină de măsurat în coordonate	1
CNC	engl.: Computer Numerical Control, comandă numerică computerizată	1

Termen	Definiție	Cap.
Cobot	Robot/aplicație colaborativă industrială: cerințele actuale sunt tratate în ISO 10218-1:2025 și ISO 10218-2:2025; ISO/TS 15066:2016 rămâne o referință suplimentară pentru colaborare.	9
Companion Specification	Model de informație OPC UA standardizat pentru un domeniu sau o clasă de echipamente; standardizează tipuri, semantică și relații, fără a impune aceleași NodeId-uri locale tuturor instanțelor.	7
Companion Specifications	Modele informaționale OPC UA standardizate pentru domenii/echipamente specifice; reduc ambiguitatea semantică și munca de mapping atunci când furnizorii implementează aceeași specificație.	13
Condition monitoring	Monitorizarea stării unui item prin măsurarea/observarea unor parametri relevanți (de exemplu vibrații, temperatură, curent, presiune), continuu sau periodic, pentru detectarea și urmărirea degradării.	11
CPS	engl.: Cyber-Physical System, sistem ciber-fizic	1
CPU	Central Processing Unit, unitatea de procesare a PLC-ului care execută programul utilizator.	7
CUM	Soluțiile tehnice prin care furnizorul răspunde cerințelor	2
Cv / Kv	Coeficienți tradiționali de debit. Pentru dimensionare riguroasă a componentelor pneumatice se preferă caracteristicile declarate conform ISO 6358 (conductanță sonică C și raport critic b / parametri echivalenți de catalog).	5
Cyber Resilience Act	Regulamentul (UE) 2024/2847 privind cerințele orizontale de cybersecurity pentru produsele cu elemente digitale; obligațiile de raportare din art. 14 se aplică de la 11 septembrie 2026, iar regulamentul se aplică în principal de la 11 decembrie 2027 [143].	9
DC	Diagnostic Coverage, fracția defectelor periculoase detectate de monitorizare.	9
Derating	Utilizarea unei componente la un nivel de solicitare inferior limitei nominale, atunci când datele de catalog, mediul și mecanismul de degradare justifică această practică. Factorul de derating este specific tehnologiei și aplicației.	11
Detecție (D)	Rating al capacității controalelor curente de a detecta cauza sau modul de defectare la timp. Scala exactă și criteriile se iau din metodologia FMEA utilizată.	11
DfM	Design for Maintainability: proiectarea pentru mentenabilitate; în acest capitol abreviată DfM. Termenul trebuie distins de Design for Manufacturing, abreviat frecvent tot DfM în alte contexte.	3, 11
DfR	Design for Reliability: integrarea cerințelor de fiabilitate în arhitectură, dimensionare, selecția componentelor, analiza defectărilor, verificare și feedback din exploatare, pentru atingerea cerințelor de reliability ale misiunii; obiectivul nu este „maximizarea MTBF” în mod izolat.	11
DI / DO	Digital Input / Digital Output, semnale digitale binare 24V DC tipic în industrie.	7
Digital Model	Reprezentare digitală a unui obiect/sistem fără sincronizare automată obligatorie cu obiectul fizic. În taxonomia frecvent citată a lui Kritzinger et al., schimbul de date dintre fizic și digital este manual.	13
Digital Shadow	Reprezentare digitală cu flux automat de date predominant Fizic → Digital, în sensul taxonomiei Digital Model / Digital Shadow / Digital Twin din literatura de manufacturing. Nu este, prin el însuși, un «nivel 2» standardizat de maturitate.	13
Digital Thread	Continuitate și trasabilitate a datelor/artefactelor digitale între faze și sisteme ale ciclului de viață. ISO 23247-5:2026 tratează explicit rolul Digital Thread în conectarea și managementul Digital Twin-urilor în manufacturing.	13
Digital Twin (DT)	Reprezentare digitală structurată a unui activ/sistem, menținută prin date și modele pe durata ciclului de viață. Un digital twin poate susține Virtual Commissioning, dar nu este în mod automat un «nivel 3» obligatoriu sau o configurație cu fidelitate maximă.	12, 13
Disponibilitate	Availability (A): probabilitatea sau fracția de timp în care itemul este în stare să funcționeze când este solicitat. Relația MTBF/(MTBF+MTTR) este o formă simplificată pentru disponibilitatea staționară a unui model reparabil; disponibilitatea operațională poate include mentenanță planificată și întârzieri logistice.	11

Termen	Definiție	Cap.
DN	Diametru Nominal: diametrul interior al unei conducte sau al unei secțiuni de trecere într-un component, conform ISO.	5
DoC	Declarația UE de conformitate (EU Declaration of Conformity): modelul pentru mașini/produse asociate este în Anexa V, Partea A și conține 10 elemente, unele condiționale.	10
Documentație digitală	Furnizarea digitală a instrucțiunilor/informațiilor și, după caz, a declarației, în condițiile Regulamentului (UE) 2023/1230 privind accesul, descărcarea/tipărirea și disponibilitatea în timp.	10
Dosar tehnic	Ansamblul informațiilor care demonstrează conformitatea. În Regulamentul (UE) 2023/1230, conținutul legal este în Anexa IV, Partea A; gruparea A–G din capitol este didactică. Păstrare: cel puțin 10 ani conform obligațiilor producătorului.	10
DP	engl.: Design Parameter, parametru de proiectare în metodologia Axiomatic Design	1
DPP (Digital Product Passport)	Pașaport digital al produsului prevăzut de cadre UE precum ESPR, cu seturile de date și calendarul stabilite prin acte specifice grupelor de produse. Pentru bateriile LMT, bateriile industriale cu capacitate >2 kWh și bateriile pentru vehicule electrice, Battery Passport se aplică de la 18 februarie 2027 conform Regulamentului (UE) 2023/1542.	10, 13
DRY RUN	Rulare de test fără produs sau cu condiții simulate, utilizată atunci când proiectul o prevede pentru verificarea secvenței și a timpilor; condițiile de siguranță rămân cele definite pentru mașină.	8, 12
E-STOP	Emergency stop, funcție de siguranță, nu mod normal de operare. Trebuie să aibă prioritate față de comenzile de proces și să conducă la reacția sigură definită prin evaluarea riscului.	8, 9
ECAD	Electrical Computer-Aided Design, software pentru proiectarea și gestionarea documentației electrotehnice; complementar, nu alternativ în sens funcțional, față de MCAD.	10
ECLASS	Standard de date de referință și dicționar semantic pentru clasificarea și descrierea neambiguă a produselor și serviciilor. Conceptele și proprietățile ECLASS au identificatori semantici reutilizabili în AAS; ECLASS nu este un catalog universal de componente fizice.	13
ECO	Engineering Change Order: autorizația/ordinul controlat de implementare a modificării aprobate, cu identificarea configurației, documentelor și verificărilor afectate.	12
ECR	Engineering Change Request: solicitare formală de modificare care descrie necesitatea, domeniul și motivele schimbării și declanșează analiza impactului.	2, 12
EEMUA 191	EEMUA Publication 191, Edition 4 (2024), ghid de bună practică pentru filosofia, proiectarea, operarea și îmbunătățirea sistemelor de alarmare.	7
EHSR	Essential Health and Safety Requirements, cerințele esențiale de sănătate și securitate din Anexa III a Regulamentului (UE) 2023/1230.	10
EMC	Electromagnetic Compatibility, capabilitatea unui echipament de a funcționa corect în prezența perturbațiilor electromagnetice.	6
EOL	engl.: End-of-Line, testare finală realizată la capătul liniei de fabricație	1
EPLAN	Platformă CAD/CAE pentru proiectarea electrică. Schimbul de date cu mediul PLC poate fi automatizat în anumite configurații și fluxuri de lucru, dar trebuie verificat pentru instrumentele și versiunile concrete.	7
EPLAN Electric P8	Platformă ECAD orientată pe date; poate genera scheme și rapoarte precum BOM, liste de dispozitive, diagrame de borne și liste de cabluri, în funcție de configurarea proiectului.	10
ERP	Enterprise Resource Planning, sistem software pentru planificarea și administrarea resurselor întreprinderii: comenzi, financiar, logistică, materiale, resurse umane și alte funcții de business.	2, 7, 13
Etapa	Element al GRAFCET care reprezintă o situație a părții secvențiale; etapa poate fi activă sau inactivă și poate avea asociate una sau mai multe acțiuni. Nu implică obligatoriu o configurație mecanică statică.	8

Termen	Definiție	Cap.
EtherCAT	EtherCAT, tehnologie Industrial Ethernet cu procesare on-the-fly și sincronizare distribuită, utilizată frecvent în aplicații motion și I/O cu cerințe temporale ridicate.	5, 7
EtherNet/IP	EtherNet/IP, tehnologie Industrial Ethernet bazată pe Common Industrial Protocol (CIP), cu profile pentru I/O, motion și safety în ecosistemul ODVA.	7
EUR-Lex	Baza de date oficială a UE: legislație, jurisprudență, hotărâri; accesibilă gratuit la eur-lex.europa.eu; cuprinde și lista standardelor armonizate cu referință în OJEU.	10
Euromap 77/83	Specificații OPC UA pentru industria maselor plastice: EUROMAP 83 definește tipuri comune, iar EUROMAP 77 (OPC 40077) definește schimbul de date între mașină de injecție și MES.	13
Evaluarea conformității după modificare substanțială	Pentru o modificare substanțială, persoana fizică sau juridică ce o realizează este considerată producător pentru echipamentul afectat, în condițiile art. 18, și aplică procedura relevantă de evaluare a conformității prevăzută la art. 25. „Re-certificare CE” nu este termenul juridic utilizat de Regulament, iar implicarea unui organism notificat nu este automată [28].	12
F-CPU	engl.: Failsafe CPU, controler sau CPU certificat pentru executarea funcțiilor de siguranță conform arhitecturii producătorului și nivelului cerut; redundanța internă nu este o proprietate universală.	2, 7, 9
Fail-safe state	Starea sigură în care echipamentul trece la pierderea alimentării sau la trigger safety.	9
FAT	Factory Acceptance Test: test de acceptanță executat la producător, înainte de expediere, pentru a demonstra conformitatea echipamentului/automatizării cu specificația aplicabilă. Domeniul, martorii, criteriile și livrabilele sunt stabilite prin contract și planul de test.	1, 2, 8, 10, 12
FAT / SAT	engl.: Factory Acceptance Test / Site Acceptance Test, test de acceptanță la furnizor, respectiv la amplasamentul beneficiarului.	7
FDA	U.S. Food and Drug Administration, agenția americană de reglementare alimentară și farmaceutică; cerințe specifice pentru echipamente livrate în piața SUA.	10
FEM	metoda elementelor finite, analiză numerică structurală, modală, termică sau la oboseală	3
FFT	Fast Fourier Transform: algoritm de descompunere a unui semnal temporal în spectru de frecvențe; folosit pentru analiza vibrațiilor.	11
Fiabilitate (Reliability)	Capacitatea unui item de a îndeplini funcția cerută în condițiile specificate pe durata considerată. În model probabilistic, R(t) este probabilitatea ca timpul până la defectare să depășească t; R(t) este o proprietate a modelului/populației, nu eticheta „perfect/defect” a unui singur echipament.	11
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis: metodă sistematică de identificare proactivă a modurilor de defectare potențiale și a efectelor lor, înainte de apariția defectului.	1, 11
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis: extindere a FMEA prin evaluarea criticității. Criticality analysis poate utiliza metode calitative sau cantitative adecvate contextului; nu se reduce universal la un produs „severitate × probabilitate”.	11
FR	engl.: Funcțional Requirement, cerință funcțională în metodologia Axiomatic Design	1
FRL	engl.: Filter–Regulator–Lubricator, ansamblu de filtrare, reglare și, numai dacă aplicația o cere, lubrifiere a aerului la punctul de utilizare.	5
FS / FSO	engl.: Full Scale / Full Scale Output, scala completă / ieșirea la capăt de scală. O specificație de tip ±0,1 % FS se raportează la domeniul nominal complet, nu la valoarea instantanee măsurată.	6
FSE	Functional Safety Engineer, rol/titulatură profesională utilizată în industrie; există scheme de certificare oferite de organisme diferite, dar nu reprezintă o cerință normativă unică.	9

