



**MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH**  
**University POLITEHNICA of Bucharest**  
**Doctoral School of**  
**Industrial Engineering and Robotics**

**Elena Liliana I. STAN**

# **DOCTORAL THESIS**

**Web-based monitoring platform for Digital Twin-enabled robotic manufacturing systems**

**Platformă informatică pentru monitorizare via internet a funcționării sistemelor de producție robotizate**

***PhD supervisor,***  
**Prof.dr.ing. Cristina PUPAZA (UPB)**

**- 2023 -**



## Cuprins

<b>Capitolul I. Monitorizarea sistemelor de fabricație.....</b>	<b>- 1 -</b>	<b>- 13 -</b>
Secțiunea 1. Introducere.....	- 1 -	- 15 -
1.1. Monitorizarea și controlul proceselor industriale prin intermediul serviciilor web.....	- 1 -	- 15 -
1.2. Monitorizarea stării de funcționare pentru mentenanța predictivă.....	- 2 -	- 16 -
1.3. Monitorizarea și planificarea producției pentru indicatori de performanță.....	- 2 -	- 18 -
Secțiunea 2. Obiectivele tezei de doctorat.....	- 3 -	- 18 -
<b>Capitolul II. Industria 4.0. Aplicații robotizate moderne.....</b>	<b>- 5 -</b>	<b>- 21 -</b>
2.1. Obiective și sinopsisul contribuțiilor originale.....	- 5 -	- 23 -
Secțiunea 1. Introducere în domeniul Industriei 4.0 și IIoT.....	- 6 -	- 24 -
2.2. Introducere.....	- 6 -	- 24 -
Secțiunea 2. Sisteme Cyber-Fizice și conceptul Digital Twin.....	- 7 -	- 27 -
2.3. Aspecte generale.....	- 7 -	- 27 -
Secțiunea 3. Edge, Fog, și Cloud Computing în robotică.....	- 8 -	- 38 -
2.4. Aspecte generale.....	- 8 -	- 38 -
Secțiunea 4. Sisteme robotizate pentru producția inteligentă.....	- 9 -	- 43 -
2.5. Aspecte generale.....	- 9 -	- 43 -
Secțiunea 5. Învățare automată pentru aplicații robotizate de asamblare.....	- 10 -	- 58 -
2.6. Aspecte generale.....	- 10 -	- 58 -
Secțiunea 6. Concluzii.....	- 11 -	- 75 -
<b>Capitolul III. Implementarea platformei web pentru monitorizare.....</b>	<b>- 15 -</b>	<b>- 79 -</b>
3.1. Obiective și sinopsisul contribuțiilor originale.....	- 15 -	- 81 -
Secțiunea 1. Introducere.....	- 16 -	- 82 -
3.2. Aspecte generale.....	- 16 -	- 82 -
3.3. Metoda propusă.....	- 16 -	- 83 -
3.4. Prezentarea robotului de tip braț articulat – IRB 1200/0.9.....	- 17 -	- 83 -
3.5. Cerințe generale de securitate.....	- 17 -	- 85 -
3.6. Considerente teoretice și practice.....	- 17 -	- 88 -
Secțiunea 2. Dezvoltarea platformei web.....	- 18 -	- 89 -
3.7. Prezentarea generală a platformei web.....	- 18 -	- 89 -
3.7.1. Conexiunea dintre controlerul robotului real și cel virtual.....	- 19 -	- 91 -
3.7.2. Conexiunea de comunicare dintre controler și serverul web.....	- 19 -	- 92 -
3.7.3. Clasa de utilitate pentru a facilita comunicarea controler-server web.....	- 20 -	- 93 -
3.7.4. Programul de utilitate pentru colectarea și stocarea datelor.....	- 20 -	- 94 -
3.7.5. Interfața grafică web: Tabloul de Bord și Graficele de Control.....	- 20 -	- 96 -
3.8. Procedura de simulare pentru demonstrarea funcționalității platformei.....	- 21 -	- 96 -
Secțiunea 3. Validare experimentală.....	- 22 -	- 103 -
3.9. Configurația experimentală.....	- 22 -	- 103 -
3.10. Achiziția de semnale de la controlerul robotului.....	- 23 -	- 103 -
3.11. Analiza consumului de energie online vs. rezultatele simulării.....	- 23 -	- 106 -
Secțiunea 4. Concluzii.....	- 25 -	- 109 -

<b>Capitolul IV. Dezvoltarea unui model DT pentru aplicații de debavurare robotizate cu capacități de monitorizare bazate pe tehnologii web.....</b>	<b>- 27 -</b>	<b>- 111 -</b>
4.1. Obiective și sinopsitul contribuțiilor originale.....	- 27 -	- 113 -
Secțiunea 1. Aplicație de debavurare robotizată.....	- 28 -	- 115 -
4.2. Introducere.....	- 28 -	- 115 -
4.3. Metoda propusă pentru aplicația de debavurare robotizată.....	- 29 -	- 118 -
4.4. Sisteme robotizate pentru debavurare.....	- 30 -	- 119 -
4.5. Scule cu sisteme de complianță.....	- 30 -	- 121 -
Secțiunea 2. Simulare offline și verificare.....	- 31 -	- 123 -
4.6. Elaborarea modelului DT.....	- 31 -	- 123 -
4.7. Controlerul virtual și programarea robotului.....	- 32 -	- 124 -
4.8. Programarea offline a celulei de fabricație robotizate.....	- 32 -	- 125 -
Secțiunea 3. Calcularea traiectoriilor cu ajutorul tehnicilor de procesare a imaginilor.....	- 33 -	- 127 -
4.9. Aspecte generale.....	- 33 -	- 127 -
4.10. Metoda propusă pentru calcularea traiectoriilor de debavurare.....	- 33 -	- 128 -
4.11. Algoritm implementat pentru debavurarea robotizată a bavurilor parțial îndepărtate.....	- 34 -	- 130 -
4.12. Consumul de energie al robotului.....	- 34 -	- 132 -
Secțiunea 4. Platforma web pentru monitorizare.....	- 35 -	- 135 -
4.13. Aspecte generale.....	- 35 -	- 135 -
4.14. Proiectarea platformei web.....	- 35 -	- 135 -
Secțiunea 5. Concluzii.....	- 36 -	- 139 -
<b>Capitolul V. Platforma web pentru a introduce tehnologii avansate de formare în robotică.....</b>	<b>- 39 -</b>	<b>- 141 -</b>
5.1. Obiective și sinopsitul contribuțiilor originale.....	- 39 -	- 143 -
Secțiunea 1. Introducere în Educație 4.0.....	- 40 -	- 144 -
5.2. Aspecte generale.....	- 40 -	- 144 -
Secțiunea 2. Concepte de formare emergente.....	- 40 -	- 145 -
5.3. Cerințele de formare și calificare pentru Industria 4.0.....	- 40 -	- 145 -
5.4. Strategii de formare în contextul educației 4.0 raportate la roboții industriali moderni.....	- 41 -	- 146 -
Secțiunea 3. Aplicație de asamblare robotizată.....	- 41 -	- 148 -
5.5. Metoda propusă.....	- 41 -	- 148 -
5.6. Studiu de caz.....	- 42 -	- 148 -
Secțiunea 4. Concluzii.....	- 43 -	- 152 -
<b>Capitolul VI. Concluzii finale.....</b>	<b>- 44 -</b>	<b>- 153 -</b>
6.1. Sinteza principalelor realizări.....	- 44 -	- 155 -
6.2. Contribuții originale.....	- 46 -	- 157 -
6.3. Direcții de cercetare viitoare.....	- 48 -	- 158 -

# Capitolul I. Monitorizarea sistemelor de fabricație

## Secțiunea 1. Introducere

În era Transformării Digitale (Kraus et al., 2021; Nadkarni et al., 2021), întreprinderile adoptă și implementează tehnologii bazate pe calculator pentru a construi sau îmbunătăți procesele care utilizează abordări continue și agile. Inovarea este esențială pentru ca întreprinderile să se adapteze și să facă față cerințelor de schimbare, deoarece lumea evoluează mai repede ca niciodată, în primul rând datorită progreselor tehnologice. În producția modernă, îmbinarea tehnologiilor informaționale (IT) și a tehnologiilor operaționale (OT), cunoscută și sub numele de convergența OT/IT (Patera et al., 2021), are un efect revoluționar.

Industria 4.0 este un termen generic care promovează tehnologiile cheie care facilitează revoluția industrială aflată în curs de desfășurare, inclusiv Internetul Industrial al Obiectelor (Industrial Internet of Things (IIoT)), Sistemele de Producție Cyber-Fizice (Cyber-Physical Production Systems (CPPS)), „Digital Twins” (DT), „Cloud Computing”, și tehnologiile de Învățare Automată (ML), printre altele. Serviciile web, MQTT și API-urile sunt metode predominante în procesele moderne de producție pentru realizarea interoperabilității, care reprezintă capacitatea dispozitivelor și sistemelor de a comunica între ele. CPPS se referă la echipamentele interconectate dintr-o fabrică, în care starea și acțiunile unui utilaj le afectează pe celelalte. Performanța și starea sistemului de fabricație pot fi evaluate prin utilizarea de senzori pentru a colecta și prelucra date despre fiecare dispozitiv și sistem.

„Cloud Computing” este un model de furnizare și acces la servicii în care resursele scalabile și virtualizate în mod dinamic sunt furnizate ca un serviciu cu fiabilitate, extensibilitate și disponibilitate via Internet. Implementarea tehnologiilor de „Edge Computing” avansează concomitent cu progresul IIoT și reprezintă unul dintre sectoarele cu cea mai rapidă expansiune din domeniul automatizării industriale. „Edge Computing” aduce măsurarea mai aproape de sursă, reducând în același timp latența și asigurând colectarea fiabilă a datelor în timp real. În consecință, noile sisteme IIoT trec de la „Cloud Computing” centralizat, care este ideal pentru aplicații îndelungate și care necesită cantități mari de stocare și putere mare de procesare, la „Edge Computing” inteligent distribuit, potrivit pentru servicii în timp real, deoarece prezintă o latență redusă.

### 1.1. Monitorizarea și controlul proceselor industriale prin intermediul serviciilor web

Fabricile de ultimă generație sunt reprezentate de roboți colaborativi, mașini CNC, roboți de service avansați și tehnologie om-mașină (Human-Machine Interface (HMI)). Disponibilitatea și întreținerea sunt esențiale pentru toate utilajele. Arhitectura modernă de fabricație trebuie să ia în considerare cerințele de simultaneitate și sincronizare ale Sistemelor Cyber-Fizice (Cyber-Physical Systems (CPS)) interconectate. CPS-urile concurente trebuie să fie tolerante la erori și defecțiuni, cu subsisteme de diagnosticare concepute pentru localizare și reparare în timp real. Un alt aspect important al CPS-urilor este fiabilitatea, care se referă la probabilitatea ca un sistem să își îndeplinească funcțiile necesare, fără defecțiuni, pe o durată specificată, atunci când este utilizat în condiții specificate.

Principala aplicație a IoT este capacitatea de a gestiona și monitoriza de la distanță mașinile. În automatizarea industrială, monitorizarea la distanță și vizualizarea datelor sunt esențiale pentru operare, planificarea întreținerii, analiza incidentelor și optimizare. Controlul echipamentelor de la distanță este necesar în situațiile în care utilajele sunt inaccesibile sau prezintă riscuri pentru siguranța umană. Pandemia COVID-19 a subliniat importanța accesului și controlului de la distanță a proceselor critice și a accelerat dezvoltarea de tehnologii și servicii de securitate cibernetică care protejează activele din fabrică prin intermediul conexiunilor industriale Ethernet și Internet.