Termen	Definiție	Cap.
Ft / Fu	Forță teoretică / forță utilă. $F_t = p \cdot A$; F_u se stabilește la presiunea minimă disponibilă și ține seama de frecare, contrapresiune, dinamică și marja de proiectare.	5
GMP	engl.: Good Manufacturing Practice, bune practici de fabricație. Cerințele privind aerul care intră în contact cu produsul se stabilesc prin analiza procesului și cerințele de calitate aplicabile; GMP nu impune o singură clasă ISO 8573 universală.	5, 10, 12
GMR	Giant Magneto-Resistance, efect fizic utilizat în senzorii magnetici moderni de poziție pe cilindri.	6
Grafcet	GRAphe Fonctionnel de Commande Étape-Transition, limbaj de specificație standardizat prin IEC 60848 pentru descrierea comportamentului secvențial prin etape, tranziții, receptivități și acțiuni.	8
Handshake	Schimb de semnale sau mesaje de stare între echipamente adiacente într-o linie de producție, de exemplu, confirmarea că un echipament este gata să primească ori să transfere o piesă. Este un element important al integrării la SAT; forma concretă depinde de arhitectura de control și de interfața proiectată.	12
Hardstop mecanic	Limitator fizic (bloc metalic, opritor) care împiedică mișcarea sub control electronic.	9
HFT / SFF	Hardware Fault Tolerance / Safe Failure Fraction, concepte de integritate hardware utilizate în cadrul funcțional-safety; aplicarea exactă urmează IEC 62061 și arhitectura concretă.	9
HIL	Hardware-in-the-Loop: configurație în care hardware-ul real de control este conectat la un plant simulat, cu interfețe de I/O și comunicație adecvate. Permite verificarea timing-ului și a integrării hardware-software.	12
HMI	engl.: Human-Machine Interface, interfața operator–mașină pentru stare, comandă, diagnostic, rețete și alarme; funcțiile de siguranță nu se substituie prin controale software obișnuite.	1, 2, 6, 7
HOME	Secvență sau stare de referențiere prin care axele/actuatoarele sunt aduse în configurații cunoscute atunci când aplicația o cere; necesitatea și strategia depind de tipul mecanismului și de informația de poziție disponibilă.	8
IBD	engl.: Internal Block Diagram, diagramă internă de blocuri în SysML	1
IDTA	Industrial Digital Twin Association: organizație care publică și întreține specificații AAS, Submodel Templates, ghiduri și resurse de implementare.	13
IEC 61131-3	IEC 61131-3:2025, standard pentru limbajele controlerelor programabile: Structured Text (ST), Ladder Diagram (LD) și Function Block Diagram (FBD); SFC oferă elemente pentru structurarea programelor secvențiale.	7
IEC 62541	Familia de standarde pentru OPC Unified Architecture (OPC UA); IEC 62541-1:2025 prezintă conceptele, IEC 62541-2:2026 modelul de securitate, iar IEC 62541-3:2025 definește Address Space.	7
IEC 81346	Serie de standarde pentru structurarea sistemelor și desemnările de referință; nu se reduce la o listă universală de litere K, KM, F, S.	10
IEC 82079-1	IEC/IEEE 82079-1:2019, principii și cerințe generale pentru pregătirea informațiilor de utilizare ale produselor.	10
IIoT	Industrial Internet of Things, extensia conceptului IoT la mediu industrial: echipamente, senzori, actuatoare conectate.	13
Interlock	Interblocare, condiție care împiedică sau permite o acțiune în funcție de starea procesului. O interblocare de proces nu este automat o funcție de siguranță; aceasta din urmă se derivă din evaluarea riscului.	8
IO-Link	Interfață digitală punct-la-punct standardizată prin IEC 61131-9 pentru senzori și actuatoare compatibile, cu schimb bidirecțional de date, parametri și diagnostic.	5, 6
IODD	engl.: IO Device Description, set de fișiere asociat dispozitivului IO-Link, furnizat de producător, care descrie parametrii, datele de proces și diagnosticul; nu trebuie confundat cu memoria internă a senzorului.	5, 6

Termen	Definiție	Cap.
IoT / IIoT	Internet of Things / Industrial IoT: rețea de senzori și echipamente conectate la o platformă cloud sau edge pentru colectare și analiză de date.	11
IP	engl.: Ingress Protection, cod IEC 60529 pentru protecția carcasei împotriva accesului, corpurilor străine și apei. Se selectează în funcție de mediul real; pentru spălare la presiune se verifică explicit gradul și standardul aplicabil.	6
IPC	engl.: Industrial PC, calculator industrial care poate găzdui HMI, viziune, analiză sau, cu runtime real-time adecvat, chiar funcții de control; alegerea PLC/IPC se face din cerințele aplicației.	7
IQ / OQ / PQ	Installation / Operational / Performance Qualification: etape uzuale de calificare în mediile GMP. IQ verifică instalarea, OQ verifică funcționarea în domeniul definit, iar PQ demonstrează performanța în condiții reprezentative; amploarea lor este justificată prin risk assessment [190].	10, 12
IRDI	International Registration Data Identifier: schemă de identificare utilizată în dicționare/semantici industriale. În AAS v3, identificatorii sunt modelați generic; IRDI nu este obligatoriu pentru identificarea activului.	13
IRI	Internationalized Resource Identifier: formă de identificator utilizabilă pentru identificare globală și semantică. În AAS, globalAssetId este un Identifier; alegerea schemei concrete se face conform regulilor ecosistemului.	13
ISA-95	Standardul IEC 62264 pentru ierarhia funcțională a unei fabrici: nivel 0 (câmp) → nivel 4 (ERP).	7
ISA-95 / IEC 62264	Familie de standarde pentru integrarea enterprise-control și manufacturing operations management. Modelul de niveluri este funcțional, nu o regulă care impune o anumită tehnologie PLC/SCADA/MES/ERP.	13
ISO 7010	ISO 7010:2019, semne de securitate înregistrate; ediția are amendamente publicate, inclusiv Amd 11:2026 la data auditului. Se verifică simbolul și amendamentele aplicabile, nu se tratează standardul ca o listă generică de „pictograme de avertizare”.	10
ISO 9241	Familie de standarde pentru ergonomia interacțiunii om–sistem. ISO 9241-110:2020 tratează principiile de interacțiune, ISO 9241-112:2025 prezentarea informației, ISO 9241-115:2024 proiectarea interacțiunii și navigării, iar ISO 9241-410/420 dispozitivele fizice de intrare.	7
Jitter	Variația timpului efectiv de actualizare sau execuție față de valoarea nominală. Un jitter redus facilitează bugete temporale mai stricte, dar performanța controlului depinde de întregul lanț senzor–rețea–controler–actuator.	7
K	Parametru de viteză de apropiere selectat conform metodei aplicabile din ISO 13855:2024; nu există o singură valoare universală pentru toate configurațiile.	9
KISS	Keep It Simple: euristică de proiectare care favorizează soluțiile suficient de simple pentru cerința dată, fără complexitate inutilă; simplitatea nu prevalează asupra safety, performanței sau mentenabilității.	11
KPI	Key Performance Indicator: indicator cantitativ de performanță. Exemple industriale: OEE, MTBF, MTTR și rata de neconformitate; definiția și fereastra de calcul trebuie precizate.	13
LD / FBD / ST / SFC	IEC 61131-3:2025: Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD), Structured Text (ST); Sequential Function Chart (SFC) pentru structurarea secvențială. Instruction List (IL) aparține edițiilor anterioare și poate fi întâlnit în sisteme legacy.	7
Light curtain	Perdea optică de siguranță (AOPD/ESPE). Tipul IEC 61496 și rezoluția de detecție sunt caracteristici distincte și se selectează în funcție de funcția de protecție.	9
LOTO	Lockout/Tagout, termen utilizat în special în practica OSHA pentru controlul energiilor periculoase. ISO 14118 tratează proiectarea mijloacelor de prevenire a pornirii neașteptate și izolarea energiilor.	9
LVDT	Linear Variable Differential Transformer, traductor inductiv liniar pentru deplasări de precizie.	6

Termen	Definiție	Cap.
MANUAL	Mod de operare pentru diagnostic, reglaj sau intervenții controlate. Comenzile permise, vitezele și accesul depind de evaluarea riscului și de conceptul mașinii.	8
Manufacturing-X	Inițiativă pentru ecosisteme industriale de date interoperabile și suverane, susținută de industria și politica industrială germană/europeană; AAS este una dintre tehnologiile-cheie de interoperabilitate.	13
Marcaj CE	Marcaj prin care producătorul indică faptul că produsul este conform cu cerințele aplicabile ale legislației de armonizare a Uniunii care prevede aplicarea sa.	9, 10
MBSE	Model-Based Systems Engineering: abordare în care modelele sistemului sunt artefacte primare pentru specificare, arhitectură, analiză, verificare și trasabilitate; documentele pot fi derivate din model, în funcție de toolchain.	1, 13
MCAD	Mechanical Computer-Aided Design, software pentru modelare/proiectare mecanică 3D și generarea desenelor/BOM-urilor mecanice; poate fi integrat cu ECAD și PDM/PLM.	10
MES	Manufacturing Execution System: sistem software pentru managementul operațiunilor de producție între nivelul de control și sistemele enterprise. Integrarea cu echipamentele poate utiliza OPC UA sau alte interfețe standard/proprietare, în funcție de arhitectură.	2, 5, 6, 7, 12, 13
ML / AI	Machine Learning / Artificial Intelligence: metode de învățare automată și inteligență artificială aplicate datelor industriale pentru clasificare, predicție, diagnostic, optimizare sau suport decizional.	13
MOC	engl.: Management of Change, proces controlat pentru evaluarea, aprobarea și documentarea modificărilor tehnice sau funcționale.	7
Modificare substanțială	Reg. (UE) 2023/1230 art. 3 pct. (16): modificare fizică sau digitală, după introducerea pe piață sau punerea în funcțiune, neprevăzută/neplanificată de producător, care afectează siguranța printr-un pericol nou sau risc crescut și necesită măsurile de protecție specificate de definiție.	12
MQTT	Protocol publish/subscribe ușor pentru mesagerie. În IIoT poate completa OPC UA; nu este o alternativă semantic echivalentă deoarece OPC UA include și information modelling, servicii și profile.	13
MRP	engl.: Media Redundancy Protocol, mecanism de redundanță utilizat în anumite topologii PROFINET; timpul de recuperare și compatibilitatea se verifică pentru configurația concretă.	7
MTBF	Mean Time Between Failures: măsură medie pentru un item reparabil, definită împreună cu frontiera sistemului, populația, condițiile de utilizare și definiția defectării. Pentru estimări din date se precizează explicit timpul inclus și tratamentul cenzurărilor/opririlor.	2, 3, 8, 11
MTTF	Mean Time To Failure: timpul mediu până la defectare, utilizat în principal pentru itemi nereparabili sau atunci când analiza se oprește la prima defectare.	11
MTTFd	Mean Time To dangerous Failure, timpul mediu până la o defectare periculoasă.	9
MTTR	Abreviere utilizată în practică pentru mean time to repair sau mean time to restoration. Deoarece frontierele diferă între convenții, proiectul trebuie să precizeze dacă include detecția, diagnosticul, accesul, repararea, reglarea, revalidarea și/sau întârzierile logistice.	2, 8, 11, 12
NB	engl.: Notified Body, organism notificat	2
NC / NO	engl.: Normally Closed / Normally Open, stare normal închisă / normal deschisă a unui organ de comandă.	5, 6
Notified Body	Organism notificat desemnat pentru procedurile de evaluare a conformității pentru care legislația prevede intervenție terță. Necesitatea implicării sale se stabilește conform art. 25 și Anexei I.	9, 10
NRT / RT / IRT	Termeni utilizați în ecosistemul PROFINET pentru trafic necritic temporal, Real-Time și Isochronous Real-Time; performanța concretă depinde de configurația sistemului.	7

Termen	Definiție	Cap.
Obsolescence management	Management proactiv al riscului de ieșire din fabricație/suport al componentelor, prin monitorizarea lifecycle-ului, notificărilor PCN/EOL, alternativelor și stocurilor strategice. Duratele de viață sunt dependente de tehnologie și furnizor.	12
Ocurență (O)	Rating al frecvenței/ocurenței cauzei în metodologia FMEA selectată. Criteriile numerice se iau din tabelul oficial aplicabil (DFMEA/PFMEA) și din date proprii; nu se transferă universal între industrii.	11
OEE	engl.: Overall Equipment Effectiveness, indicator agregat, uzual exprimat ca Disponibilitate × Performanță × Calitate. Interpretarea țintelor se face în contextul procesului și al regulilor organizației; nu există un prag „world-class” normativ universal.	1, 6, 7, 8, 11, 12
OEM	engl.: Original Equipment Manufacturer, producătorul original al echipamentului sau produsului	1
OJEU / JOUE	Official Journal of the European Union / Jurnalul Oficial al UE, publicație oficială unde apar legislația și referințele standardelor armonizate.	10
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture: standard IEC 62541 pentru schimb de informații sigur, fiabil și independent de platformă, cu information models, client-server și PubSub. Nu înlocuiește automat MES, ERP sau guvernanța arhitecturii IT/OT.	1, 2, 7, 12, 13
OPC UA Robotics (OPC 40010-1)	OPC UA for Robotics: OPC 40010-1 / VDMA 40010, pentru integrare verticală și un model informațional standardizat al sistemelor robotice. Termenul «FX» nu trebuie confundat cu OPC UA Field eXchange.	13
OT / IT	engl.: Operațional Technology / Information Technology, domeniul sistemelor de control industrial, respectiv al sistemelor informatice; integrarea lor necesită segmentare și politici de acces.	7
PackML	PackML: model de stări și interfețe pentru mașini, dezvoltat în cadrul ISA-TR88.00.02. Implementarea utilizează stările, modurile și PackTags aplicabile arhitecturii mașinii; testarea se raportează la funcțiile implementate.	8, 12, 13
PdM	Predictive Maintenance: abordare de mentenanță care utilizează date de stare și, după caz, prognostics pentru a anticipa degradarea și a planifica intervenția; monitorizarea poate fi continuă sau periodică.	11
PDP	engl.: Pressure Dew Point, punct de rouă sub presiune; indicator al conținutului de apă din aerul comprimat.	5
PFHd	PFH, frecvența medie a defectării periculoase pe oră utilizată pentru cuantificarea performanței funcției de siguranță; terminologia exactă urmează ediția curentă a standardului.	9
PID	engl.: Proportional–Integral–Derivative, regulator proporțional–integral–derivativ	2
PII / PIQ	engl.: Process Image Input / Output, zone de memorie utilizate de multe PLC-uri pentru imaginea de proces a intrărilor și ieșirilor; accesul direct sau actualizările sincronizate pot exista în funcție de platformă.	7
PL	Performance Level, nivel discret a–e conform ISO 13849-1. Intervalele PFH sunt: PL a: 10^{-5}…$<10^{-4}$ 1/h; PL b: 3×10^{-6}…$<10^{-5}$; PL c: 10^{-6}…$<3\times10^{-6}$; PL d: 10^{-7}…$<10^{-6}$; PL e: 10^{-8}…$<10^{-7}$.	7, 9
PL / PLr	engl.: Performance Level / required Performance Level, nivel de performanță / nivel de performanță cerut	2
PL achieved	PL atins de SRP/CS, demonstrat prin arhitectură, fiabilitate, acoperire diagnostică, măsuri CCF și cerințe sistematice/software conform ISO 13849-1.	9
PLC	engl.: Programmable Logic Controller, controler industrial pentru logică, secvențe, reglare și coordonarea I/O; platformele moderne pot combina task-uri ciclice, periodice, de eveniment, motion și siguranță funcțională.	1, 2, 5, 6, 7
PLM	engl.: Product Lifecycle Management, gestionarea ciclului de viață al produsului	2
PLr	Required Performance Level (PLr), nivelul cerut pentru o funcție de siguranță, determinat prin evaluarea riscului și, când există, prin standardul de tip C aplicabil.	9

Termen	Definiție	Cap.
PNP / NPN	Tipuri de ieșire tranzistorizată. PNP (sourcing) comută potențialul pozitiv către sarcină; NPN (sinking) comută către 0 V. Alegerea se face după arhitectura intrărilor I/O și convențiile proiectului, nu după o regulă geografică normativă.	6
PQ	Performance Qualification: etapă de calificare a performanței utilizată în contexte reglementate, în special GMP, pentru a demonstra performanța reproductibilă în condițiile definite. Conținutul și succesiunea față de IQ/OQ se stabilesc prin strategia de calificare și evaluarea de risc.	12
Proces-verbal recepție	Document contractual de acceptanță/handover semnat de părți. Efectele asupra transferului de risc, garanției și responsabilității rezultă din contract și din legislația aplicabilă; obligația de păstrare a documentației CE nu începe automat prin simpla semnare a SAT.	12
PROFINET	Tehnologie de comunicație industrială bazată pe Ethernet, utilizată pentru schimbul de date între controlere și echipamente periferice, precum drive-uri, I/O distribuite și HMI. Profilurile, clasele de conformitate și opțiunile implementate depind de aplicație.	5, 7, 12
PROFIsafe / FSoE / CIP Safety	Protocoale safety peste PROFINET / EtherCAT / EtherNet/IP; mecanismele de detecție a erorilor (de exemplu CRC, secvență, temporizare și identificatori) sunt specifice profilului.	9
Punchlist	Listă controlată de neconformități și observații identificate la FAT/SAT. Clasificarea A/B/C este o convenție contractuală frecventă, nu o clasificare impusă universal de IEC 62381.	12
Punchlist Cat. A	Categorie contractuală pentru puncte blocante, dacă proiectul adoptă schema A/B/C. Criteriul exact de blocare a expedierii trebuie definit în contract/protocol.	12
Punchlist Cat. B	Categorie contractuală pentru puncte importante care pot permite expedierea condiționată numai dacă părțile au stabilit explicit această regulă și un plan de închidere.	12
Punchlist Cat. C	Categorie contractuală pentru observații minore/cosmetice/documentare, cu termen de închidere stabilit de părți.	12
QFD	engl.: Quality Function Deployment, metodă de transpunere structurată a cerințelor clientului în caracteristici tehnice; „Casa Calității” este instrumentul său reprezentativ	1, 2
QMS	Quality Management System, sistemul de management al calității organizației; poate include controlul documentelor, aprobările, arhivarea și trasabilitatea declarațiilor și a dosarelor.	10
RAMI 4.0	Reference Architecture Model Industrie 4.0: model tridimensional Layers × Hierarchy Levels × Life Cycle, consacrat prin DIN SPEC 91345. IEC PAS 63088:2017 a descris modelul la nivel internațional, dar a fost retras în 2024.	13
Ramp-up	Perioadă post-instalare de stabilizare a producției și transfer de cunoștințe. Durata, prezența furnizorului și criteriile de ieșire sunt proiect-specifice.	12
RAR	Risk Assessment Report, documentul cu evaluarea riscului conform ISO 12100.	9
Rata de defectare	λ (lambda): număr de defecțiuni pe unitate de timp, λ = 1 / MTBF (pentru distribuție exponențială). Folosită în formula $R(t) = e^{-\lambda t}$.	11
RCM	Reliability-Centred Maintenance: proces structurat pentru dezvoltarea politicilor de failure management/mentenanță pornind de la funcții, defectări funcționale, consecințe și task-uri aplicabile și eficace.	11
Receptivitate	Condiția logica asociata unei tranziții Grafcet; poate combina semnale de intrare, temporizatoare și starea altor etape.	8
Reg. 2023/1230	Regulamentul (UE) 2023/1230 privind mașinile; se aplică, în principal, de la 20 ianuarie 2027 și înlocuiește Directiva 2006/42/CE.	10
RFQ	engl.: Request for Quotation, cerere de ofertă	2
RMS	engl.: Root Mean Square, valoare eficace	2

Termen	Definiție	Cap.
RPN	Risk Priority Number: produs S × O × D folosit în metodologia clasică AIAG. În AIAG–VDA 2019, RPN este înlocuit în formularul recomandat de Action Priority; RPN rămâne întâlnit în alte metodologii FMEA și în sisteme legacy.	11
Run-at-rate	Test de producție continuă la rata/cadența convenită, pe o durată și cu un mix de produse stabilite contractual. Scopul este demonstrarea stabilității și a performanței, nu atingerea unei durate universale.	12
S = K·T + C	Relație de bază utilizată în metodele de separare din ISO 13855. Parametrii și eventualele corecții depind de geometria apropierii și de tipul protecției.	9
SAP	Stația de Asamblare prin Presare, studiul de caz integrativ utilizat în carte	1, 2
SAT	Site Acceptance Test: test de acceptanță după instalarea la amplasamentul utilizatorului. Verifică funcționarea în condițiile reale de utilități, integrarea cu echipamentele și sistemele adiacente și criteriile contractuale care nu pot fi demonstrate complet la FAT.	1, 2, 3, 8, 10, 12
SAT / FAT	Site / Factory Acceptance Test, etape de acceptanță la beneficiar / producător care pot include teste de siguranță; nu înlocuiesc validarea cerută de standardele de siguranță funcțională.	9
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition: sistem de supraveghere și achiziție de date la nivel de instalație/fabrică. Poate integra mai multe echipamente prin OPC UA, protocoale industriale sau driveruri proprietare, în funcție de arhitectură.	7, 12, 13
SE / DE	engl.: Single Acting / Double Acting, cilindru cu simplă acțiune / cu dublă acțiune.	5
SETUP	Mod de configurare/reglare pentru rețete, calibrare sau teste. Drepturile de acces, vitezele și funcțiile permise se stabilesc din sarcină, evaluarea riscului și cerințele beneficiarului.	8
Severitate (S)	Rating al gravității efectului în metodologia FMEA selectată. În AIAG–VDA se utilizează criterii pe o scară 1–10; valoarea se atribuie din tabelul oficial aplicabil efectului analizat, nu dintr-o descriere generică.	11
SFC	engl.: Sequential Function Chart, formalism de structurare secvențială utilizat în IEC 61131-3. Este înrudit conceptual cu GRAFCET, dar nu trebuie tratat drept identic normativ cu IEC 60848.	8
SIL	Safety Integrity Level, nivel de integritate a siguranței utilizat în cadrul IEC 61508/IEC 62061. Pentru sistemele de comandă legate de siguranță ale mașinilor, IEC 62061 utilizează SIL 1–3. PL și SIL sunt cadre distincte; intervalele PFH pot fi comparate, dar etichetele nu sunt interschimbabile automat.	1, 7, 9, 12
SIL / maximum SIL	SIL (Safety Integrity Level) exprimă nivelul de integritate cerut/realizat pentru o funcție de siguranță. IEC 62061:2021 a înlocuit terminologia SILCL cu „maximum SIL” pentru capabilitatea unui subsistem; SILCL poate apărea în documentație legacy.	7
SISTEMA	Software IFA pentru evaluarea SRP/CS conform ISO 13849-1. SISTEMA 3.x este asociat ediției ISO 13849-1:2023.	9
SLA	Service Level Agreement: contract între furnizor și client care definește nivelurile garantate de disponibilitate, timp de răspuns la intervenție etc.	11
SMART	Mnemonică adaptată în acest volum: Specifică, Măsurabilă, Acceptată, Realizabilă, Trasabilă	2
Sn	Distanța de acțiune nominală (Sensing distance): distanța la care un senzor de proximitate detectează țintă de referință în condiții standard.	6
Specificație tehnică de realizare (Pflichtenheft)	Răspunsul tehnic al furnizorului la caietul de sarcini: descrie cum va fi satisfăcută fiecare cerință, arhitectură, componente, calcule, interfețe, parametri și metode de verificare (în germană, Pflichtenheft).	8, 10
SPM	engl.: Special Purpose Machine, echipament cu destinație specială, proiectat și construit la comandă	1
SRP/CS	engl.: Safety-Related Parts of Control Systems, părți ale sistemului de comandă care realizează funcții de siguranță, în sensul ISO 13849.	7

Termen	Definiție	Cap.
Standard Tip A	Standard de bază pentru concepte, principii de proiectare și aspecte generale; ISO 12100 este reperul fundamental pentru evaluarea și reducerea riscului la mașini.	10
Standard Tip B	Standard generic care tratează un aspect de siguranță sau un tip de mijloc/dispozitiv de protecție aplicabil mai multor categorii de mașini.	10
Standard Tip C	Standard cu cerințe de siguranță pentru o categorie specifică de mașini; are prioritate pentru aspectele tratate atunci când cerințele sale diferă de cele Tip A/B.	10
Standarde armonizate	Standarde ale căror referințe sunt publicate în Jurnalul Oficial al UE; aplicarea lor poate conferi prezumția de conformitate pentru cerințele acoperite.	10
Stop Cat. 0	Oprire prin întrerupere imediată a alimentării actuatoarelor (IEC 60204-1 §9.2.2).	9
Stop Cat. 1	Oprire controlată (decelerare programată) urmată de întreruperea alimentării.	9
Stop Cat. 2	Oprire controlată cu energia disponibilă pentru actuatoare menținută; alegerea se justifică prin funcție și evaluarea riscului.	9
SysML	Systems Modeling Language (OMG). SysML 1.7 rămâne relevant în toolchain-uri legacy; SysML v2.0, adoptat final în 2025, adaugă semantică îmbunătățită, sintaxă textuală și API-uri standardizate.	1, 13
T	Timp total de oprire/răspuns relevant pentru calculul distanței de separare; include detectarea, procesarea, acționarea și oprirea mișcării periculoase și se verifică prin măsurare.	9
T-slot	interfață de fixare pentru profile extrudate; compatibilitatea accesoriilor se verifică pe seria și geometria canalului	3
TCO	Total Cost of Ownership: costul total al deținerii unui echipament pe întreaga durată de viață, inclusiv mentenanța, energia, instruirea și piesele de schimb.	11
Technical File	Termen utilizat curent în industrie pentru documentația tehnică; în Regulamentul (UE) 2023/1230 se utilizează noțiunea de technical documentation.	10
Third-party assessment	Evaluare a conformității cu implicarea unui organism notificat, atunci când procedura prevăzută de legislație o cere.	10
ToF	Time-of-Flight, măsurare de distanța prin timpul de zbor al unui semnal (acustic, luminos, mecanic).	6
TPM	engl.: Tube Pressing Machine, echipamentul de presare a tubului utilizat ca exemplu recurent; corespondentul în limba română este SAP	1
Tranziție	Element GRAFCET care separă două situații; trecerea este posibilă când toate etapele imediat precedente sunt active și receptivitatea asociată este adevărată.	8
UKCA	Regim de marcare/conformitate pentru piața Regatului Unit, supus regulilor britanice în vigoare la data introducerii pe piață; nu trebuie tratat ca un simplu „echivalent funcțional” universal al CE.	10
UMATI	engl.: universal machine technology interface, comunitate și marcă de interoperabilitate pentru promovarea unei implementări coerente a OPC UA în construcția de mașini; nu este ea însăși o specificație OPC UA.	7
URS	engl.: User Requirements Specification, specificația cerințelor utilizatorului	1
VDA	Verband der Automobilindustrie: asociația industriei auto germane; prin VDA QMC participă la dezvoltarea și publicarea ghidurilor de quality management, inclusiv handbook-ul FMEA armonizat cu AIAG.	11
VDI	germ.: Verein Deutscher Ingenieure, Asociația Inginerilor Germani	1
VDMA 40001	OPC UA for Machinery: OPC 40001-1 / VDMA 40001, cu building blocks generale pentru identificare, stări, moduri de operare, contoare și monitorizare, reutilizabile în Companion Specifications specifice domeniilor.	13
VFD	Variable Frequency Drive, convertizor de frecvența pentru motoare; sursa puternica de perturbații EMC.	6