### 1.2. Monitorizarea stării de funcționare pentru mentenanța predictivă

Operațiunile repetitive ale unui robot trebuie să fie efectuate cu precizie în timp, ceea ce reprezintă o provocare pentru producătorii de roboți care trebuie să asigure detectarea și diagnosticarea precisă a defecțiunilor. S-au efectuat cercetări privind componentele robotului, defectele de transmisie, achiziția de date și algoritmi de detectare a anomaliilor. Printre cauzele comune ale pierderii preciziei se numără problemele din sistemul de transmisie, rulmenții de rulare defecti și problemele legate de angrenaje, cum ar fi jocul, frecarea și uzura abrazivă.

Mentenanța se referă la procedurile tehnice și administrative, inclusiv acțiunile de supraveghere, care sunt utilizate pentru a menține un element într-o stare funcțională sau pentru a-l readuce în această stare pe durata de viață proiectată sau pe o perioadă mai lungă. Există patru strategii de întreținere: execuție până la defecțiune, preventivă (bazată pe timp), predictivă (bazată pe condiții) și proactivă. Monitorizarea stării (Condition Monitoring (CM)) este o metodă de întreținere care monitorizează activele operaționale, detectează semnele de degradare, diagnostichează defecțiunile și prezice durata de funcționare rămasă. Ea are ca scop să prezică starea de sănătate a unei mașini sau a unui sistem și poate fi efectuată online sau offline (Wang et al., 2018). Pot fi utilizate tehnici precum monitorizarea vibrațiilor, a emisiilor acustice, a particulelor de uzură și a temperaturii. Procesul CM include, de obicei, cinci etape: achiziția de date, analiza datelor, extragerea caracteristicilor, luarea deciziilor și diagnosticarea stării.

### 1.3. Monitorizarea și planificarea producției pentru indicatori de performanță

În industria de producție, un indicator de performanță (Key Performance Indicator (KPI)) este o metrică utilizată pentru a evalua performanța procesului de producție. Printre exemple se numără rata de funcționare a mașinilor, timpul de ciclu, rata de producție și îndeplinirea producției. Aplicațiile software de tip „Production Analytics” sunt platforme care oferă vizualizarea și analiza în timp real a mașinilor, echipamentelor și a datelor de producție, permițând producătorilor să identifice și să abordeze pierderile de producție. Cu toate acestea, producția tradițională se poate confrunta cu provocări în ceea ce privește procesarea datelor, cum ar fi echipamentele învechite cu capacități de calcul limitate și lipsa interfețelor și protocoalelor standard între mașini.

## **Secțiunea 2. Obiectivele tezei de doctorat**

Sistemul SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) este un sistem de componente software și hardware care permite organizațiilor industriale să gestioneze procesele la nivel local sau de la distanță, să monitorizeze și să proceseze date în timp real și să interacționeze direct cu dispozitivele prin intermediul programelor HMI. Sistemele SCADA sunt de obicei implementate pentru a controla și menține eficiența, pentru a distribui date pentru luarea deciziilor în cunoștință de cauză și pentru a comunica defecțiunile sistemului pentru a reduce timpul de nefuncționare. Unul dintre numeroasele roluri ale unui sistem SCADA este acela de a face legătura între OT și IT. Principalele capacități ale unui sistem SCADA: să ofere o interfață de operare ușor de utilizat în fabrică, să pună instantaneu la dispoziția operatorilor datele OT, să permită monitorizarea și controlul de la distanță. Întreprinderi precum Microsoft Azure (Microsoft Azure, 2022) și Ignition (Inductive Automation, 2022) oferă soluții puternice și dedicate pentru a permite transformarea digitală și trecerea la producția inteligentă, dar sunt, de asemenea, costisitoare.

Scopul principal al tezei este de a prezenta dezvoltarea unei platforme de monitorizare bazată pe tehnologie web pentru sistemele de fabricație robotizate adaptate la tehnologie digitală. Scopul de fond este acela de a obține o înțelegere cuprinzătoare a ecosistemului de fabricație inteligentă și a interdependențelor dintre principalii săi facilitatori. Prin urmare, pot fi identificate următoarele obiective de cercetare:

1. **Examinarea celor mai recente cercetări în domeniul Industrie 4.0** și prezentarea stadiului actual al principalilor săi facilitatori, în special: IIoT, CPS, DT, Robotic Cloud Computing, sisteme robotice inteligente și ML. Pentru că soluțiile inovatoare apar rapid, dar uneori sunt și brusc depășite, este esențial să se aibă o înțelegere fundamentală a funcțiilor și a provocărilor fiecărei componente de bază.
2. **Dezvoltarea unui sistem de monitorizare prin identificarea semnalelor esențiale de la aplicația robotizată, crearea unui model robust de achiziție de date și dezvoltarea unei aplicații web de monitorizare cu capacități avansate.** O analiză a funcțiilor pe care trebuie să le îndeplinească acest sistem, va determina resursele de dezvoltare cele mai potrivite și disponibile în mod liber, care mai târziu pot fi adoptate cu ușurință și dezvoltate de către viitorii cercetători.
3. **Elaborarea unui sistem robotic asistat de un DT care combină paradigmele CPS, DT și IIoT, pentru a forma un sistem robotic inteligent.** Studiile abordează rareori cercetarea interdisciplinară privind sistemele robotice complexe. Prin urmare, o abordare holistică a dezvoltării unei aplicații robotizate va pune în practică abilități multidisciplinare și poate expune diverse provocări, cum ar fi incompatibilitatea dintre două componente din cauza lipsei de standardizare sau a unor neregularități în abordările conceptuale.
4. **Investigarea impactului pe care Industria 4.0 îl are asupra societății și a educației.** Un studiu al literaturii de specialitate ar trebui să identifice metodologiile utilizate pentru a promova o atitudine de dezvoltare și pentru a reduce decalajul dintre educația inginerilor absolvenți și așteptările privind setul de competențe de la locul de muncă. Chiar dacă roboții

sunt menționați pe scară largă în literatura de specialitate privind Industria 4.0, există insuficiente studii privind abordările de predare destinate roboților industriali întrebuințați în producția modernă.

Teza de doctorat este structurată după cum urmează:

- Capitolul 2 prezintă stadiul actual al tehnologiei în ceea ce privește factorii cheie ai Industriei 4.0 și implementarea lor în aplicațiile robotizate moderne.
- Capitolul 3 prezintă dezvoltarea și validarea platformei de monitorizare propuse, bazată pe tehnologii web.
- Capitolul 4 prezintă un studiu de caz pentru crearea unui sistem robotizat de debavurare abilitat de un DT cu capacități de monitorizare prin intermediul platformei web propuse.
- Capitolul 5 prezintă un al doilea studiu de caz și examinează aplicarea platformei de monitorizare în contextul Educației 4.0.
- Capitolul 6 expune observațiile finale și contribuțiile originale.



## Capitolul II. Industria 4.0. Aplicații robotizate moderne

### 2.1. Obiective și sinopsisul contribuțiilor originale

**Principalul obiectiv** al acestui capitol este de a prezenta stadiul actual al tehnologiilor cheie ale industriei 4.0, în special:

- Internetul Obiectelor Industriale (Industrial Internet of Things (IIoT)).
- Sisteme Cyber-Fizice (Cyber-Physical Systems (CPS)), virtualizare, și conceptul de Digital Twin (DT).
- Robotic Cloud Computing.
- Sisteme robotizate inteligente.
- Tehnici de Învățare automată cu Întărire (Reinforcement Learning (RL)).

Acest capitol oferă pentru fiecare factor cheie o scurtă introducere, prezintă caracteristicile specifice, terminologia, metodele și tehnologiile și evidențiază provocările și progresele recente. Deși există o serie de evaluări bibliografice privind rolul și caracteristicile roboților industriali în producția inteligentă, acestea sunt rareori exhaustive și, odată cu dezvoltarea rapidă a tehnologiilor conexe, devin rapid depășite.

Obiectivele secundare ale acestui capitol:

- Echilibrarea informației pentru a limita complexitatea și clasificarea tehnologiilor.
- Identificarea principalilor facilitatori ai Industriei 4.0, a tehnologiilor inovatoare actuale și a viitoarelor direcții de cercetare.
- Prezentarea componentele de bază ale sistemelor CPS aplicate în producție și rolul lor în planificarea, monitorizarea, sustenabilitatea și securitatea proceselor.
- Prezentarea tehnologiile de tip Cloud Computing și identificarea soluțiilor inovatoare din acest domeniu aplicate în sistemele robotizate.
- Evidențierea elementelor esențiale ale sistemelor de colaborare om-robot.
- Prezentarea tehnicilor fundamentale de RL aplicate în aplicații de asamblare robotizate.
- Explorarea implicărilor sociale cauzate de tehnologiile avansate prezente în producția inteligentă (de exemplu, colaborarea om-robot) și cerințele educaționale.

**Contribuții teoretice originale:**

- Prezentarea stadiului actual al tehnologiilor care modelează paradigmele CPS și DT, precum și caracteristicile lor specifice și provocările actuale.
- Prezentarea tehnologiilor inovatoare în domeniul Cloud Computing și evidențierea avantajelor și vulnerabilităților acestora.
- Realizarea unei analize cuprinzătoare a soluțiilor avansate pentru colaborarea om-robot și prezentarea stadiului actual.
- O prezentare aprofundată a soluțiilor avansate de RL folosite în aplicațiile de asamblare robotizate.

## **Secțiunea 1. Introducere în domeniul Industriei 4.0 și IIoT**

### 2.2. Introducere

Primele trei revoluții industriale au fost determinate de mecanizare, de utilizarea energiei electrice și de dezvoltarea tehnologiei informației. Cea de-a patra revoluție industrială a fost denumită "Industria 4.0" de către guvernul federal german, iar conceptul de bază a fost prezentat inițial la expoziția de la Hanovra din 2011. Unul dintre obiectivele inițiativelor este de a înființa fabrici inteligente în care tehnicile și tehnologiile de producție să fie îmbunătățite și adaptate prin cele mai recente evoluții în domeniul CPPS, rețelelor de comunicații, Cloud Computing și tehnologiilor IoT. Cu toate acestea, conceptul de Industrie 4.0 cuprinde toate funcțiile și serviciile întreprinderii, nu doar aspectul de producție.

**Obiectivul** acestei secțiuni este de a oferi o introducere sintetică în Industria 4.0 și prezentarea elementelor principale, în mod specific IoT și IIoT.

Fabricile inteligente sunt unități de producție și fabrici moderne care au implementat strategiile de automatizare și digitalizare pentru a optimiza productivitatea și a simplifica procesele. Koren et al. (Koren et al., 2018) afirmă că Sistemele de Fabricație Reconfigurabile (Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)) reprezintă cea mai recentă evoluție a sistemelor de fabricație. În fabricile specifice Industriei 4.0, mașinile pot lua decizii autonome pe baza algoritmilor ML, a achiziției de date în timp real, a rezultatelor analizelor și a comportamentelor anterioare de succes.