Termen	Definiție	Cap.
Virtual Commissioning (VC)	Verificarea funcțiilor de automatizare prin conectarea sistemului de control, real sau simulat, la modele ale instalației înaintea sau în paralel cu commissioning-ul fizic. Beneficiul depinde de fidelitatea modelului, acoperirea testelor și reutilizarea modelelor.	12
VoC	engl.: Voice of the Customer, vocea clientului	2
Watchdog	Mecanism de supraveghere a timpului de execuție; depășirea limitei configurate declanșează reacția definită de platformă și proiect, de la diagnostic până la oprirea task-ului sau a controlerului.	7
Weibull β	Parametrul de formă al distribuției Weibull; $\beta < 1$ = rată descrescătoare (defectări timpurii), $\beta = 1$ = rată constantă, $\beta > 1$ = rată crescătoare (uzură).	11
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, asociația germană a industriei electrice și digitale, implicată în dezvoltarea ecosistemului Industrie 4.0 și RAMI 4.0.	13

Referințe bibliografice

[1] VDI/VDE 2206:2021, Development of mechatronic and cyber-physical systems. Düsseldorf: VDI/VDE, 2021.

[2] VDI 2221 Blatt 1:2019, Design of technical products and systems — Model of product design. Düsseldorf: VDI, 2019.

[3] ISO 13849-1:2023, Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.

[4] IEC 62061:2021+A1:2024+A2:2026, Safety of machinery — Functional safety of safety-related control systems. Geneva: International Electrotechnical Commission, consolidated edition 2.2, 2026.

[5] IEC 63278-1:2023, Asset Administration Shell for industrial applications — Part 1: Asset Administration Shell structure. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2023.

[6] IEC 62443 series, Security for industrial automation and control systems (multipart). Geneva: International Electrotechnical Commission.

[7] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. acatech/Forschungsunion, 2013.

[8] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, and K. Ueda, “Cyber-physical systems in manufacturing,” CIRP Annals, vol. 65, no. 2, pp. 621–641, 2016, doi:10.1016/j.cirp.2016.06.005.

[9] Plattform Industrie 4.0, Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) — An Introduction. Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2018.

[10] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Industry 5.0 — Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021.

[11] X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, “Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception,” Journal of Manufacturing Systems, vol. 61, pp. 530–535, 2021, doi:10.1016/j.jmsy.2021.10.006.

[12] ISO 10218-2:2025, Robotics — Safety requirements — Part 2: Industrial robot applications and robot cells. Geneva: International Organization for Standardization, 2025.

[13] ISO/TS 15066:2016, Robots and robotic devices — Collaborative robots. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.

[14] R. Isermann, Mechatronic Systems: Fundamentals. London: Springer, 2005, doi: 10.1007/1-84628-259-4.

[15] VDI/VDE 3694:2014, Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen (System requirement/specification for planning and design of automation systems). Düsseldorf: VDI/VDE, 2014.

[16] IEC 62381:2024, Automation systems in the process industry — Factory acceptance test (FAT), site acceptance test (SAT), and site integration test (SIT). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2024.

[17] I. Gräßler, D. Wiechel, D. Roesmann, and H. Thiele, "V-model based development of cyber-physical systems and cyber-physical production systems," in Procedia CIRP (31st CIRP Design Conference), 2021, pp. 253–258, doi:10.1016/j.procir.2021.05.119.

[18] J. Gausemeier and S. Moehringer, "New guideline VDI 2206 — A flexible procedure model for the design of mechatronic systems," in Proc. 14th International Conference on Engineering Design (ICED 03), Stockholm, Sweden, Aug. 19–21, 2003, full paper DS31_1149FPB.

[19] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote, Engineering Design: A Systematic Approach, 3rd ed. London: Springer, 2007, doi: 10.1007/978-1-84628-319-2.

[20] N. P. Suh, The Principles of Design. New York: Oxford University Press, 1990.

[21] INCOSE, Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2023.

[22] Object Management Group, OMG Systems Modeling Language (SysML), Version 2.0, formal specification, Sep. 2025.

[23] S. Friedenthal, A. Moore, and R. Steiner, A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language, 3rd ed. Morgan Kaufmann/Elsevier, 2014.

[24] IEC 60848:2013, GRAFCET specification language for sequential function charts. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013.

[25] ISO/IEC/IEEE 29148:2018, Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

[26] VDI 2519 Blatt 1:2001-12, Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften (Procedures for the compilation of tender and performance specifications). Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2001.

[27] ISO 12100:2010, Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

[28] Regulation (EU) 2023/1230 of the European Parliament and of the Council of 14 June 2023 on machinery and repealing Directive 2006/42/EC. Official Journal of the European Union, L 165, 29 Jun. 2023; applicable principally from 20 Jan. 2027.

[29] IEC 60204-1:2016+A1:2021, Safety of machinery — Electrical equipment of machines — Part 1: General requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2021.

[30] IEC 60529:1989+A1:1999+A2:2013, Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). Geneva: International Electrotechnical Commission.

[31] Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery. Official Journal of the European Union, L 157, 9 Jun. 2006.

[32] B. W. Boehm, Software Engineering Economics. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981.

[33] EN 1005-4:2005+A1:2008, Safety of machinery — Human physical performance — Part 4: Evaluation of working postures and movements in relation to machinery.

[34] EN 10025-2:2019, Hot rolled products of structural steels — Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels.

[35] ISO 12944-2:2017, Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Part 2: Classification of environments. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

[36] ISO 12944-5:2018, Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Part 5: Protective paint systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

[37] ISO 20816-3:2022, Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min. Geneva: International Organization for Standardization, 2022.

[38] ISO 1101:2017, Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

[39] Y. Akao, Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design. Cambridge, MA: Productivity Press, 1990.

[40] J. R. Hauser and D. Clausing, “The House of Quality,” Harvard Business Review, vol. 66, no. 3, pp. 63–73, May–Jun. 1988.

[41] ISO 286-1:2010, Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

[42] ISO 286-2:2010, Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

[43] ISO 5459:2024, Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Datums and datum systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.

[44] ISO 21920-1:2021, Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 1: Indication of surface texture. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.

[45] ISO 21920-2:2021, Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.

[46] ISO 14728-1:2017, Rolling bearings — Linear motion rolling bearings — Part 1: Dynamic load ratings and rating life. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

[47] ISO 281:2007, Rolling bearings — Dynamic load ratings and rating life. Geneva: International Organization for Standardization, 2007. Current published edition; revision in progress in 2026.

[48] HIWIN, Linear Guideway Technical Information, current technical catalogue/documentation, consulted 2026.

[49] THK, Load Rating and Nominal Life — Linear Motion Guides, current technical documentation, consulted 2026.

[50] ISO 15552:2018, Pneumatic fluid power — Cylinders with detachable mountings, 1 000 kPa (10 bar) series, bores from 32 mm to 320 mm — Basic, mounting and accessories dimensions. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

[51] IEC 81346-1:2022, Industrial systems, installations and equipment and industrial products — Structuring principles and reference designations — Part 1: Basic rules. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

[52] ISO 14738:2002, Safety of machinery — Anthropometric requirements for the design of workstations at machinery. Geneva: International Organization for Standardization, 2002; confirmed 2023.

[53] Directive 2003/10/EC of the European Parliament and of the Council of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise). Official Journal of the European Union, L 42, 15 Feb. 2003.

[54] Y. Altintas, C. Brecher, M. Weck, and S. Witt, “Virtual machine tool,” CIRP Annals, vol. 54, no. 2, pp. 115–138, 2005, doi:10.1016/S0007-8506(07)60022-5.

[55] A. F. Hobbacher and J. Baumgartner, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, 3rd ed., IIW Collection. Cham: Springer, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-57667-6.

[56] IEC 60364 series, Low-voltage electrical installations. Geneva: International Electrotechnical Commission; relevant parts selected according to the installation and protection function.

[57] IEC 61439 series, Low-voltage switchgear and controlgear assemblies. Geneva: International Electrotechnical Commission.

[58] IEC 60947-2:2024, Low-voltage switchgear and controlgear — Part 2: Circuit-breakers. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2024.

[59] Commission Regulation (EU) 2019/1781 of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for electric motors and variable speed drives, as amended, consolidated text. Official Journal of the European Union.

[60] IEC 61800-3:2022, Adjustable speed electrical power drive systems — Part 3: EMC requirements and specific test methods for PDS and machine tools. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

[61] IEC 60034-1:2026, Rotating electrical machines — Part 1: Rating and performance. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2026.

[62] B. K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

[63] IEC 60034-30-1:2025, Rotating electrical machines — Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.

[64] Y. Altintas, A. Verl, C. Brecher, L. Uriarte, and G. Pritschow, “Machine tool feed drives,” CIRP Annals, vol. 60, no. 2, pp. 779–796, 2011, doi:10.1016/j.cirp.2011.05.010.

[65] IEC 60034-7:2020, Rotating electrical machines — Part 7: Classification of types of construction, mounting arrangements and terminal box position (IM Code), with Corrigendum 1:2023. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.

[66] IEC 60072-1:2022, Rotating electrical machines — Dimensions and output series — Part 1: Frame numbers 56 to 400 and flange numbers 55 to 1080. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

[67] IEC 61800-5-1:2022, Adjustable speed electrical power drive systems — Part 5-1: Safety requirements — Electrical, thermal and energy. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

[68] F. Blaschke, “The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTOR closed-loop control system for rotating-field machines,” Siemens Review, vol. 39, no. 5, pp. 217–220, 1972.

[69] M. Depenbrock, “Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 3, no. 4, pp. 420–429, 1988.

[70] I. Takahashi and T. Noguchi, “A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, no. 5, pp. 820–827, 1986.

[71] Siemens AG, SINAMICS G120 List Manual, document 6SL3097-4AB10-0BP9. Erlangen: Siemens AG, 2023; parameter applicability to be checked against the hardware/firmware version used.

[72] IEC 61800-7 series, Adjustable speed electrical power drive systems — Part 7: Generic interface and use of profiles for power drive systems. Geneva: International Electrotechnical Commission.

[73] IEC 60947 series, Low-voltage switchgear and controlgear. Geneva: International Electrotechnical Commission.

[74] IEC 60898-1:2015+AMD1:2019 CSV, Electrical accessories — Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations — Part 1: Circuit-breakers for a.c. operation. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019.

[75] IEC 62423:2009, Type F and type B residual current operated circuit-breakers with and without integral overcurrent protection for household and similar uses. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009.

[76] IEC 61643-11:2025, Low-voltage surge protective devices — Part 11: Surge protective devices connected to AC low-voltage power systems — Requirements and test methods. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.

[77] ISO 20816-1:2016, Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 1: General guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.

[78] ISO 4414:2010, Pneumatic fluid power — General rules and safety requirements for systems and their components. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

[79] ISO 4413:2010, Hydraulic fluid power — General rules and safety requirements for systems and their components. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

[80] ISO 1219-1:2012+Amd.1:2016, Fluid power systems and components — Graphical symbols and circuit diagrams — Part 1: Graphical symbols for conventional use and data-processing applications. Geneva: International Organization for Standardization.

[81] ISO 1219-2:2012, Fluid power systems and components — Graphical symbols and circuit diagrams — Part 2: Circuit diagrams. Geneva: International Organization for Standardization, 2012.

[82] ISO 8573-1:2010, Compressed air — Part 1: Contaminants and purity classes. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

[83] ISO 6358-1:2013+Amd.1:2020+Amd.2:2026, Pneumatic fluid power — Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids — Part 1: General rules and test methods for steady-state flow. Geneva: International Organization for Standardization.

[84] ISO 11727:1999, Pneumatic fluid power — Identification of ports and control mechanisms of control valves and other components. Geneva: International Organization for Standardization, 1999.

[85] ISO 6020-2:2015, Hydraulic fluid power — Mounting dimensions for single rod cylinders, 16 MPa (160 bar) series — Part 2: Compact series. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

[86] ISO 6022:2006, Hydraulic fluid power — Mounting dimensions for single rod cylinders, 25 MPa (250 bar) series. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

[87] ISO 4406:2021, Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.

[88] R. Saidur, N. A. Rahim, and M. Hasanuzzaman, “A review on compressed-air energy use and energy savings,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 4, pp. 1135–1153, 2010.

[89] Atlas Copco, Compressed Air Manual, 9th ed., current online edition, accessed Sep. 2026.

[90] A. Parr, Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide, 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.

[91] ISO 21287:2004, Pneumatic fluid power — Cylinders — Compact cylinders, 1000 kPa (10 bar) series, bores from 20 mm to 100 mm. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.

[92] ISO 6099:2018, Fluid power systems and components — Cylinders — Identification code for mounting dimensions and mounting types. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

[93] IEC 61158-1:2023, Industrial communication networks — Fieldbus specifications — Part 1: Overview and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2023.

[94] PROFIBUS & PROFINET International (PI), PROFINET Technology and Application — System Description, English version 2018, online update posted Feb. 2024.

[95] EtherCAT Technology Group, EtherCAT Technology — official technology description, online documentation, accessed Sep. 2026.

[96] IEC 61131-9:2022, Programmable controllers — Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

[97] ISO 1219-3:2016, Fluid power systems and components — Graphical symbols and circuit diagrams — Part 3: Symbol modules and connected symbols in circuit diagrams. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.

[98] IEC 61298-2:2026, Process measurement and control devices — General methods and procedures for evaluating performance — Part 2: Tests under reference conditions. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2026.

[99] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, 5th ed. Cham: Springer, 2016.

[100] A. S. Morris and R. Langari, Measurement and Instrumentation: Theory and Application, 3rd ed. Academic Press, 2020.

[101] IO-Link Community, IO-Link Interface and System Specification, Version 1.1.5, released 2025.

[102] IEC 60947-5-2:2019, Low-voltage switchgear and controlgear — Part 5-2: Control circuit devices and switching elements — Proximity switches. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019.

[103] IEC 60947-5-7:2024, Low-voltage switchgear and controlgear — Part 5-7: Control circuit devices and switching elements — Proximity devices with analog output. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2024.

[104] HEIDENHAIN, Technical documentation for incremental and absolute encoders and EnDat interfaces, current product documentation, consulted Sep. 2026.

[105] Temposonics, Technical documentation for magnetostrictive linear position sensors, current product documentation, consulted Sep. 2026.

[106] Hottinger Brüel & Kjær (HBK), Technical documentation for strain-gauge load cells, amplifiers and force measurement chains, current product documentation, consulted Sep. 2026.

[107] Kistler Group, Technical documentation for piezoelectric force measurement and charge amplifiers, current product documentation, consulted Sep. 2026.

[108] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, and D. Dornfeld, "Advanced monitoring of machining operations," CIRP Annals, vol. 59, no. 2, pp. 717–739, 2010, doi:10.1016/j.cirp.2010.05.010.

[109] ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva: ISO/IEC, 2017.

[110] ISO 376:2011, Metallic materials — Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines. Geneva: International Organization for Standardization, 2011; confirmed 2026.

[111] IEC 60751:2022, Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

[112] IEC 60584-1:2013, Thermocouples — Part 1: EMF specifications and tolerances. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013.

[113] MVTec Software GmbH, HALCON documentation for industrial machine vision and calibration, current documentation, consulted Sep. 2026.

[114] European Machine Vision Association (EMVA), GenICam and machine-vision standardization resources, current documentation, consulted Sep. 2026.

[115] IEC 62264-1:2013, Enterprise-control system integration — Part 1: Models and terminology. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013.

[116] IEC 62541-1:2025, OPC unified architecture — Part 1: Overview and concepts. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.

[117] IEC 62443-4-2:2019, Security for industrial automation and control systems — Part 4-2: Technical security requirements for IACS components. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019; Corrigendum 1:2022.

[118] IEC 61131-3:2025, Programmable controllers — Part 3: Programming languages. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.

[119] W. Bolton, Programmable Logic Controllers, 6th ed. Oxford: Newnes/Elsevier, 2015.

[120] IEC 61508-1:2010, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems — Part 1: General requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.

[121] IEC 61784 series, Industrial networks — Profiles; including IEC 61784-3:2021+A1:2024 for functional safety fieldbuses. Geneva: International Electrotechnical Commission.

[122] ODVA, EtherNet/IP Technology Overview and current CIP technology documentation. Ann Arbor, MI: ODVA, current online edition, consulted Sep. 2026.

[123] IEC 62541-3:2025, OPC unified architecture — Part 3: Address Space Model. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.

[124] IEC 62541-2:2026, OPC unified architecture — Part 2: Security Model. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2026.

[125] OPC Foundation, OPC UA Online Reference and UA Companion Specifications, including OPC 40010-1 (Robotics), OPC 40100-1 (Machine Vision) and OPC 40501-1 (Machine Tools), current published specifications, consulted Sep. 2026.

[126] ISO 9241-110:2020, Ergonomics of human-system interaction — Part 110: Interaction principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.

[127] ISO 9241-420:2011, Ergonomics of human-system interaction — Part 420: Selection of physical input devices. Geneva: International Organization for Standardization, 2011.

[128] ISO 9241-112:2025, Ergonomics of human-system interaction — Part 112: Principles for the presentation of information. Geneva: International Organization for Standardization, 2025.

[129] ISO 9241-115:2024, Ergonomics of human-system interaction — Part 115: Guidance on conceptual design, user-system interaction design, user interface design and navigation design. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.

[130] ISO 9241-410:2008+Amd 1:2012, Ergonomics of human-system interaction — Part 410: Design criteria for physical input devices. Geneva: International Organization for Standardization.

[131] ISO 13850:2015, Safety of machinery — Emergency stop function — Principles for design. Geneva: International Organization for Standardization, 2015. Current published edition; revision initiated in 2026.

[132] EEMUA, Alarm systems — A guide to design, management and procurement, EEMUA Publication 191, 4th ed. London: Engineering Equipment and Materials Users Association, 2024.

[133] IEC 62682:2022, Management of alarm systems for the process industries. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

[134] EPLAN GmbH & Co. KG, EPLAN Electric P8 — current technical documentation for electrical engineering workflows and data exchange, consulted Sep. 2026.

[135] ISA-TR88.00.02-2022, Machine and Unit States: An Implementation Example of ISA-88.00.01. Research Triangle Park, NC: International Society of Automation, 2022.

[136] ISA-88.00.01-2010, Batch Control — Part 1: Models and Terminology. Research Triangle Park, NC: International Society of Automation, 2010; current published ISA edition listed in 2026, with revision work in progress.

[137] ISO 22400-1:2014, Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 1: Overview, concepts and terminology. Geneva: International Organization for Standardization, 2014; confirmed 2025.

[138] ISO 22400-2:2014+Amd 1:2017, Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 2: Definitions and descriptions. Geneva: International Organization for Standardization; current published edition in 2026, with the second edition under development.

[139] B. Vogel-Heuser, A. Fay, I. Schaefer, and M. Tichy, “Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions,” Journal of Systems and Software, vol. 110, pp. 54–84, 2015.

[140] IATF 16949:2016, Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. International Automotive Task Force, 2016; current first edition in Sep. 2026, with the second edition under revision.

[141] ISO 14159:2002, Safety of machinery — Hygiene requirements for the design of machinery. Geneva: International Organization for Standardization, 2002; current published edition in Sep. 2026, with a second edition under development.

[142] P. Muchiri and L. Pintelon, “Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion,” International Journal of Production Research, vol. 46, no. 13, pp. 3517–3535, 2008, doi: 10.1080/00207540601142645.

[143] Regulamentul (UE) 2024/2847 al Parlamentului European și al Consiliului din 23 octombrie 2024 privind cerințele orizontale de securitate cibernetică pentru produsele cu elemente digitale (Cyber Resilience Act), JO L, 2024/2847, 20 noiembrie 2024.

[144] V. Villani, F. Pini, F. Leali, and C. Secchi, “Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications,” Mechatronics, vol. 55, pp. 248–266, 2018, doi:10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.

[145] ISO 14119:2024, Safety of machinery — Interlocking devices associated with guards — Principles for design and selection. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.

[146] IEC 61496-2:2020, Safety of machinery — Electro-sensitive protective equipment — Part 2: Particular requirements for equipment using active opto-electronic protective devices. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.

[147] IFA — Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance, SISTEMA 3.x — Safety Integrity Software Tool for the Evaluation of Machine Applications, software and documentation for ISO 13849-1:2023, current release/documentation consulted in 2026.

[148] IEC 61800-5-2:2016, Adjustable speed electrical power drive systems — Part 5-2: Safety requirements — Functional. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016.

[149] ISO 13855:2024, Safety of machinery — Positioning of safeguards with respect to the approach of the human body. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.

[150] ISO 14120:2015, Safety of machinery — Guards — General requirements for the design and construction of fixed and movable guards. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

[151] ISO 13857:2019, Safety of machinery — Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs. Geneva: International Organization for Standardization, 2019; current published edition in September 2026, with revision initiated.

[152] ISO 14118:2017, Safety of machinery — Prevention of unexpected start-up. Geneva: International Organization for Standardization, 2017; confirmed current in 2023.

[153] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 29 CFR 1910.147, The control of hazardous energy (lockout/tagout), United States.

[154] ISO 10218-1:2025, Robotics — Safety requirements — Part 1: Industrial robots. Geneva: International Organization for Standardization, 2025.

[155] IEC 61496-1:2020, Safety of machinery — Electro-sensitive protective equipment — Part 1: General requirements and tests. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.

[156] IEC 61496-3:2025, Safety of machinery — Electro-sensitive protective equipment — Part 3: Particular requirements for active opto-electronic protective devices responsive to diffuse reflection (AOPDDR). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.

[157] IEC 60947-5-1:2024, Low-voltage switchgear and controlgear — Part 5-1: Control circuit devices and switching elements — Electromechanical control circuit devices. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2024.

[158] ISO 13849-2:2012, Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 2: Validation. Geneva: International Organization for Standardization, 2012; current published edition in September 2026, with a revision in development.

[159] Regulamentul (UE) 2024/1689 al Parlamentului European și al Consiliului din 13 iunie 2024 de stabilire a unor norme armonizate privind inteligența artificială (AI Act), JO L, 2024/1689, 12 iulie 2024.

[160] ISO/IEC TR 5469:2024, Artificial intelligence — Functional safety and AI systems. Geneva: International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission, 2024.

[161] ISO 13851:2019, Safety of machinery — Two-hand control devices — Principles for design and selection. Geneva: International Organization for Standardization, 2019; confirmed current in 2024.

[162] Regulamentul (UE) 2026/1744 al Parlamentului European și al Consiliului din 8 iulie 2026 de modificare a Regulamentelor (UE) 2024/1689, (UE) 2018/1139 și (UE) 2023/1230 în ceea ce privește simplificarea punerii în aplicare a normelor armonizate privind inteligența artificială (Regulamentul omnibus în domeniul digital privind IA), JO L, 2026/1744, 24 iulie 2026.

[163] IEC 61082-1:2014, Preparation of documents used in electrotechnology — Part 1: Rules. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014.

[164] IEC/IEEE 82079-1:2019, Preparation of information for use (instructions for use) of products — Part 1: Principles and general requirements. Geneva/New York: IEC/IEEE, 2019.

[165] ISO Guide 78:2012, Safety of machinery — Rules for drafting and presentation of safety standards. Geneva: International Organization for Standardization, 2012; edition current in 2026 and under revision.

[166] ISO 16092-2:2019, Machine tools safety — Presses — Part 2: Safety requirement for mechanical presses. Geneva: International Organization for Standardization, 2019; confirmed current in 2025.

[167] ISO 16092-3:2017, Machine tools safety — Presses — Part 3: Safety requirements for hydraulic presses. Geneva: International Organization for Standardization, 2017; confirmed current in 2023.

[168] European Commission, “Harmonised standards — Machinery (MD),” official summary page for references of harmonised standards under Directive 2006/42/EC and transition information for Regulation (EU) 2023/1230, accessed 26 Sep. 2026.

[169] CEN Guide 414:2017, Safety of machinery — Rules for the drafting and presentation of safety standards. Brussels: European Committee for Standardization, 2017.

[170] ISO 14122-1:2016 to ISO 14122-4:2016, Safety of machinery — Permanent means of access to machinery, Parts 1–4. Geneva: International Organization for Standardization, 2016; the published parts remain current in 2026 while a consolidated revision project is under development.