Paradigma Industrie 4.0 cuprinde următoarele elemente:

- Strategie și organizare
- Fabrici inteligente (echipamente și sisteme IT, modelare digitală)
- Funcționare inteligentă (integrarea lanțului valoric)
- Produse inteligente (componente fizice)
- Servicii bazate pe date (funcționalități TIC, predicție și optimizare)
- Resurse umane (competențe ale angajaților, educație și formare continuă)

În contextul Industriei 4.0, instrumentele software joacă un rol crucial în funcționarea fabricilor inteligente. Sistemele de Planificare a Resurselor Întreprinderii (ERP) sunt utilizate în mod obișnuit pentru a gestiona o gamă largă de activități de afaceri, SAP fiind un exemplu ilustrativ. Sistemele de Execuție a Producției (MES) se ocupă de raportarea producției, programarea, expedierea, urmărirea produselor, operațiunile de întreținere, analiza performanței, urmărirea forței de muncă și alocarea resurselor. Sistemele SCADA și controlerele de mașini/dispozitive, cum ar fi Controlerele Logice Programabile (PLC), sunt utilizate pentru controlul proceselor la nivel operațional. IoT conectează activele și utilajele industriale la sistemele informatice ale întreprinderii și la procesele de afaceri, asigurând în același timp fiabilitatea, sustenabilitatea și productivitatea (Stan et al., 2016). Noile sisteme IoT trec de la tehnici de „cloud computing” centralizat (ideal pentru aplicațiile care nu necesită procesare în timp real dar care necesită cantități mari de stocare și putere mare de procesare) la

tehnici de „edge computing” (potrivit pentru servicii în timp real, deoarece prezintă o latență redusă).

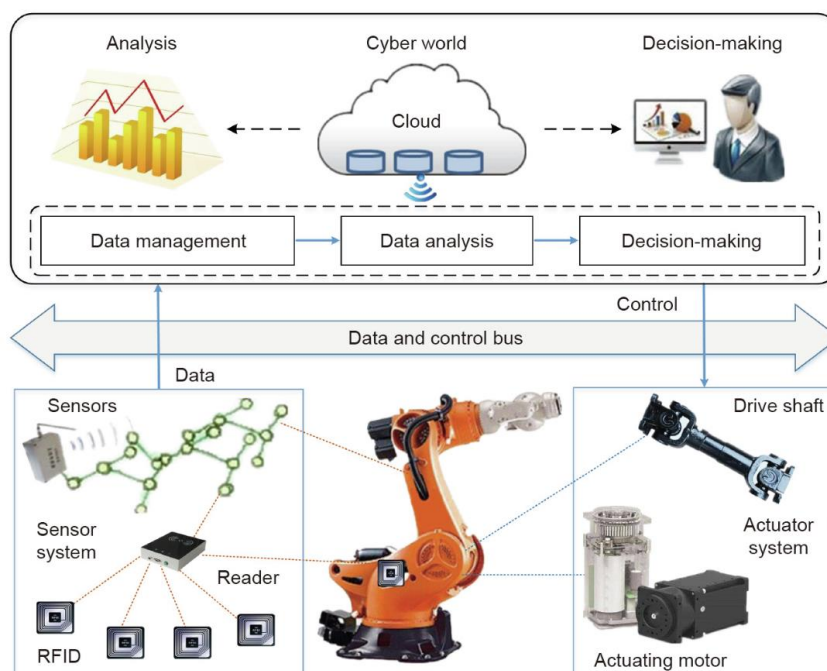
Deși s-au depus eforturi considerabile pentru concepția și dezvoltarea tehnologiilor IIoT, acest domeniu este în continuă evoluție, iar introducerea de noi cerințe și tehnologii oferă noi provocări sau impun o re-evaluare a soluțiilor deja cunoscute și acceptate pe scară largă.

## **Secțiunea 2. Sisteme Cyber-Fizice și conceptul Digital Twin**

### 2.3. Aspecte generale

CPS sunt sisteme care integrează procesele de calcul, interconectarea și procesele fizice. Acestea se caracterizează prin legătura strânsă dintre entitățile de calcul și lumea fizică. CPS utilizate în domeniul industrial (Fig. 2.1) sunt numite Sisteme de Producție Cyber-Fizice (CPPS) și sunt forme specializate de CPS care depind de progresele actuale și viitoare în domeniul informaticii, al tehnologiilor informației și comunicațiilor, precum și al științei și tehnologiei de fabricație.

**Obiectivul** acestei secțiuni este de a oferi o imagine de ansamblu cuprinzătoare a progreselor actuale în domeniile CPS, CPPS și DT.



**Fig. 2.1. Senzorii și dispozitivele de acționare pot fi considerate elementele de bază ale CPS (Tao et al., 2019).**

Informațiile unui DT cuprind o varietate de categorii, inclusiv modele funcționale, structurale, matematice analitice, sau modele de simulare statice sau dinamice, deterministe sau stohastice (Fig. 2.2). Un studiu realizat de Talkhestani et al. (Ashtari Talkhestani et al., 2019) sugerează că un DT ar trebui să posede trei caracteristici-cheie: sincronizarea cu activele reale, achiziția activă de date și capacitatea de simulare. Ugarte et al. (Ugarte Querejeta et al.,

2020) au analizat utilizarea DT pentru a facilita o abordare DevOps în CPPS, ceea ce a condus la un proces de producție complet integrat și automatizat în scopul îmbunătățirii continue. Un DT este o reprezentare digitală formală a unui activ, proces sau sistem care captează atributele și comportamentele sale și este proiectat pentru comunicare, stocare și procesare.

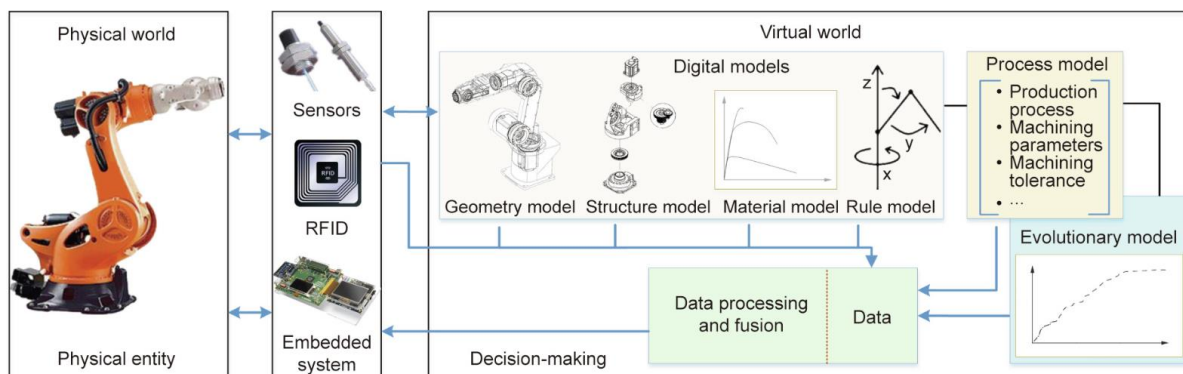


Fig. 2.2. Modelele și datele pot fi considerate ca fiind elementele de bază ale unui DT (Tao et al., 2019).

### Secțiunea 3. Edge, Fog și Cloud Computing în robotică

#### 2.4. Aspecte generale

Industria 4.0 reprezintă conceptul de fabrici inteligente puternic automatizate și flexibile, care utilizează echipamente conectate și inteligente pentru luarea de decizii autonome. Pentru a realiza acest lucru, trebuie ca rețelele de comunicații să ofere garanții de sincronizare și securitate robustă. Arhitecturile Orientate pe Servicii (SOA) și Serviciile Web Semantice (SWS) pot fi utilizate pentru a permite personalizarea și reconfigurarea în masă.

**Obiectivul** acestei secțiuni este de a prezenta o scurtă introducere în Cloud, Edge și Fog Computing și de a descrie stadiu actual al acestora.

Producția și sistemele robotizate în Cloud pot contribui la realizarea Industriei 4.0, utilizând tehnologii specifice domeniului de cloud computing. Eforturile anterioare de descentralizare a sistemelor de automatizare a fabricilor au utilizat SOA pentru dispozitivele CPS și IoT, dar aceste abordări s-au dovedit a fi ineficiente pentru problemele în timp real. Arhitecturile de tip *edge computing* au apărut recent ca o soluție eficientă pentru descentralizarea sistemelor de automatizare a fabricilor. Prin plasarea funcțiilor de control și procesare a datelor la marginea rețelei, aceste tehnologii permit analiza datelor în timp real, un trafic mic de rețea și costuri reduse de operare. *Fog computing* servește ca un strat între cloud și edge, oferind beneficiile ambelor. Acest tip de arhitectură permite procesarea cu latență redusă a volumelor mari de date și face legătura între serviciile de stocare centralizate și descentralizate. În consecință, edge și fog computing sunt opțiuni alternative pentru automatizarea industrială, oferind beneficii precum rentabilitate și analiză a datelor și control în timp real.

## **Secțiunea 4. Sisteme robotizate pentru producția inteligentă**

### 2.5. Aspecte generale

Caracteristica principală a noii generații de roboți industriali este capacitatea de a lucra în siguranță alături de oameni. Noua generație de roboți are încorporate măsuri de siguranță precum senzori integrați, complianța pasivă și depistarea supratensiunii (Fig. 2.3). Colaborarea om-robot (Human-robot collaboration (HRC)) este metoda care studiază interacțiunea dintre un om și un robot în timpul executării unui obiectiv comun. Un robot poate colabora în siguranță cu oamenii fizic sau de la distanță pentru a îndeplini o sarcină. În mod convențional, acesta se numește robot colaborativ și este construit cu tehnologii specifice conform ISO pentru proiectarea și fabricarea roboților colaborativi (International Organisation for Standardization, 2019).

**Obiectivul** acestei secțiuni este de a prezenta stadiul actual al sistemelor robotizate specifice Industriei 4.0, cu accent pe roboții industriali, în special roboții de tip braț articulat, utilizați în producția de prelucrare și asamblare.

Revoluția Industrie 4.0 a necesitat o nouă generație de roboți industriali care sunt concepuți pentru a fi mai eficienți și pentru a colabora cu oamenii și cu alți roboți sau mașini, permițându-le să fie auto-conștienți și auto-adaptabili la noi proiecte și procese de fabricație (Lee et al. 2015). În prezent, majoritatea roboților au încorporate caracteristici integrate care asigură cerințele ISO de siguranță, cum ar fi senzorii tactili pentru a detecta contactul. Cu toate că CPPS sunt facilitatori-cheie ai Industriei 4.0, roboții și sistemele HRC au apărut ca fiind cele mai atractive și promițătoare exemple de roboți în producția modernă.



**Fig. 2.3. Roboții colaborativi – noua generație de roboți industriali.**

Principalele provocări în domeniul HRC includ siguranța oamenilor și a roboților, și dezvoltarea unor tehnici de programare intuitive pentru non-experti. Pentru a crea siguranță, pot fi integrate diverse caracteristici mecanice, senzoriale și de control, și implementate strategii de coordonare și prevenire a coliziunilor. În plus, HRC necesită dezvoltarea unor tehnici de programare noi, cum ar fi programarea prin parcurgerea pas cu pas sau învățarea prin demonstrație.