[171] Regulamentul (UE) 2024/1781 al Parlamentului European și al Consiliului din 13 iunie 2024 de instituire a unui cadru pentru stabilirea cerințelor de proiectare ecologică pentru produse sustenabile (ESPR), JO L, 2024/1781, 28 iunie 2024.

[172] Regulamentul (UE) 2023/1542 al Parlamentului European și al Consiliului din 12 iulie 2023 privind bateriile și deșeurile de baterii, inclusiv art. 77 privind pașaportul pentru baterii, JO L 191, 28 iulie 2023.

[173] Directiva 2014/30/UE a Parlamentului European și a Consiliului din 26 februarie 2014 privind armonizarea legislațiilor statelor membre cu privire la compatibilitatea electromagnetică (reformare), JO L 96, 29 martie 2014; versiune consolidată curentă la 30 mai 2026.

[174] IEC 60812:2018, Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018.

[175] AIAG and VDA, AIAG & VDA FMEA Handbook, 1st ed., 2nd printing. Southfield, MI: Automotive Industry Action Group, 2022; methodology first published in 2019.

[176] IEC 60050-192:2015, International Electrotechnical Vocabulary (IEV) — Part 192: Dependability. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015.

[177] IEC 61703:2016, Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016.

[178] IEC 60300-1:2024, Dependability management — Part 1: Managing dependability. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2024.

[179] IEC 60300-3-4:2022, Dependability management — Part 3-4: Application guide — Specification of dependability requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

[180] IEC 60300-3-10:2025, Dependability management — Part 3-10: Application guide — Maintainability and maintenance. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.

[181] IEC 60300-3-11:2009, Dependability management — Part 3-11: Application guide — Reliability centred maintenance. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009.

[182] ISO 17359:2018, Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018; confirmed current in 2023.

[183] ISO 13373-1:2002, Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1: General procedures. Geneva: International Organization for Standardization, 2002; confirmed current in 2024.

[184] ISO 13379-1:2025, Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Data interpretation and diagnostics techniques — Part 1: General guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2025.

[185] ISO 13381-1:2025, Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Prognostics — Part 1: General guidelines and requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2025.

[186] ISO 15243:2017, Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes. Geneva: International Organization for Standardization, 2017; current published edition in 2026, with revision work in progress.

[187] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,” Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, 2006, doi:10.1016/j.ymssp.2005.09.012.

[188] H.-C. Liu, L. Liu, and N. Liu, “Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review,” Expert Systems with Applications, vol. 40, no. 2, pp. 828–838, 2013, doi:10.1016/j.eswa.2012.08.010.

[189] VDI/VDE 3693 Blatt 1:2025, Virtual commissioning — Model types, terms, and definitions. Düsseldorf: VDI/VDE, 2025.

[190] European Commission, EudraLex, Volume 4, Annex 15: Qualification and Validation. Brussels: European Commission; in operation since 1 Oct. 2015.

[191] U.S. Food and Drug Administration, 21 CFR Part 11, Electronic Records; Electronic Signatures, together with Guidance for Industry, Part 11 — Electronic Records; Electronic Signatures — Scope and Application. Silver Spring, MD: FDA.

[192] ISO 9001:2026, Quality management systems — Requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2026.

[193] VDI 2230 Blatt 1:2015-11, Systematic calculation of highly stressed bolted joints — Joints with one cylindrical bolt. Düsseldorf: VDI, 2015.

[194] ISO 11202:2010+Amd 1:2020, Acoustics — Noise emitted by machinery and equipment — Determination of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions applying approximate environmental corrections. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.

[195] ISO 10007:2017, Quality management — Guidelines for configuration management. Geneva: International Organization for Standardization, 2017; current published edition in September 2026, with revision work in progress.

[196] IEC 62402:2019, Obsolescence management. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019.

[197] European Commission, Commission Notice — The 'Blue Guide' on the implementation of EU product rules 2022, 2022/C 247/01, OJ C 247, 29 Jun. 2022, as corrected by C/2026/90070, 24 Sep. 2026.

[198] European Commission, EudraLex, Volume 4, Annex 11: Computerised Systems, revision January 2011. Brussels: European Commission, 2011; current published annex in September 2026.

[199] ISO 23247-1:2021, Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.

[200] ISO 23247-5:2026, Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 5: Digital thread for digital twin. Geneva: International Organization for Standardization, 2026.

[201] ISO 23247-6:2026, Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 6: Digital twin composition. Geneva: International Organization for Standardization, 2026.

[202] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

[203] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital twin in industry: State-of-the-art," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, 2019, doi:10.1109/TII.2018.2873186.

[204] Industrial Digital Twin Association (IDTA), Specification of the Asset Administration Shell, Release 26-01: Part 1 — Metamodel; Part 2 — Application Programming Interfaces; Part 4 — Security; Part 5 — Package File Format (AASX), 2026.

[205] Industrial Digital Twin Association (IDTA), AAS Submodel Templates catalogue, current published versions, including Digital Nameplate (IDTA 02006), Generic Frame for Technical Data (IDTA 02003), Handover Documentation (IDTA 02004), Maintenance Instructions (IDTA 02018), Predictive Maintenance (IDTA 02048), Hierarchical Structures/BOM (IDTA 02011), Carbon Footprint (IDTA 02023), and Time Series Data (IDTA 02008), accessed Sep. 2026.

[206] DIN SPEC 91345:2016-04, Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). Berlin: DIN, 2016; see also IEC PAS 63088:2017, Smart manufacturing — Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0), withdrawn 27 Sep. 2024.

[207] IEC 62890:2020, Industrial-process measurement, control and automation — Life-cycle-management for systems and components. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.

[208] Catena-X Automotive Network e.V., official architecture and Digital Twin specifications/resources, including CX-0002 Digital Twins in Catena-X and current architecture documentation, accessed Sep. 2026.

[209] Plattform Industrie 4.0, official RAMI 4.0, Asset Administration Shell and International Manufacturing-X resources, current publications, accessed Sep. 2026.

[210] IEC 62264-2:2026, Enterprise-Control System Integration — Part 2: Object models and relationships for interfaces between manufacturing operations and business functions. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2026.

[211] OPC Foundation / OMAC, OPC UA for PackML — Common Object Model: PackML, OPC 30050, Release 1.01, 11 Nov. 2020.

[212] EUROMAP / OPC Foundation, EUROMAP 83 / OPC 40083, General Type Definitions, Release 1.03, 2021; and EUROMAP 77 / OPC 40077, Data exchange between injection moulding machines and MES, Release 1.01, 2020.

[213] OPC Foundation / VDMA, OPC UA for Robotics — Part 1: Vertical Integration, OPC 40010-1, Release 1.02, 8 Sep. 2025.

[214] OPC Foundation / VDMA, OPC UA for Machinery — Part 1: Basic Building Blocks, OPC 40001-1, Release 1.04.1, 1 Jan. 2026.

[215] IEC 62443-3-3:2013, Industrial communication networks — Network and system security — Part 3-3: System security requirements and security levels. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013; Corrigendum 1:2014.

[216] Object Management Group, OMG Systems Modeling Language (SysML), Version 1.7, formal specification, Jun. 2024.

[217] IEC 62714 series, Engineering data exchange format for use in industrial automation systems engineering — Automation Markup Language (AutomationML), including IEC 62714-1:2018, IEC 62714-2:2022 and IEC 62714-5:2022. Geneva: International Electrotechnical Commission.

[218] Siemens AG, "Siemens Electronics Works Amberg (EWA)," official Digital Enterprise case material; current public page reports a production quality standard of 99.9990 %, accessed Sep. 2026.

[219] BMW Group, "BMW Group at NVIDIA GTC: Virtual Production Under way in Future Plant Debrecen," Press Information, 21 Mar. 2023; and "BMW Group scales Virtual Factory," Press Information, 11 Jun. 2025.

[220] Bosch Rexroth, official ctrlX AUTOMATION / ctrlX OS documentation: Linux-based, real-time-capable industrial operating system and modular app-based automation architecture, current documentation, accessed Sep. 2026.

[221] H. ElMaraghy, L. Monostori, G. Schuh, and W. ElMaraghy, "Evolution and future of manufacturing systems," CIRP Annals, vol. 70, no. 2, pp. 635–658, 2021, doi:10.1016/j.cirp.2021.05.008.

[222] Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, and H. Van Brussel, "Reconfigurable manufacturing systems," CIRP Annals, vol. 48, no. 2, pp. 527–540, 1999.

[223] Y. Koren, The Global Manufacturing Revolution: Product–Process–Business Integration and Reconfigurable Systems. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.

[224] ISO 6150:2018, Pneumatic fluid power — Cylindrical quick-action couplings for maximum working pressures of 1 MPa, 1,6 MPa, and 2,5 MPa (10 bar, 16 bar and 25 bar) — Plug connecting dimensions, specifications, application guidelines and testing; ISO 16028:2023, Hydraulic fluid power — Dimensions and requirements of quick-action couplings, flush-face type; ISO 7241:2023, Hydraulic fluid power — Dimensions and requirements of quick-action couplings. Geneva: International Organization for Standardization, 2018/2023.

[225] ISO 3691-4:2023, Industrial trucks — Safety requirements and verification — Part 4: Driverless industrial trucks and their systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2023; ISO/DIS 3691-4, Edition 3, under development, status checked 27 Sep. 2026.

[226] ISO/IEC CD TS 22440-1, Artificial intelligence — Functional safety and AI systems — Part 1: Requirements; ISO/IEC CD TS 22440-2, Part 2: Guidance; ISO/IEC CD TS 22440-3, Part 3: Examples of application. Committee Drafts under development, ISO/IEC JTC 1/SC 42, status checked 27 Sep. 2026.

[227] Directive (EU) 2022/2555 of the European Parliament and of the Council of 14 Dec. 2022 on measures for a high common level of cybersecurity across the Union (NIS2 Directive), OJ L 333, 27 Dec. 2022.

[228] IEC 62443-3-2:2020, Security for industrial automation and control systems — Part 3-2: Security risk assessment for system design. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.

[229] Romania, Ordonanța de urgență a Guvernului nr. 155/2024 privind instituirea unui cadru pentru securitatea cibernetică a rețelelor și sistemelor informatice din spațiul cibernetic național civil, Monitorul Oficial nr. 1332, 31 dec. 2024, aprobată cu modificări și completări prin Legea nr. 124/2025, Monitorul Oficial nr. 638, 7 iul. 2025; cu modificările ulterioare.

[230] European Commission, COM(2025) 187 final, Ecodesign for Sustainable Products and Energy Labelling Working Plan 2025–2030. Brussels, 16 Apr. 2025.

[231] CEN-CENELEC, CEN-CLC/JTC 24 Digital Product Passport — Framework and System, first series of European DPP standards: EN 18216, EN 18219, EN 18220, EN 18221, EN 18222, EN 18223, EN 18239 and EN 18246; official status overview published 15 Jul. 2026, accessed 27 Sep. 2026.

[232] IEC 82474-1:2025, Material declaration — Part 1: General requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.

[233] IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking Task Group, IEEE Std 802.1Qbv-2015, Enhancements for Scheduled Traffic; IEEE Std 802.1Qbu-2016, Frame Preemption; IEEE Std 802.1CB-2017, Frame Replication and Elimination for

Reliability; together with IEEE 802.3br-2016 for interspersing express traffic, current roll-up/status resources accessed 27 Sep. 2026.

[234] 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA), Integration of 5G with Time-Sensitive Networking for Industrial Communications, 2021; summarising 3GPP Release 16 TSN support and Release 17 enhancements.

Bibliografie complementară

Sursele de mai jos sunt recomandate pentru aprofundare și nu sunt citate în corpul volumului. Pentru standarde, ghiduri și documentații de produs se verifică întotdeauna ediția în vigoare și aplicabilitatea la proiectul concret.

Capitolul 1. Proiectarea sistematică a echipamentelor de fabricație

M. Eigner, T. Dickopf, H. Apostolov, "From the perspective of Mechatronics System Engineering 2.0 to Industry 4.0 — A review of related models and methodologies", în IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 517, pp. 78–87, 2017.

Capitolul 2. Ingineria cerințelor

N. P. Suh, Axiomatic Design — Advances and Applications, Oxford University Press, 2001.

L. Cohen, Quality Function Deployment: How to Make QFD Work for You, Addison-Wesley, 1995.

K. Wiegers and J. Beatty, Software Requirements, 3rd ed., Microsoft Press, 2013.

M. M. Andreasen, C. T. Hansen, and P. Cash, Conceptual Design — Interpretations, Mindset and Models, Springer, 2015.

D. Hull, K. Jackson, and J. Dick, Requirements Engineering, 3rd ed., Springer, 2011.

D. C. Gause and G. M. Weinberg, Exploring Requirements: Quality Before Design, Dorset House, 1989.

NASA Office of the Chief Engineer, NASA Systems Engineering Handbook, NASA/SP-2016-6105 Rev2, 2016.