Pe măsură ce complexitatea tehnologiei avansează, studiile de cercetare se concentrează asupra necesității unei educații orientate spre practică în „fabricile de învățare” pentru a-i ajuta pe ingineri să înțeleagă implicațiile acestor evoluții. O metodă practică de predare a strategiilor de digitalizare în CPPS a fost prezentată de Komenda et al. (Komenda et al., 2019), care se

bazează pe un caz de utilizare colaborativă om-robot. Sievers et al. (Sievers et al., 2020) au dezvoltat un mediu de învățare în realitate mixtă în domeniul CPPS, care permite cursanților să vizualizeze sisteme de asamblare complexe în mod holistic și să înțeleagă potențialul interacțiunii om-mașină.

## **Secțiunea 5. Învățare automată pentru aplicații robotizate de asamblare**

### 2.6. Aspecte generale

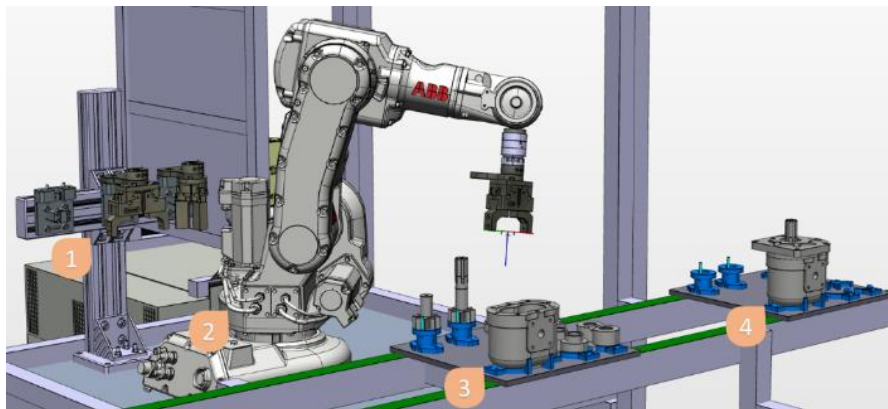
Inteligența Artificială (AI) este un domeniu de studiu care urmărește să facă mașinile să funcționeze în mod eficient și premeditat în mediul lor. Sistemele IoT sunt mașini inteligente, în timp ce AI este proprietatea colectivă a unei mașini de a îndeplini funcții precum învățarea sau luarea deciziilor. Tehnicile de Învățare Automată prin Întărire (Reinforcement Learning (RL)) au potențial pentru elaborarea unor soluții adaptative greu de implementat pentru sarcini robotice complexe și aparte (Stan et al., 2020).

**Obiectivul** acestei secțiuni este de a oferi o introducere detaliată în RL, de a evidenția progresele recente care au demonstrat un succes deosebit și de a descrie implicațiile lor viitoare pentru sistemele robotice. Această secțiune oferă o prezentare generală a metodologiilor RL actuale, împreună cu o analiză a provocărilor prezente, a oportunităților viitoare și a perspectivelor de dezvoltare posibile.

Tehnicile de RL sunt esențiale pentru transformarea unui robot industrial destinat unei activități fixe și repetitive într-un "manipulator inteligent" capabil să învețe și să îndeplinească o sarcină dorită, fără un controler explicit specific sarcinii, pentru a satisface cerințele producției personalizate. Cercetările privind urmărirea precisă și fără coliziuni a traiectoriilor cu control optim sunt în curs de desfășurare, în special pentru brațele robotizate pentru sarcini de tip "pick-and-place", "peg-in-hole", pliere a materialelor textile și urmărirea suprafețelor neregulate, evitând în același timp autocoliziunile și operațiunile de manipulare în cooperare. Au fost analizate, de asemenea, și activitățile de RL care abordează securitatea și consumul de energie al roboților.

Învățarea Profundă (Deep Learning (DL)) a fost aplicată în mod eficient în numeroase domenii importante, inclusiv în domeniul vederii computerizate, al roboticii și al RL. Cu toate acestea, printre limitările actuale se numără extinderea la sarcini robotice complexe, conceperea unor reprezentări puternice ale politicilor și optimizarea timpului de procesare. În ciuda acestor rezultate promițătoare, aplicațiile RL la roboții industriali sunt în prezent limitate din cauza efortului necesar pentru a configura cadrul de învățare și a lipsei de evaluare experimentală a abordărilor bazate pe RL. Învățarea prin Demonstrație (Learning from Demonstration (LfD)) este o metodă prin care agenții dobândesc noi competențe prin imitarea unui expert. LfD permite roboților să învețe acțiuni optime în medii nestructurate fără a impune o sarcină majoră operatorului. Învățarea prin Imitație (Imitation Learning (IL)) este o abordare alternativă la RL pentru rezolvarea problemelor de luare a deciziilor secvențiale. Ea urmărește să antreneze o politică pentru a imita comportamentul unui expert, având în vedere doar demonstrațiile expertului. Ea are două metode principale: clonarea comportamentului și învățarea prin întărire inversă.

Asamblarea robotizată este un proces de fabricație în care un robot poziționează, adaptează, potrivește și assemblează piese sau subansamble interschimbabile pentru a produce un produs funcțional. Acest proces necesită un nivel ridicat de repetabilitate, fiabilitate, adaptabilitate și succesiune. Sistemele tradiționale de asamblare robotizată se bazează pe secvențe de asamblare manuală, dar în fabricile inteligente, o abordare bazată pe RL este necesară pentru o asamblare reușită. Această abordare trebuie să fie capabilă să planifice secvențe corecte, să planifice mișcări individuale și fără coliziuni, să calculeze forțele și cuplurile necesare și să estimeze poziția pieselor de asamblare. În plus, modelul RL trebuie să se asigure că robotul este echipat cu efectorii finali corespunzători, ceea ce prezintă cercetătorilor provocări majore în domeniu.



**Fig. 2.4. Configurația tipică a unei celule de asamblare robotizată: unitate de depozitare a sculelor (1), robot cu sistem de prindere modular (2), piese de asamblat (3), produs funcțional finit (4).**

Planificarea secvenței de asamblare (Assembly Sequence Planning (ASP)) reprezintă un domeniu de cercetare activ, fiind prezentate soluții bazate pe algoritmi pentru a îmbunătăți eficiența asamblării, a reduce costurile și a scurta ciclurile de dezvoltare. În contextul viitoarelor fabrici inteligente, Watanabe și Inada (Watanabe et al., 2020) au propus recent o tehnică de calcul pentru căutarea secvenței optime de asamblare și a repartizării muncii.

## ***Secțiunea 6. Concluzii***

Secțiunea aceasta rezumă concluziile și evidențiază contribuțiile originale.

### *Industria 4.0 și virtualizare.*

Industria 4.0 este o inițiativă care pune accentul pe extinderea sistemelor de producție tradiționale la integrarea completă a sistemelor fizice, încorporate și informatice, inclusiv a Internetului. Ea evidențiază trei caracteristici de implementare: (1) integrarea orizontală prin intermediul rețelelor de valori, (2) integrarea digitală end-to-end a ingineriei pe întregul lanț valoric și (3) integrarea verticală și sistemele de producție în rețea. Directivele de punere în aplicare necesită acțiuni în mai multe domenii, inclusiv standardizarea și arhitectura de referință, gestionarea sistemelor complexe, organizarea muncii, siguranță și securitate, eficiența resurselor și formarea profesională.

Sistemele de Fabricație Reconfigurabile (RMS) reprezintă cel mai recent progres în dezvoltarea sistemelor de fabricație care pot facilita personalizarea în masă. Tehnologiile fundamentale cheie pentru RMS sunt Edge, Fog și Cloud computing, virtualizare și DT inteligent, CPS și tehnici ML avansate. Abordarea DevOps bazată pe DT a CPPS pentru a crea un proces de producție complet integrat și automatizat, permițând îmbunătățirea continuă, are potențialul de a deveni o metodă obligatorie de elaborare a proceselor în producția inteligentă.

Sustenabilitatea și digitalizarea sunt două progrese principale în domeniul producției care vor avea un impact substanțial asupra planificării și gestionării viitoarelor fabrici. Eficiența energetică și îmbunătățirea gestionării ciclului de viață al produselor sunt vizate de conceptul Industrie 4.0. Integrearea sistemelor de gestionare a energiei cu CPS conduce la sisteme CPS energetice (CPES), care utilizează diverse tehnici de optimizare pentru a controla consumul de energie al sistemelor de producție. Sistemul de servicii de monitorizare a CPPS pentru gestionarea colaborativă a producției utilizează adesea tehnologii bazate pe web pentru a facilita colaborarea între clienți, producători și furnizorii de echipamente, concentrându-se pe starea producției și a echipamentelor și pe monitorizarea consumului de energie.

#### *Robotica în Cloud.*

Robotica în Cloud este o intersecție între robotică, Cloud Computing, tehnici de învățare automată DL, IoT și alte tehnologii emergente. Avantajele Cloud Computing-ului sunt: scalabilitate rentabilă, capacitate mare de calcul și de stocare, servicii moderne de analiză și vizualizare a datelor. Arhitecturile de Edge Computing au creat în ultimii ani o propunere importantă pentru descentralizarea sistemelor de automatizare a fabricilor prin plasarea funcțiilor de control și procesare a datelor chiar la marginea rețelei. În consecință, Edge Computing este o alternativă majoră pentru proiectarea structurilor IoT care implică automatizarea industrială și controlul în timp real. Avantajele Edge Computing: lipsa întârzierilor în procesarea datelor, ceea ce permite analiza datelor în timp real, trafic redus în rețea și costuri de operare reduse. În plus, utilizarea unei arhitecturi de rețea descentralizate, cunoscută sub numele de Fog Computing, servește drept punte de legătură între Cloud și Edge, permițând utilizarea beneficiilor ambelor.

Structurile bazate pe DT care dispun de capacități de Cloud Computing pentru aplicații robotice au devenit o prezență importantă în producția inteligentă. Numeroase studii au demonstrat că Edge Computing poate satisface cerințele de transformare digitală ale industriei în materie de inteligență, conectivitate, optimizare a datelor, timp real și securitate, în timp ce Fog Computing poate oferi suport informatic local în mediul IIoT. Acest nivel de evoluție de ultimă generație este axat pe analiza avansată, care, atunci când este aplicată la datele privind mașinile, procesele și rețelele, oferă noi perspective pentru o mai bună luare a deciziilor și permite operațiuni inteligente, ceea ce duce la rezultate de impact pentru afaceri și beneficii sociale.

#### *Sisteme robotizate inteligente.*

Revoluția Industrie 4.0 a condus la apariția unei noi generații de roboți industriali care sunt concepuți pentru a fi mai eficienți, pentru a colabora cu oamenii și cu alți roboți sau mașini și pentru a fi auto-conștienți și auto-adaptabili la noi produse și procese de fabricație. Deși Sistemele de Producție Cyber-Fizice (CPPS) sunt factori-cheie ai Industriei 4.0, sistemele de



Colaborare Om-Robot (HRCS) au apărut ca fiind cele mai interesante și promițătoare exemple în producția modernă. HRCS combină dexteritatea și inteligența umană cu precizia și repetabilitatea roboților într-un spațiu de lucru comun. Senzorii și software-ul avansat permit o interacțiune fizică sigură, o manipulare intuitivă și operațiuni fără coliziuni, facilitând colaborarea dintre lucrător și robot. Principalele provocări în HRCS includ siguranța HRC și programarea robotului, care necesită interfețe pentru utilizatori intuitive și metode noi de programare pentru lucrătorii nespecializați.

Senzorii reprezintă o bază pentru realizarea inteligenței robotului. Senzorii de imagine, de contact și de forță sunt utilizați în robotica industrială, pe lângă senzorii de accelerație, senzorii lidar, senzorii inerțiali și senzorii cu ultrasunete. Metodele bazate pe DT pentru HRCS sunt abordări avansate care permit soluții inteligente pentru fabricarea inteligentă. Cadrele de proiectare HRC au apărut luând în considerare atât aspectele fizice ale interacțiunii om-robot, cât și impactul psihologic și social, deoarece este necesar în mod deosebit să se ofere omului confort și încredere în acțiunile robotului.

*Tehnici de Învățare Automată prin Întărire (RL) pentru aplicații robotizate de asamblare.*

Algoritmii din domeniul acțiunilor continue sunt cei mai eficienți și mai adecvați pentru manipularea robotizată. În contextul Industriei 4.0, controlerele roboților de tip braț articulat trebuie să fie capabile să se optimizeze singure. Această capacitate este necesară pentru a gestiona numeroase schimbări care apar în procesul de fabricație, pentru a asigura acuratețe și precizie ridicate și, în consecință, pentru a asigura rentabilitatea și calitatea produselor. În ciuda progreselor substanțiale ale RL în domenii de simulare, cum ar fi jocurile video, impactul său potențial asupra aplicațiilor reale ale roboților este încă limitat. Pentru a reprezenta comportamente și abilități de înaltă calificare, este necesar să se învețe funcții și metode de recompensă deosebit de complicate. Acest lucru deschide posibilitatea unei tendințe de explorare a unor algoritmi eficienți din punct de vedere al eșantionării și al timpului, care să rezolve atât probleme de stare continuă, cât și probleme de spațiu de acțiune. Au apărut metodologii, cum ar fi augmentarea datelor, aleatorizarea domeniului și transferul cunoștințelor de la simulare la realitate, pentru a îmbunătăți procesul de învățare pentru roboți ca răspuns la cererea de date de instruire masive, dificil de obținut și costisitoare.

Algoritmii pentru DL au revoluționat numeroase aspecte ale imaginii pe calculator și au fost rapid adoptați în robotică în ultimul deceniu. Cu toate acestea, percepția și învățarea în robotică, precum și controlul robotic sunt sarcini dificile care continuă să reprezinte o provocare serioasă pentru metodologiile convenționale. Cu toate acestea, utilizarea sistemelor de procesare a imaginilor într-o varietate de sarcini de asamblare robotizată prezintă potențiale oportunități de viitoare cercetări care ar putea duce la îmbunătățirea performanțelor și la accelerarea convergenței în comparație cu metodele de bază actuale.

**Contribuții teoretice originale:**

- Au fost sintetizate stadiul actual și tehnologiile care definesc paradigmele CPS și DT, precum și caracteristicile lor specifice și provocările actuale.
- Au fost prezentate tehnologiile inovatoare în domeniul Cloud Computing și evidențiate punctele forte și vulnerabilitățile acestora.
- A fost realizată o analiză cuprinzătoare a soluțiilor avansate de colaborare om-robot (Human-Robot Collaboration - HRC) și au fost prezentate în sinteză metodologiile actuale utilizate în infrastructura HRC, pentru siguranță și pentru programarea roboților.
- A fost realizată o prezentare într-o abordare originală, aprofundată a soluțiilor de ultimă generație pentru RL aplicate în domeniul ansamblării robotizate.

Rezultatele cercetării au fost publicate în:



**Stan, L.**, Nicolescu, A. F., & Pupăză, C. (2020). *Reinforcement Learning for Assembly Robots: a Review*. Proceedings in Manufacturing Systems, 15(3), 135–146, [ISSN 2067-9238](#), [Copernicus](#)

## Capitolul III. Implementarea platformei web pentru monitorizare

### 3.1. Obiective și sinopsisul contribuțiilor originale

**Obiectivul principal** al acestui capitol este de a prezenta elementele de bază ale sistemului de monitorizare propus, bazat pe tehnologie web, utilizat într-o aplicație robotizată, în special:

- Arhitectura sistemului.
- Sistemul robotic și DT-ul său.
- Platforma web și funcționalitățile sale.

În acest studiu de caz, un robot de tip braț articulată, echipat cu efectori specializați, trebuie să poziționeze, să alinieze și să asambleze componentele unei pompe cu angrenaje pentru a produce un produs funcțional. După elaborarea DT-ului și a programului robotului, RobotStudio este utilizat pentru a simula capacitățile platformei web. După ce rezultatele simulării confirmă faptul că platforma web respectă implementarea, sistemul robotic real este utilizat pentru a valida eficacitatea platformei.

În acest sens, platforma web trebuie să prezinte următoarele funcții:

- Acces autorizat (autentificare digest) din motive de securitate.
- Monitorizarea stării de producție (raport de piese finite) și a consumului total de energie al robotului (în mod continuu, la intervale de timp predefinite).
- Monitorizarea semnalelor din aplicația robotizată.
- Control asupra sistemului pentru oprirea robotului în caz de urgență.

#### **Contribuții teoretice originale:**

- Aplicarea conceptului de Edge Computing pentru achiziția și prelucrarea datelor într-o aplicație robotizată.
- Utilizarea unui controler virtual al unui robot în scopuri de testare și pentru replicarea funcționalității platformei web

#### **Contribuție metodologică originală:**

- Dezvoltarea platformei web de monitorizare pentru aplicații robotizate.
- Aplicarea unei proceduri de simulare pentru a demonstra funcționalitatea platformei web.

#### **Procedura experimentală:**

- Validarea platformei de monitorizare web pe un sistem robotic real.

## Secțiunea 1. Introducere

### 3.2. Aspecte generale

Așa cum a fost menționat în Capitolul I, sustenabilitatea este un alt progres al Industriei 4.0 care va avea un impact major asupra planificării și gestionării viitoarelor fabrici, deoarece procesele moderne de producție se vor caracteriza și prin sustenabilitate socială. Din punct de vedere ecologic și economic, consumul de energie al mașinilor și al roboților este o parte esențială a unei linii de producție, deoarece utilizarea eficientă din punct de vedere energetic a roboților industriali are un impact mare asupra costurilor de producție. În consecință, scopul acestei cercetări experimentale este de a analiza consumul de energie al unui robot industrial și de a-l monitoriza prin utilizarea serviciilor web specifice. Metoda utilizată pentru a analiza consumul de energie se bazează pe instrumentul de simulare integrat în ABB RobotStudio (Stan et al., 2023). O analiză mai cuprinzătoare a consumului de energie al roboților industriali este prezentată în Capitolul IV.

### 3.3. Metoda propusă

Această secțiune prezintă metoda propusă de monitorizare via Internet a sistemelor de fabricație robotizate, așa cum este ilustrată în Fig. 3.1 și detaliată în continuare în secțiunea următoare. Codificată în verde este starea actuală a echipamentului din laborator, în timp ce DT-ul sistemului robotic este de culoare gri. Elementele albastre reprezintă componentele platformei web, iar cele violete reprezintă posibilele aplicații ale platformei.

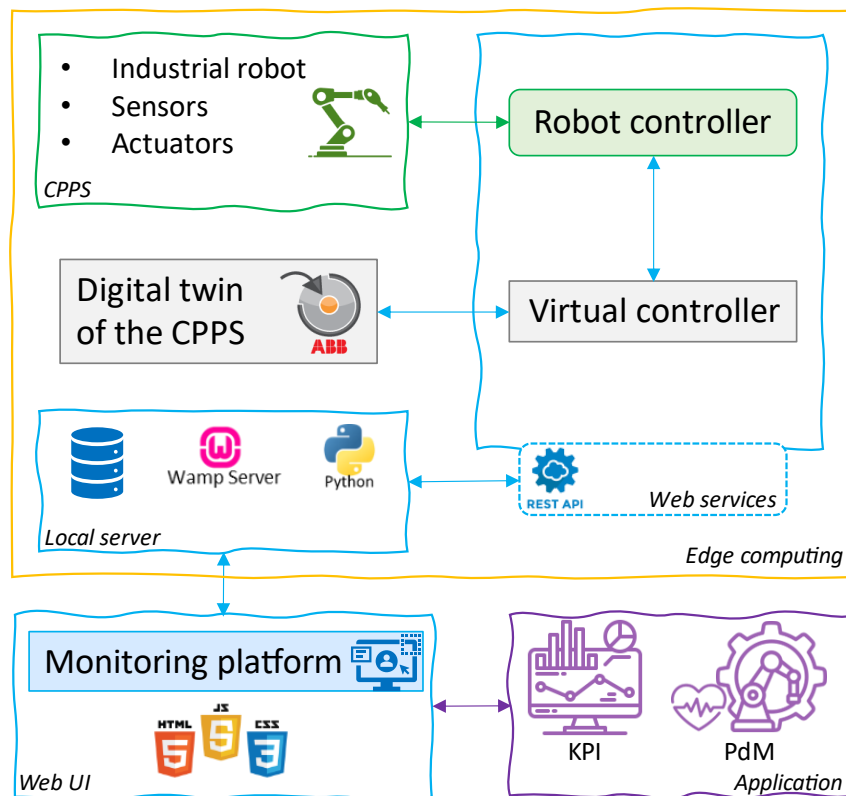


Fig. 3.1. Schema de principii a metodei propuse pe bază de servicii web pentru monitorizarea unei aplicații robotizate.

### 3.4. Prezentarea robotului de tip braț articulată – IRB 1200/0.9

IRB 1200 este un robot industrial cu 6 axe de la ABB proiectat pentru automatizarea flexibilă bazată pe roboți în industria de fabricație. Acesta are o sarcină utilă de 5 kg, o rază maximă de acțiune verticală de 900 mm, o repetabilitate de  $\pm 0,06$  mm și este echipat cu controlerul IRC5 Compact (IRC5C) și software-ul RobotWare (RW v6.08) pentru controlul robotului. RW v6.08 suportă fiecare funcționalitate a sistemului robotic, inclusiv controlul mișcării, comunicațiile, elaborarea și executarea programelor de aplicații.

### 3.5. Cerințe generale de securitate

Controlerul ABB IRC5 utilizează TCP și UDP ca protocoale de transfer pe Internet, permițând conectarea la o rețea standard și reducând costurile. Interconectarea sistemelor de control cu sistemele "de birou", cum ar fi ERP, permite realizarea de noi aplicații. Cu toate acestea, conectarea directă a sistemelor de control la rețeaua fabricii ridică probleme de securitate și este esențial să se implementeze măsuri preventive de protecție împotriva acestora. Calculatorul principal al controlerului robotului IRC5 și serverele OPC sunt elemente importante de protejat și se recomandă protejarea rețelei de control a fabricii cu ajutorul unui firewall sau al unui alt mecanism de securitate.