B. Mocan, Proiectarea sistematică a echipamentelor de fabricație — note de curs, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2025.

IEEE Computer Society, Guide to the Software Engineering Body of Knowledge (SWEBOK), Version 4.0, 2024.

Capitolul 3. Subsistemul mecanic

VDI 2860:1990, Assembly and handling — Functions, function structures, function elements. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 1990.

B. Lotter and H.-P. Wiendahl, Montage in der industriellen Produktion — Ein Handbuch für die Praxis, 2nd ed. Berlin: Springer, 2012.

Festo, Standards-based cylinders DSBC, ISO 15552 — Technical data sheet, current online documentation, consulted 2026.

SCHUNK, Zero-point clamping systems — Technical documentation, current online catalogue, consulted 2026.

Capitolul 4. Subsistemul electric

Directiva 2014/35/UE a Parlamentului European și a Consiliului din 26 februarie 2014 privind echipamentele de joasă tensiune (LVD). Jurnalul Oficial al Uniunii Europene, L 96/357, 29 martie 2014.

IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2014.

EN 50678:2020, General procedure for verifying the effectiveness of the protective measures of electrical equipment after repair. European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, 2020.

R. Krishnan, Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001. ISBN 978-0130910141.

D. Schröder, Elektrische Antriebe — Grundlagen, ediția a 6-a. Berlin: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-662-55448-4. Manualul de referință în spațiul de limbă germană pentru acționări electrice.

A. Hughes, B. Drury, Electric Motors and Drives — Fundamentals, Types and Applications, ediția a 5-a. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. ISBN 978-0-08-102615-1.

I. Hunter, T. Wheeler, Electrical Installation Theory and Practice. London: Routledge, 2020. Manual practic pentru instalații electrice industriale conform IEC 60364.

ABB Group, ACS880 Firmware Manual — Primary control program, document 3AUA0000085967, rev. AC. Helsinki: ABB, 2022. Manual al firmware-ului pentru gama ACS880 cu control DTC.

Bosch Rexroth AG, IndraDrive Mi MS2N Servo Motors — Project Planning Manual, document R911339263. Lohr am Main: Bosch Rexroth AG, 2021.

Festo SE & Co. KG, Electric Automation — Reference book. Esslingen: Festo Didactic, 2020. Document de referință pentru actuatoare liniare electrice.

IEC 62444, Cable glands for electrical installations. International Electrotechnical Commission.

Capitolul 5. Subsistemul pneumatic și hidraulic

ISO 898-1:2013, Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread. ISO.

IO-Link Community, IO-Link System Description — Technology and Applications, technical reference.

Capitolul 6. Senzori și instrumentație

IEC 60068-2-6:2007, Environmental testing — Part 2-6: Tests — Test Fc: Vibration (sinusoidal). IEC, Geneva, 2007.

ISO 21940-11:2016, Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour. ISO, Geneva, 2016.

R. S. Figliola and D. E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, 7th ed. Wiley, 2020.

SICK AG, technical documentation for photoelectric, inductive, ultrasonic and machine-vision sensors, current product documentation.

IEC 61000 series, Electromagnetic compatibility (EMC), applicable immunity and emission standards for industrial equipment. IEC, Geneva, current editions.

Capitolul 7. Subsistemul de control

F. D. Petruzella, Programmable Logic Controllers, 5th ed., New York: McGraw-Hill Education, 2017.

B. R. Mehta and Y. J. Reddy, Industrial Process Automation Systems — Design and Implementation, Butterworth-Heinemann, 2014.

Capitolul 8. Controlul secvențial

IEC TR 61131-8:2017, Industrial-process measurement and control — Programmable controllers — Part 8: Guidelines for the application and implementation of programming languages, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2017.

IEC 62264 series, Enterprise-control system integration, International Electrotechnical Commission, current applicable parts.

R. David and H. Alla, Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets, 2nd ed., Berlin: Springer, 2010.

L. Holloway, B. Krogh, and A. Giua, “A survey of Petri net methods for controlled discrete event systems,” Discrete Event Dynamic Systems, vol. 7, no. 2, pp. 151–190, 1997.

M. Uzam and A. Wonham, “A hybrid approach to supervisory control of discrete event systems coupling RW supervisors to Petri nets,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 28, pp. 747–760, 2006.

S. Nakajima, Introduction to TPM: Total Productive Maintenance, Cambridge, MA: Productivity Press, 1988.

R. C. Hansen, Overall Equipment Effectiveness: A Powerful Production/Maintenance Tool for Increased Profits, New York: Industrial Press, 2001.

K.-H. John and M. Tiegelkamp, IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems, 2nd ed., Berlin: Springer, 2010.

J. R. Hackworth and F. D. Hackworth Jr., Programmable Logic Controllers: Programming Methods and Applications, Pearson, 2003.

Capitolul 9. Siguranța funcțională

IFA Report 1/2025, Functional safety of machine controls — application of DIN EN ISO 13849. Institut für Arbeitsschutz der DGUV.

D. J. Smith and K. G. L. Simpson, Safety Critical Systems Handbook, 4th ed., Butterworth-Heinemann, 2016.

M. P. Groover, Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing, 5th ed., Pearson, 2019.

Capitolul 10. Documentația tehnică și marcajul CE

IEC 81346-2:2019, Industrial systems, installations and equipment and industrial products — Structuring principles and reference designations — Part 2: Classification of objects and codes for classes.

ISO 7010:2019, Graphical symbols — Safety colours and safety signs — Registered safety signs.

EPLAN GmbH, documentația oficială EPLAN Electric P8 privind proiectarea orientată pe date și generarea de rapoarte.

Capitolul 11. Fiabilitate, FMEA și Design for Reliability

MIL-HDBK-217F, Reliability Prediction of Electronic Equipment, U.S. Department of Defense, 1991, Notice 2: 1995. Legacy prediction reference; applicability to current technologies must be assessed critically.

Siemens AG, SN 29500 series, Failure rates of components. Industrial reliability prediction data source; edition and applicability shall be checked for the component technology used.

P. D. T. O'Connor and A. Kleyner, Practical Reliability Engineering, 5th ed. Chichester: Wiley, 2012.

J. Moubray, Reliability-centered Maintenance: RCM II, 2nd ed. New York: Industrial Press, 1997.

D. J. Smith, Reliability, Maintainability and Risk — Practical Methods for Engineers, 9th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2017.

M. Rausand and A. Hoyland, System Reliability Theory — Models, Statistical Methods, and Applications, 2nd ed., Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, SUA, 2004.

K. Mobley, An Introduction to Predictive Maintenance, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2002.

R. K. Mobley, Maintenance Engineering Handbook, 8th ed., McGraw-Hill, New York, SUA, 2014.

J. Endrenyi, Reliability Modeling in Electric Power Systems, Wiley, New York, SUA, 1979 (reeditat 1998). (Fundamentals matematic pentru sisteme complexe.)

Bosch Rexroth AG, “Predictive Maintenance / CytroConnect Solutions,” official product and technical information for condition monitoring and predictive analytics, accessed 2026. [Online].

Festo AG & Co. KG, “Compressed air preparation in pneumatics,” White Paper, 2015. [Online].

APIS Informationstechnologien GmbH, “AIAG/VDA — The 7 steps of FMEA,” official technical resource for IQ-Software, accessed 2026. [Online].

SKF, “Training Solutions — Bearing damage analysis,” official technical training resource covering bearing damage, root causes and maintenance practices, accessed 2026. [Online].

Reliability Engineering Information Source, accesibil la https://reliawiki.org [Online]. Wiki technical dedicat, comunitate activa, articole pe Weibull, FMEA, condition monitoring.

AIAG (Automotive Industry Action Group), AIAG Quality Standards Library, accesibil la https://www.aiag.org [Online]. Standardele AIAG cu plata; resurse complementare gratuite (webinare, white papers).

VDA (Verband der Automobilindustrie), VDA Quality Management Center, accesibil la https://www.vda-qmc.de [Online]. Variantele germane ale standardelor de calitate auto.

Maintenance World, https://www.maintenanceworld.com [Online]. Articole tehnice, studii de caz, comunitate de practicieni; resurse gratuite pe maintenance management si predictive maintenance.

Siemens AG, Insights Hub (former MindSphere) — Industrial IoT Platform Documentation, accesibil la https://documentation.mindsphere.io [Online]. Documentatie tehnica pentru implementarea PdM cu platforma Siemens.

PTC Inc., ThingWorx Platform Documentation, accesibil la https://support.ptc.com [Online]. Documentatie tehnica pentru platforma IIoT PTC, integrata cu Windchill PLM.

Microsoft, Azure IoT — Reference Architectures for Industrial Applications, accesibil la https://learn.microsoft.com/azure/iot [Online]. Referinte arhitecturale cloud pentru PdM la scara enterprise.

Capitolul 12. Integrare, commissioning și validare

M. Hehenberger, Industrie 4.0 - Industry 4.0 and Digital Twin: Concepts, Architectures, and Methods, Springer, 2022. Applicability of individual digital-twin concepts shall be checked against the project.

G. Reinhart (ed.), Handbuch Industrie 4.0 - Anlagenbau, Produktion und Logistik, Carl Hanser Verlag, Munich.

M. Drath, Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen - Beschleunigung des Anlauf-Prozesses durch Modellbildung und Simulation, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.

H.-P. Wiendahl, J. Reichardt and P. Nyhuis, Handbook Factory Planning and Design. Berlin/Heidelberg: Springer, 2015. doi: 10.1007/978-3-662-46391-8.

R. K. Mobley, Plant Engineer's Handbook, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001, chapters relevant to commissioning/start-up.

Siemens AG, official documentation for NX Mechatronics Concept Designer, SIMIT and PLCSIM Advanced; current product documentation to be consulted for the installed software release.

Siemens AG, SIMIT Simulation Framework - official engineering documentation; current release documentation.

Dassault Systèmes, DELMIA official documentation for manufacturing simulation and virtual commissioning.

Visual Components Oy, official documentation for 3D manufacturing simulation and virtual commissioning.

Beckhoff Automation, TwinCAT official documentation for simulation/runtime and automation interfaces.

EUR-Lex, official EU law portal. Consolidated legislation and Official Journal versions should be used for legal verification.

Siemens Industry Online Support, official technical documentation for TIA Portal, SIMIT, PLCSIM Advanced and associated products.

OPC Foundation, OPC UA specifications and official technical resources.

OMAC, PackML implementation resources; use together with the relevant ISA-TR88 material and project requirements.

PMMI, packaging machinery technical resources; applicability of individual guidance should be checked project-by-project.

ISPE GAMP Community of Practice, GAMP guidance and resources for GxP computerised systems; current edition and applicability to be verified for the regulated process.

ISO 20816 series, Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration, ISO, Geneva; select the part whose scope matches the machine under test.

Capitolul 13. Digital Twin și Industry 4.0

ISO 23247-2:2021, Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 2: Reference architecture, ISO, Geneva, 2021.

ISO 23247-3:2021, Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 3: Digital representation of manufacturing elements, ISO, Geneva, 2021.

ISO 23247-4:2021, Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 4: Information exchange, ISO, Geneva, 2021.

IEC 62541 series, OPC Unified Architecture, IEC, Geneva; current applicable parts, including Part 1:2025 (Overview and concepts), Part 2:2026 (Security Model), Part 14:2026 (PubSub) and Part 21:2026 (Device Onboarding).

ECLASS e.V., ECLASS Standard and Conceptual Data Model, official current release; formal semantic dictionary and reference data standard for product/service classification and description.

Capitolul 14. Tendințe emergente în proiectarea echipamentelor de fabricație

B. Siciliano, O. Khatib (Eds.), Springer Handbook of Robotics, 2nd ed., Springer International Publishing, Cham, Elvetia, 2016.

T. Sauter, J. Jasperneite, „Networking in Industrial Manufacturing — Foundations, Industrial Internet of Things, and 5G,” IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 16, no. 1, pp. 30-45, 2022.

L. M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh and Y. Rezgui, Eds., Collaborative Networks of Cognitive Systems, IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 534. Cham: Springer, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-99127-6.

R. Drath, A. Horch, „Industrie 4.0: Hit or Hype?,” IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, no. 2, pp. 56-58, 2014.

European Commission Joint Research Centre, „AI Watch — Defining Artificial Intelligence 2.0”, JRC Technical Report, Ispra, Italia, 2023.

ENISA (European Union Agency for Cybersecurity), „Good Practices for Security of Industrial Internet of Things — Securing the Industrial IoT Environment”, Atena, Grecia, 2023.

NIST, „Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity v2.0”, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, SUA, 2024.

Plattform Industrie 4.0, „Industrie 4.0 — Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)”, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Berlin, Germania, 2022.

VDMA, „Industrial Security — VDMA Position Paper”, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, Frankfurt am Main, Germania, 2023.

EUR-Lex, portalul oficial al legislației UE [Online]. Acces la AI Act, CRA, NIS2, ESPR și reglementările UE conexe.