### 3.6. Considerente teoretice și practice

Tabelul 1 rezumă principalele caracteristici ale sistemului propus. Acest studiu de caz se concentrează asupra unui sistem de producție în care un robot assemblează componente transportate la spațiul său de lucru de un conveior. Programarea robotului se bazează pe semnalele senzorilor, iar ordinea de asamblare este predeterminată. Prin urmare, platforma web trebuie să fie capabilă să comunice cu fiecare dispozitiv din sistemul de producție. Acest criteriu este îndeplinit, deoarece platforma web poate comunica cu fiecare robot, senzor și dispozitiv de acționare care este comandat de controlerul robotului. Comunicarea bidirecțională permite platformei web să obțină date de la controlerul robotului și să aibă control asupra acestuia, precum oprirea robotului în caz de urgență. Sistemul propus trebuie să colecteze date la fiecare oră, în timp ce controlul asupra aplicației robotizate trebuie să fie aproape imediat, fără întârzieri substanțiale. Procesul robotizat este în întregime automatizat, iar DT-ul include funcții de simulare robuste, cum ar fi verificarea traiectoriei robotului împotriva coliziunilor și calcularea consumului de energie. Pentru a calcula consumul de energie, DT-ul trebuie să combine modelele cinematice și matematice cu un modul de control al comportării stabilit. În cele din urmă, deoarece este necesară doar comunicarea în timp real și nu este necesară nicio procesare complexă, este suficient ca sistemul propus să ofere capacități de calcul de tip Edge Computing.

**Tabelul 1. Caracteristicile metodei propuse.**

Integration level	Connectivity mode	Update frequency	CPS intelligence	DT simulation capabilities	Digital model	Computing level
Robot	Uni-directional	Daily	Human triggered	Static	Geometry, kinematics	Edge
Production System	Bi-directional	Hourly	Automated	Dynamic	Control behavior	Fog
Factory environment		Immediate real time	Autonomous (Ai-driven)	Predictive, prescriptive	Multi-physical behavior	Cloud

## Secțiunea 2. Dezvoltarea platformei web

### 3.7. Prezentarea generală a platformei web

Informațiile sunt colectate și stocate pe un server local în format JSON, iar interfața grafică web este creată folosind HTML5, JavaScript și CSS3, precum și framework-ul Bootstrap 4 (Bootstrap v4.6, 2022) pentru dezvoltarea front-end-ului și librăria Highcharts (Highcharts, 2022) pentru a realiza grafice interactive care afișează informațiile. Pentru a comunica cu controlerul robotului se utilizează interfața de programare REST API ce permite interacțiunea cu serviciile web RESTful oferite de ABB.

Pentru realizarea platformei web, au fost create următoarele elemente (ilustrate în Fig. 3.2):

- 1) O conexiune între controlerul robotului real și cel virtual.
- 2) O conexiune de comunicare între controler și serverul web.
- 3) O clasă de utilitate pentru a facilita comunicarea controler-server web (RWS.py).
- 4) Un program utilitar pentru colectarea și stocarea datelor (microservice.py).
- 5) O interfață grafică web care permite unui utilizator să monitorizeze o selecție de semnale ale senzorilor din celula de lucru (Tabloul de Bord).
- 6) Diagrame de vizualizare care permit unui utilizator să monitorizeze productivitatea celulei robotice și consumul de energie al robotului (Graficele de Control).

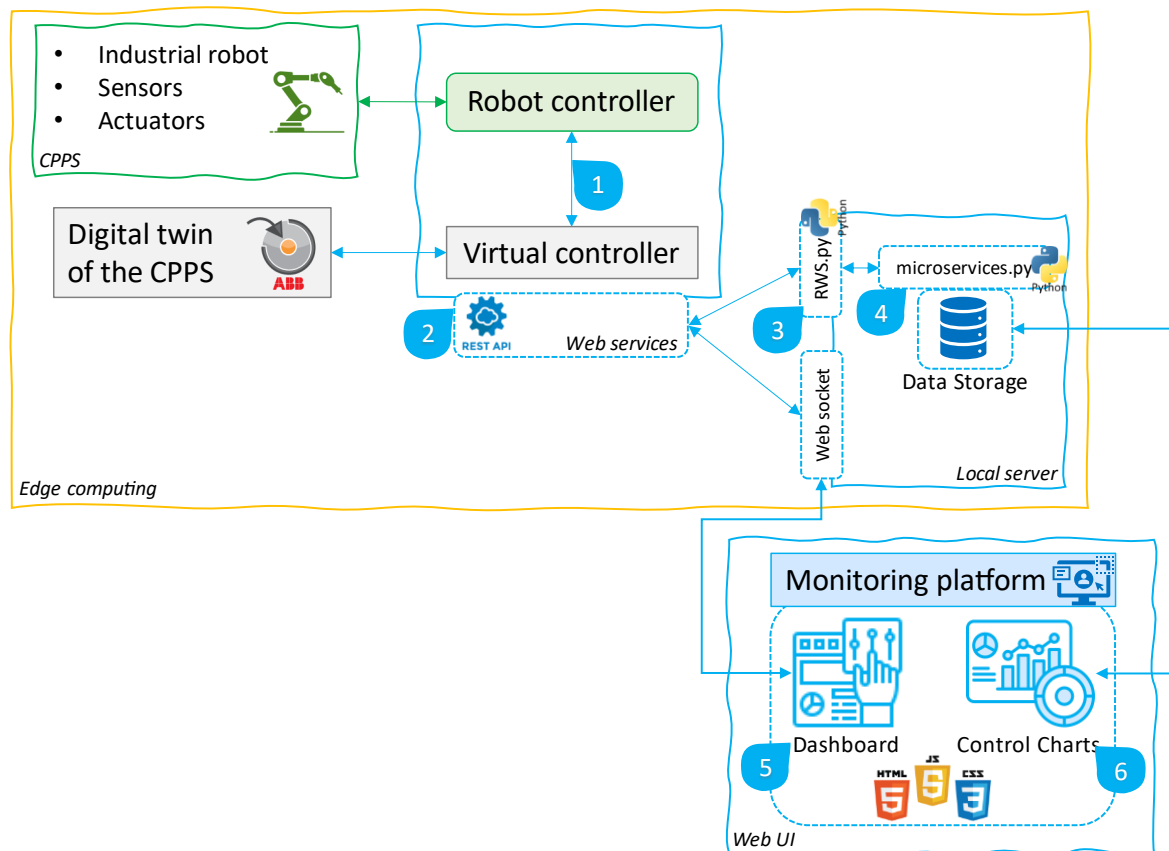


Fig. 3.2. Schema de principiu a sistemului de monitorizare web implementat

### 3.7.1. Conexiunea dintre controlerul robotului real și cel virtual

Controlerul IRC5 dispune de următoarele tehnologii de comunicare: servicii web pentru roboți, o interfață de programare bazată pe HTML5 pentru comunicarea cu roboții de pe orice dispozitiv, indiferent de sistemul de operare, și mesagerie socket, care permite comunicarea între mașini prin schimbul de mesaje TCP/IP într-o rețea. Controlerul virtual poate fi descris ca un software care emulează controlerul real al robotului pentru a permite ca același software care controlează roboții să ruleze pe un PC în scopuri de programare, simulare și analiză offline. Indiferent dacă este virtual sau real, adresa IP a controlerului poate fi descoperită cu ajutorul instrumentului de descoperire Bonjour al sistemului de operare (Windows/IOS).

### 3.7.2. Conexiunea de comunicare dintre controler și serverul web

Platforma web a fost proiectată pentru a accesa informații de la controlerul robotului virtual folosind servicii web care respectă forma arhitecturală a interfețelor API RESTful (RESTful API, 2022) folosind protocolul HTTPS, returnând mesaje în formate de date XML și JSON. Serviciile Web pentru Roboți (RWS) (ABB Robot Web Services, 2022) cuprind mai multe servicii, iar fiecare serviciu poate avea servicii suplimentare cu una sau mai multe resurse. Fig. 3.3 ilustrează diagrama resurselor RWS și evidențiază principalele servicii utilizate în această lucrare.

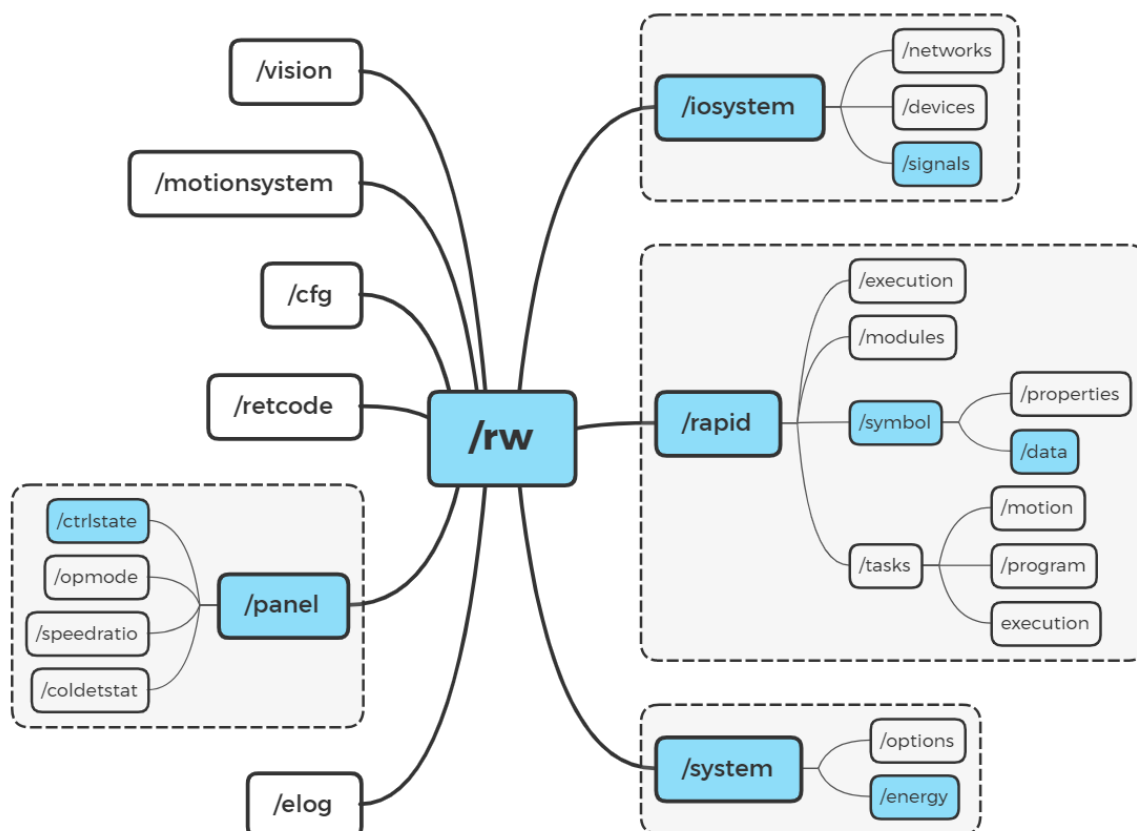


Fig. 3.3. Diagrama de resurse și servicii a RWS (Robotic Web Services).

### 3.7.3. Clasa de utilitate pentru a facilita comunicarea controler-server web

Clasa de utilitate pentru facilitarea comunicării cu controlerul robotului a fost implementată în Python 3. Clasa dezvoltată RWS permite crearea unei conexiuni de sesiune persistente cu un controler, prin furnizarea adresei IP a robotului, a unui nume de utilizator și a unei parole. Metoda de autentificare implicită pentru RWS este digest, iar o autentificare cu un nume de utilizator și o parolă este obligatorie. Funcțiile clasei permit modificarea și citirea variabilelor de tip RAPID, precum și citirea măsurătorilor de energie.

### 3.7.4. Programul de utilitate pentru colectarea și stocarea datelor

În mod similar, programul de utilitate dezvoltat pentru colectarea datelor de la controlerul robotului și stocarea acestora în fișiere JSON a fost implementat în Python 3.

### 3.7.5. Interfața grafică web: Tabloul de Bord și Graficele de Control

Interfața grafică care permite conectarea la controlerul robotului este prezentată în Fig. 3.4. Adicional, Fig. 3.5 ilustrează Tabloul de Bord care permite monitorizarea unui set predefinit de semnale.

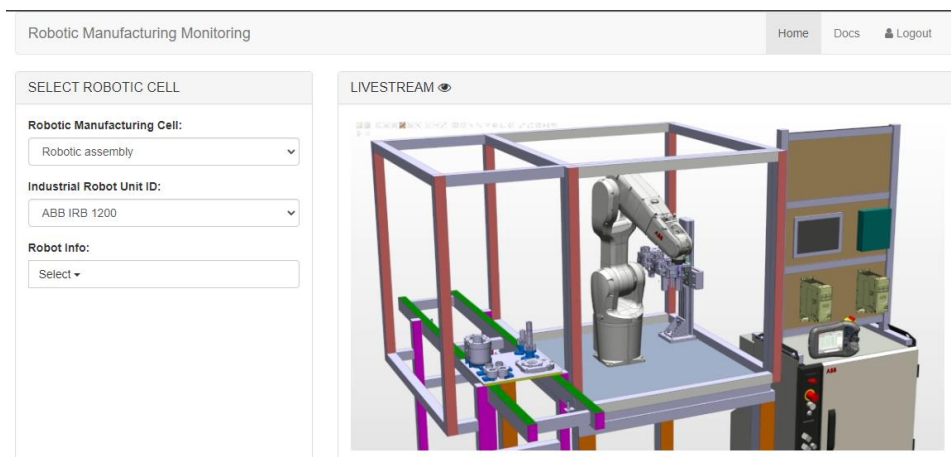


Fig. 3.4. Opțiunile prezente în interfața web pentru conectarea la controlerul unui robot și la panoul de Livestream.

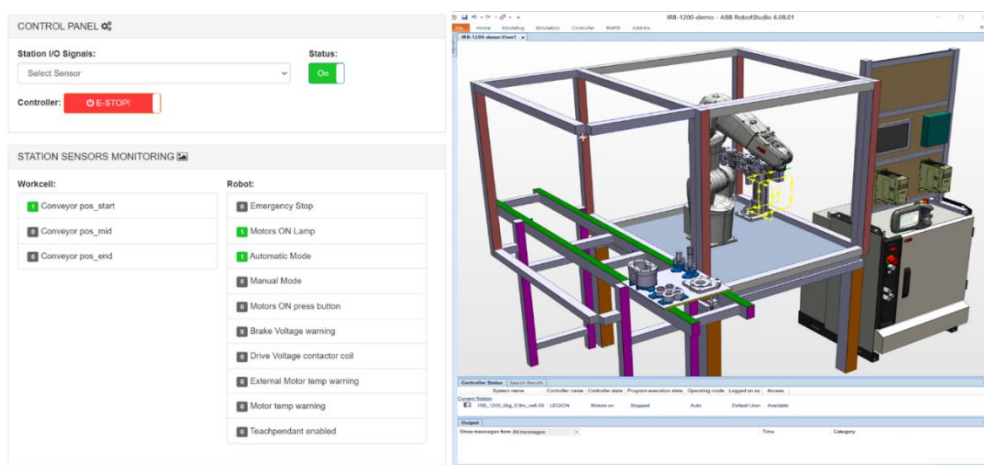


Fig. 3.5. Tabloul de Bord: panoul de control și de monitorizare pe bază de semnale (partea stângă); DT-ul dezvoltat în ABB RobotStudio (partea dreaptă).



### 3.8. Procedura de simulare pentru demonstrarea funcționalității platformei

Modul auto este o metodă de funcționare în care robotul acționează în conformitate cu programul de sarcini, fără controlul manual al operatorului. Fig. 3.6 ilustrează una dintre capacitățile de monitorizare ale sistemului web realizat: un semnal (1) din Tabloul de Bord indică faptul că dispozitivul de învățare este activ (2), în timp ce alte semnale (3, 5) indică faptul că robotul este controlat în modul auto (4) și că motoarele sunt pornite (6), așa cum se menționează și în interfața dispozitivului de învățare.

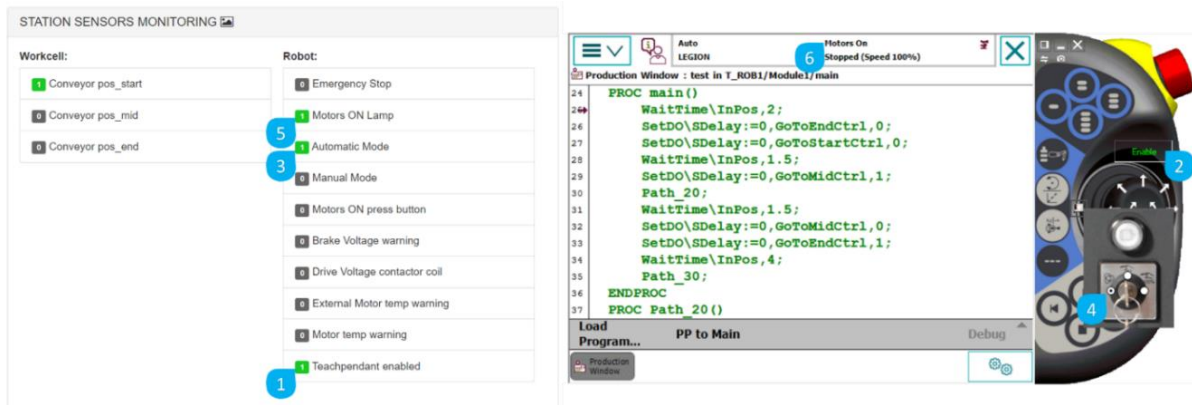


Fig. 3.6. Dispozitivul de învățare este pornit, iar robotul este în modul auto.

În scopuri de testare și pentru a reproduce funcționalitatea celor două grafice de control, RobotStudio a fost utilizat pentru a simula continuu procesul robotic, în timp ce programul de microservicii a rulat în fundal pentru a colecta și stoca date de la controlerul virtual la fiecare oră. Fig. 3.7 prezintă graficul interactiv care afișează consumul de energie al robotului. Sunt definite un nivel anticipat și două praguri de control pentru situațiile în care consumul depășește sau scade sub intervalul dorit. În cazul în care productivitatea celulei de lucru este constantă, dar consumul de energie depășește pragurile, acest lucru poate indica o problemă a robotului. Fig. 3.8 ilustrează graficul de control al productivității pentru celula de lucru. Atunci când atât productivitatea, cât și consumul de energie ajung la zero, acest lucru indică faptul că sistemul robotului a fost inactiv pentru intervalul de timp respectiv, ceea ce se poate datora unei varietăți de factori, cum ar fi o defecțiune semnificativă sau o fereastră de întreținere programată.

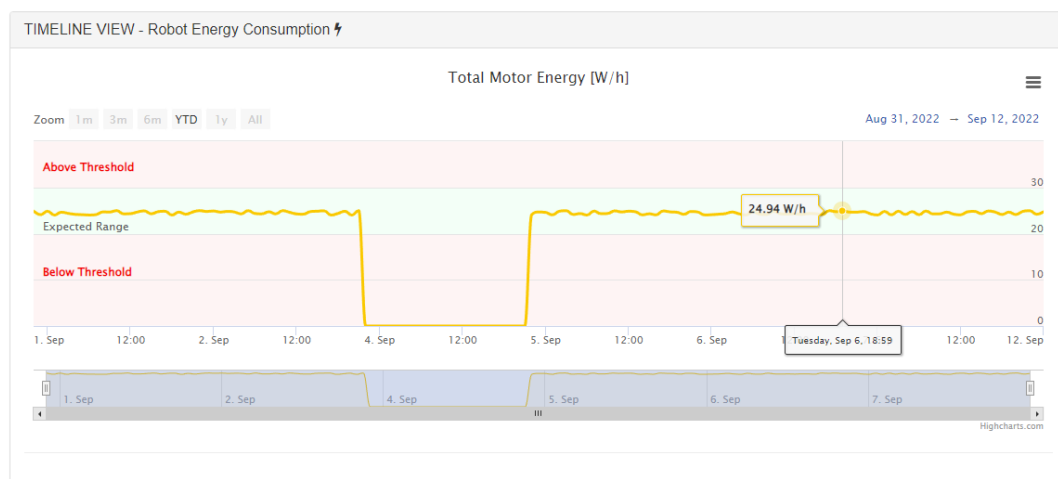


Fig. 3.7. Graficul consumului de energie al robotului din platforma web dezvoltată.

Înregistrările ilustrate în Fig. 3.7 și Fig. 3.8 sunt prezentate doar în scop demonstrativ. În timp ce controlerul virtual execută programul robotului, programul de microservicii colectează date privind piesele finite și consumul de energie, în timp ce graficele de vizualizare le afișează pe platforma web. A fost conceput un program de control pentru a schimba periodic ora de pe mașina de testare, pentru a colecta date din oră în oră, fără a irosi resurse. Acest proces asigură faptul că robotul nu va funcționa continuu timp de șase ore, fără a influența rezultatul testului.

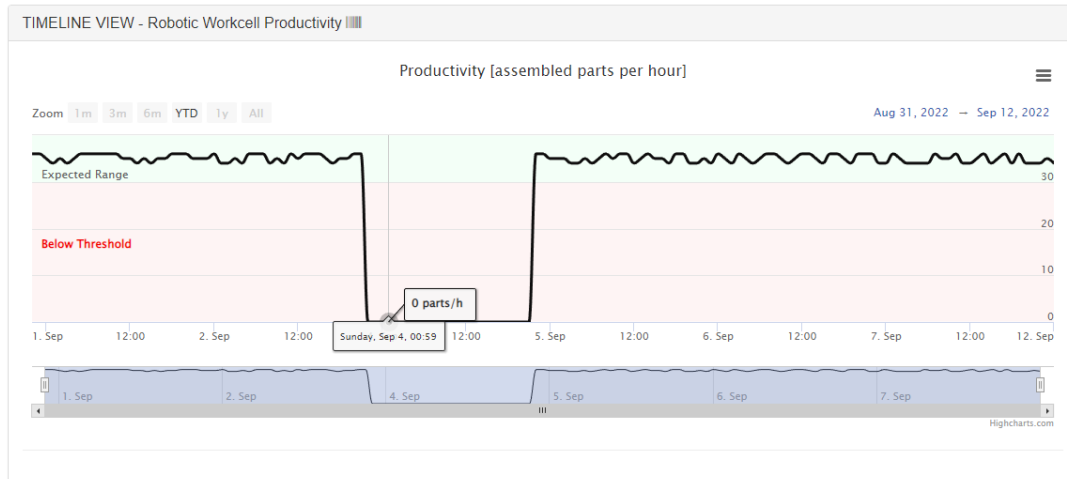


Fig. 3.8. Graficul de productivitate al celulei de lucru robotizate din platforma web dezvoltată.

### Secțiunea 3. Validare experimentală

Au fost efectuate experimente pentru a evalua eficacitatea abordării propuse. Capacitatea de monitorizare a semnalelor de către platforma web a fost validată prin asigurarea faptului că modificările senzorilor din controlerul robotului au fost reflectate în timp aproape real pe platforma web. În plus, a fost verificată capacitatea platformei web de a colecta și prezenta datele în timp util.