ENISA Threat Landscape Reports [Online]. Rapoarte periodice privind amenințările cibernetice în UE, inclusiv pentru infrastructuri și sectoare industriale.

AI Office UE [Online]. Documente oficiale, ghiduri și informații privind implementarea AI Act.

Plattform Industrie 4.0 [Online]. Documente privind Industrie 4.0, RAMI 4.0, AAS și ghiduri de implementare.

OPC Foundation [Online]. Specificații OPC UA, Companion Specifications și resurse tehnice oficiale.

Index tematic

Index extins. Numerele trimit la paginile în care termenul este definit sau tratat ca subiect, cel mult șase trimiteri pe termen; în ediția PDF, fiecare număr este o legătură activă. Definițiile termenilor se găsesc în Glosarul consolidat.

#

21 CFR Part 11, 177, 375
5G industrial, 453

A

Action Priority (AP), 354, 467
acumulator hidraulic, 164
aer comprimat, 138, 462
agregat hidraulic, 174
AGV (Automated Guided Vehicle), 445
AI / AO, 218, 309, 409, 446
AI Act, 446
AIAG-VDA, 353, 467
ajustaj cu strângere, 21
alunecare, 67, 103, 150
amortizare la capăt de cursă, 86
amplificator de presiune, 156
AMR (Autonomous Mobile Robot), 3, 444
analiza Pareto, 272
analiza riscului, 264
analiza sistemului de măsurare, 401
analiza vibrațiilor, 347
Anexa IV, 323, 470
apărător mobil, 41
arbore funcție–mijloace, 30
Asset Administration Shell (AAS), 2, 414, 435
AutomationML (AML), 406
Axiomatic Design, 1

B

B10, 353, 418
barieră mecanică, 296
BOM, 3, 85, 93, 171, 219, 320

C

cădere de tensiune, 127
cadru portant, 23
caiet de sarcini, 12, 44, 247, 370, 376, 463
capabilitate, 43, 84, 176, 220, 403, 412
Catena-X, 417
CCF, 281
celulă de forță, 202
cerință verificabilă, 16, 38
change management, 12
ciclogramă, 43, 248
cilindru pneumatic, 11, 75, 149, 189, 293
CNC, 3
coeficient de utilizare, 148
commissioning, 7, 390, 433
Companion Specification, 219, 406
compatibilitate electromagnetică, 338
condition monitoring, 188, 369, 412
configuration management, 379, 430, 444
consum de aer, 174
controler failsafe, 306
Cpk, 401, 464
criterii SMART, 41
cuplaj, 64, 109, 149, 196, 359, 384
cuplu RMS, 93
curba bathtub, 351
curba Wöhler, 84
curea dințată, 71
Cyber Resilience Act (CRA), 309, 448
cybersecurity, 2, 309, 389, 406, 434

D

declarația UE de conformitate, 327, 419, 470
derating, 347
Design for Maintainability, 61, 344
Design for Reliability (DfR), 361
DfM, 81, 363
DI / DO, 218
diagnostic coverage, 281
Digital Model, 406

Digital Product Passport (DPP), 320, 417, 451
Digital Shadow, 405
Digital Thread, 411
Digital Twin, 6, 391, 411, 434
Directiva 2006/42/CE, 31, 284, 321
disponibilitate, 55, 100, 219, 246, 344, 377
distanță de separare, 282, 381
distribuția exponențială, 346
documentație tehnică, 2, 60, 322, 376, 434, 468
dosar tehnic, 31, 319
durată nominală, 68

E

E-STOP, 265, 288
ECAD, 332, 358, 422
ECO, 393, 412
ECR, 31, 393, 412
EEMUA 191, 219
EHSR, 318
electrovalvă, 100, 353
EMC, 92, 177, 325
encoder absolut, 191
encoder incremental, 190
EOL, 3, 378, 429
EPLAN, 219, 320, 412
ERP, 217, 331, 407
ESPR, 320, 407, 451
EtherCAT, 115, 153, 218
EtherNet/IP, 218
evaluarea riscului, 30, 225, 248, 280, 318, 437
extensometru, 198

F

F-CPU, 31, 281, 323
fabricație reconfigurabilă, 436
factor de simultaneitate, 100
FAT (Factory Acceptance Test), 12, 31, 308, 320, 382, 463
FDA, 375
FEM, 82, 392, 413
FFT, 347, 388
fiabilitate (Reliability), 22, 185, 248, 289, 349, 434
fieldbus, 227
FMEA, 371
FMECA, 344
forță teoretică, 75, 136
frecvență de eșantionare, 215
frecvență proprie, 46, 60, 109, 390
FRL, 139, 357
FS / FSO, 176
functional safety, 282

G

ghidaj liniar, 9, 89
GMP, 136, 321, 376
grad de protecție IP, 41
GRAFCET, 19, 253

H

handshake, 378, 438
hidraulică, 6, 77, 149, 193, 291, 318
HIL (Hardware-in-the-Loop), 391
HMI, 3, 32, 99, 232, 251, 323

I

IDTA, 406
IEC 60034-30-1, 104
IEC 60050-192, 345
IEC 60204-1, 30, 91, 246, 291, 318, 375
IEC 60364, 91
IEC 60529, 30, 91, 175
IEC 60751, 175
IEC 60812, 344
IEC 60947, 91, 175
IEC 61131-3, 216, 273
IEC 61439, 91
IEC 61496, 282, 338
IEC 61508, 216, 281
IEC 61703, 345
IEC 61800-5-2, 293
IEC 62061, 216, 290, 318, 345
IEC 62264, 217, 419
IEC 62443, 2, 216, 309, 406, 448
IEC 62541, 216, 406
IEC 63278, 2, 406
IEC 81346, 81, 318
Industrial Ethernet, 154, 227
Industry 4.0, 6, 365, 409
Industry 5.0, 6
inerție reflectată, 93
insulă de valve, 151
interblocare, 221, 248, 300
întreruptor automat, 98
IO-Link, 153, 210, 365, 417
IODD, 136, 176
IoT / IIoT, 347, 408
IPC, 217
IQ / OQ / PQ, 321, 376
ISA-95 / IEC 62264, 222, 419
ISO 10218, 74, 304, 375, 438
ISO 1101, 42, 83
ISO 12100, 30, 286, 318, 464
ISO 1219, 169
ISO 13849-1, 2, 35, 216, 289, 318, 345
ISO 13849-2, 290, 464

ISO 13850, 216, 246, 280
ISO 13855, 296, 318, 375, 435
ISO 13857, 298, 318
ISO 14119, 300, 318
ISO 14120, 298, 318
ISO 14728-1, 58
ISO 15552, 75, 146, 187
ISO 21920, 83
ISO 22400, 246
ISO 281, 58, 345
ISO 286, 83
ISO 3691-4, 444
ISO 4413, 134
ISO 4414, 134, 383
ISO 6358-1, 134
ISO 8573-1, 140
ISO 9001, 375
ISO 9241, 233
ISO/IEC/IEEE 29148, 30
ISO/TS 15066, 304, 438

J

jitter, 154, 219, 454

K

KPI, 384, 409

L

lanț de toleranțe, 89
LD / FBD / ST / SFC, 216, 246
listă I/O, 93, 216, 257, 323
LOTO, 98, 301
LVDT, 176

M

manual de utilizare, 341, 419
Manufacturing-X, 417
marcaj CE, 285, 335, 418, 456, 471
matrice de trasabilitate, 50
MBSE, 19, 423
MCAD, 332
mentenabilitate, 55, 81, 138, 248, 363, 377
mentenanță predictivă, 155, 345
MES, 32, 177, 242, 251, 378, 407
ML / AI, 284, 409
mod de operare, 248
modelul V, 14, 33, 95, 348, 379, 409
modificare substanțială, 341, 375
monitorizarea vitezei și separării, 462
motor asincron, 93
MQTT, 408
MTBF, 25, 32, 248, 370
MTTFd, 281, 346
MTTR, 32, 248, 344, 377
multiplicator de presiune, 156

N

NC / NO, 135
NIS2, 448
Notified Body, 319

O

oboseală, 84, 353
obsolescență, 363, 378, 430
OEE, 3, 55, 242, 269, 347, 377
OEM, 3, 264, 345, 390
OPC UA, 3, 32, 222, 251, 378, 405
OPC UA Robotics (OPC 40010-1), 408
oprire de urgență, 45, 216, 246, 280
organism notificat, 32, 282, 319, 378
OT / IT, 220, 406, 453

P

PackML, 276, 378, 408
PDP, 135
perdea optică, 297
Performance Level, 289
PID, 249
pirometru, 205
PLC, 2, 32, 114, 223, 251, 408
PLM, 32, 320, 355, 386, 410
PLr, 16, 32, 225, 281, 325, 464
pneumatică, 1, 75, 137, 189, 291, 356
PNP / NPN, 176
pompă hidraulică, 161
pornire neașteptată, 301
profil de aluminiu, 65
PROFINET, 41, 115, 153, 218, 378
PROFIsafe, 308, 436
PROFIsafe / FSoE / CIP Safety, 308, 436
punchlist, 376, 456, 466
punere în funcțiune, 5, 34, 94, 220, 321, 376

Q

QFD, 48
QMS, 320, 386

R

RAMI 4.0, 405
ramp-up, 377
rată de defectare, 349
RCM (Reliability-Centred Maintenance), 345
receptivitate, 247
Reconfigurable Manufacturing System, 443
reductor, 71, 93, 159, 359, 394
redundanță, 100, 218, 289, 374, 453

Regulamentul (UE) 2023/1230, 30, 284, 334, 375, 463
rigiditate dinamică, 61
rigiditate statică, 61
risk graph, 287
robot colaborativ, 74, 304, 434
RPN, 346
rugozitate, 83
rulment, 58, 345, 384, 418
run-at-rate, 404

S

safety function, 446
Safety Integrity Level (SIL), 3, 218, 290, 336, 345
SAP (stația de asamblare prin presare), 21, 44, 85, 337, 369, 429
SAT (Site Acceptance Test), 12, 32, 220, 308, 320, 386
SCADA, 178, 217, 408
secvență HOME, 265
selectivitate, 122
senzor capacitiv, 184
senzor fotoelectric, 189
senzor inductiv, 48, 188, 254, 417
senzor piezoelectric, 197
senzor ultrasonic, 186
servomotor, 11, 45, 67, 129, 357
SiL (Software-in-the-Loop), 391
sistem serie, 374
SISTEMA, 290, 325
specificație tehnică de realizare, 12, 43, 376, 463
SPM, 3
SRP/CS, 16, 175, 220, 281
standard armonizat, 38, 330
Standard Tip C, 320
submodel, 414
sudură, 63
sursă de alimentare 24 V DC, 374
șurub cu bile, 9, 71, 105, 215
sustenabilitate, 6, 434
SysML, 19, 422

T

T-slot, 60, 189
tablou electric, 11, 124, 203
tact, 23
termocuplu, 204
termorezistență, 175
timp de ciclu, 55, 134, 232, 384, 463
ToF, 177
toleranțe geometrice, 83
traductor magnetostrictiv, 193
tranziție, 31, 220, 253, 284, 377, 423
TSN (Time-Sensitive Networking), 434

U

URS (User Requirements Specification), 27

V

validarea funcțiilor de siguranță, 239, 308, 356
variator de frecvență, 94
VDI 2221, 18
VDI 2519, 30
VDI/VDE 2206, 14
VFD, 17, 103, 177, 357
Virtual Commissioning, 7, 375, 433
viziune artificială, 8

W

watchdog, 219
Weibull, 353

O abordare integrată: de la cerințe la Industry 4.0 → 5.0

Echipamentele moderne de fabricație — mașini și centre de prelucrare CNC, stații de asamblare, linii de îmbuteliere și celule robotizate — sunt sisteme mecatronice integrate, în care componenta mecanică, electrică, pneumatică, senzorica, programele de comandă, siguranța funcțională și conectivitatea digitală trebuie proiectate unitar.

Cursul se adresează viitorilor proiectanți de echipamente de fabricație și oferă o abordare sistematică, bazată pe modelul V, standarde ISO/IEC și reglementări europene actuale, utilizând Stația de Asamblare prin Presare (SAP) ca studiu de caz integrativ recurent.

DESPRE ACEST CURS

- 14 capitole și 8 subsisteme funcționale
- metodologia modelului V și aplicații pe SAP
- standarde ISO/IEC și reglementări UE
- teme emergente: Digital Twin, IA, cybersecurity și comunicații TSN/5G

DESPRE AUTORI

Bogdan Mocan – *profesor, specialist în proiectarea echipamentelor și robotica industrială.*
Mircea Fulea – *conferențiar, specialist în sisteme software industriale.*
Mircea Murar – *șef lucrări, specialist în automatizare industrială.*
David Chereches – *doctorand, specialist în sisteme electrice industriale.*

Ediție digitală · 2026



UTPRESS · Cluj-Napoca

ISBN: [se va atribui la publicare]