#### 3.9. Configurația experimentală



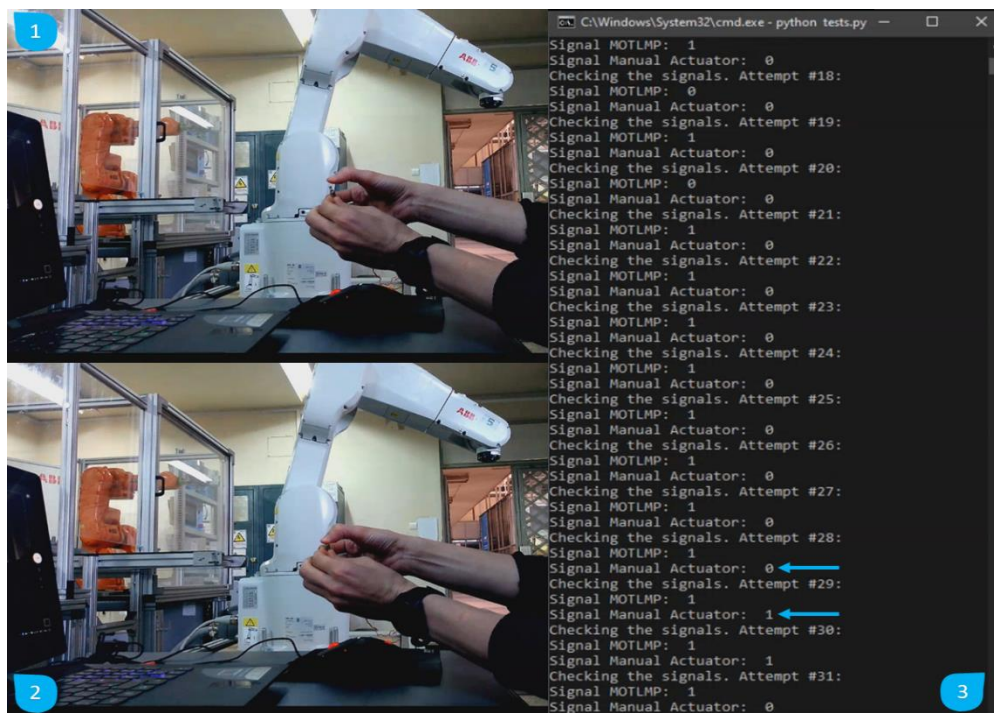
Fig. 3.9. Configurația experimentală formată dintr-un robot articulată IRB 1200, cu conexiune între controlerul IRC5 (1) și laptopul pe care rulează RobotStudio (2).

Platforma experimentală cuprinde componentele următoare, ilustrate și în (Fig. 3.9):

- Celula robotică fizică, care dispune de un robot de tip braț articulat, ABB IRB 1200, cu o capacitate de manipulare de 6 kg, o rază de acțiune de 0,9 m și o repetabilitate a poziției de 0,03 mm.
- Controlerul robotului IRC5, care rulează RobotWare versiunea 6.08.
- Controler virtual, care rulează în RobotStudio cu o versiune similară a software-ului RobotWare.
- Modelul digital al celulei robotizate, creat în RobotStudio.

### 3.10. Achiziția de semnale de la controlerul robotului

Un buton de testare a fost folosit pentru a evalua timpul de transmisie a semnalului și viteza de răspuns a platformei web. Butonul de testare a fost conectat fizic la controler și i s-a atribuit un semnal digital. Prin utilizarea serviciilor web, s-a stabilit că, atunci când butonul de testare este apăsat, semnalul colectat de la controlerul robotului se schimbă de la 0 la 1 (Fig. 3.10) într-un interval de timp de ~100ms, în funcție de capacitățile de procesare ale mașinii care rulează programul (CPU: Intel I7-7700 @2,80GHz, SSD Samsung 970 EVO 1TB)."



**Fig. 3.10. Butonul de testare este conectat la controlerul robotului și este astfel atribuit unui semnal digital.**

### 3.11. Analiza consumului de energie online vs. rezultatele simulării

Fiind un software foarte utilizat în industrie, RobotStudio oferă două metode de analiză a consumului de energie al robotului: modul online și modul de simulare. În modul de simulare, puterea totală a motorului și energia totală a motorului sunt derivate de la un robot ABB care funcționează în condiții normale. Spre deosebire de această metodă, în modul online, semnalele pentru puterea totală a motorului și energia totală a motorului sunt citite direct de la acționările motorului robotului (Fig. 3.11). Ca în cazul oricărui model de simulare care utilizează

aproximări, datele privind energia înregistrate din simulare sunt ușor subestimate, deoarece pierderile electromecanice din acționările robotului și impactul condițiilor de funcționare sunt probabil neglijate de modelul software.

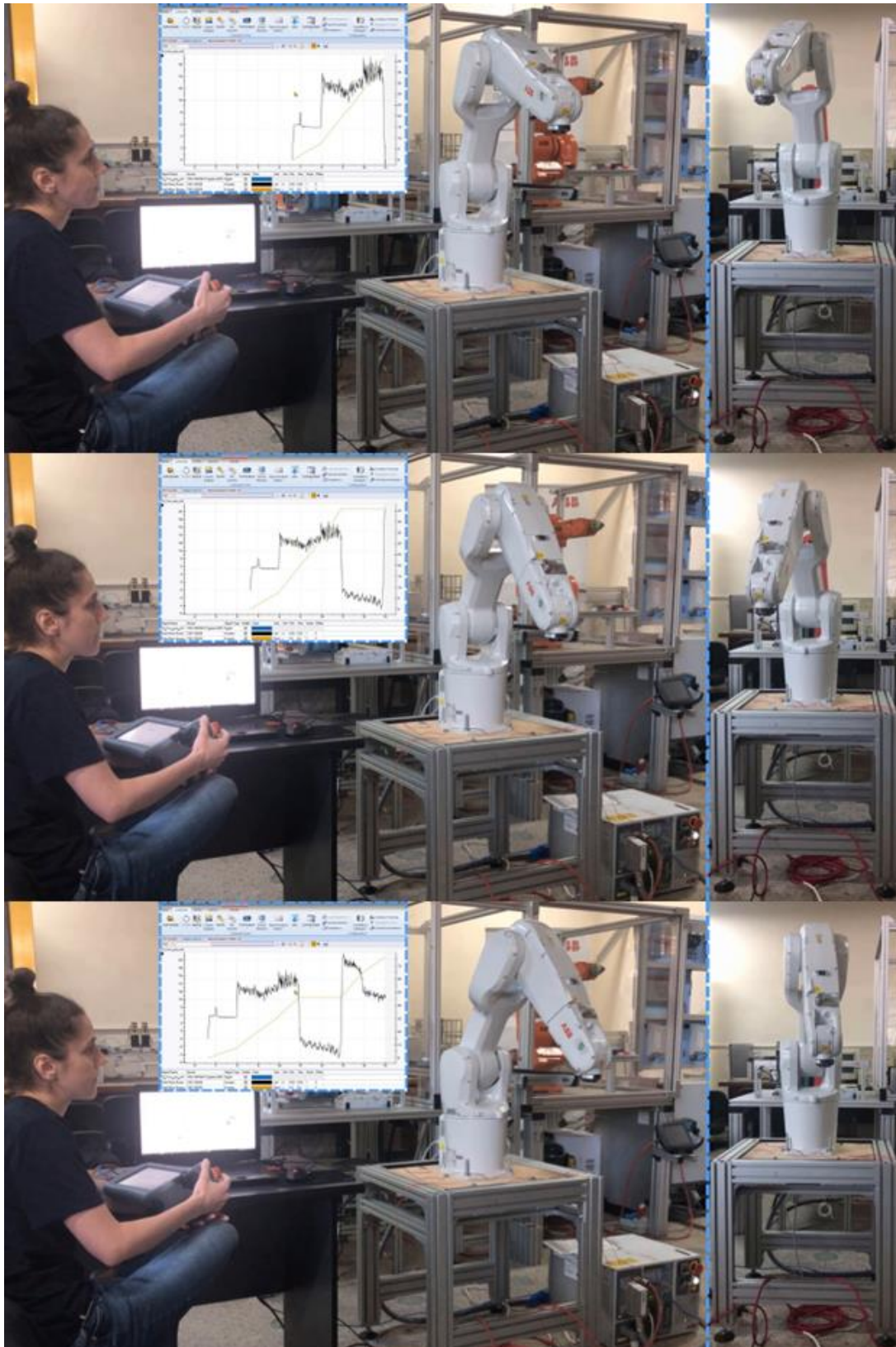


Fig. 3.11. Analiza consumului de energie a robotului în RobotStudio

## **Secțiunea 4. Concluzii**

Acest capitol a oferit o prezentare generală a dezvoltării platformei web pentru monitorizarea unei celule robotizate pentru asamblarea. Rezultatele simulării au dovedit funcționalitatea platformei web și buna integrare a acesteia cu sistemul robotizat.

- Accesul la platforma web este permis numai cu un nume de utilizator și o parolă. Utilizând protocolul HTTP și hashing-ul criptografic pentru a evita atacurile de reluare, metoda de autentificare digest susține securitatea sistemului la autentificare.
- Graficele de Control interactive facilitează monitorizarea producției celulei robotice și a consumului de energie al robotului.
- Interfața grafică web permite monitorizarea sistemului robotic pe baza semnalelor senzorilor. Simularea a demonstrat că modificările senzorilor sunt semnalate imediat în Tabloul de Control.
- Simularea a arătat, de asemenea, că este posibilă oprirea robotului din executarea programului RAPID în caz de urgență.

Activitatea de cercetare viitoare poate fi orientată spre numeroase domenii complexe:

- Platforma web poate fi extinsă pentru a include mai mult de un sistem robotizat, oferindu-i capacitatea de a monitoriza întreaga producție din fabrică, cu atenție pe diferite aspecte:
  - Interacțiunea om-robot - cu scopul de a facilita cooperarea dintre oameni și roboți în mediile industriale
  - Robotică colaborativă - cu scopul de a deservi sisteme multi-robot care pot lucra împreună pentru a îndeplini o sarcină comună
- Securitate cibernetică: îmbunătățirea securității aplicațiilor web pentru roboții industriali, protejarea împotriva amenințărilor cibernetice și asigurarea confidențialității datelor.
- Atunci când cererea de capacitate de procesare crește, sistemul poate fi extins la Fog sau Cloud Computing, care va oferi, de asemenea, capacități suplimentare de analiză.

### **Contribuții teoretice originale:**

- Aplicarea metodei de Edge Computing pentru achiziția și prelucrarea datelor într-o aplicație robotizată.
- Utilizarea unui controler virtual al unui robot în scopuri de testare și pentru replicarea funcționalității platformei web.

### **Contribuții metodologice originale:**

- Dezvoltarea platformei web pentru monitorizarea unui aplicații robotizate.
- Realizarea unei proceduri de simulare pentru a demonstra funcționalitatea platformei.

### **Procedură experimentală:**

- Validarea platformei web pentru monitorizarea unui sistem robotic real.

Rezultatele cercetării și metoda propusă sunt în curs de publicare:



**Stan, L.**, Nicolescu, A. F., & Pupăză, C. (2023). *Remote-monitoring-and-control-via-robot-web-services*, UPB. Scientific Bulletin, Status: Accepted, Publication in progress. [Scopus](#)

## **Capitolul IV. Dezvoltarea unui model DT pentru aplicații de debavurare robotizate cu capacități de monitorizare bazate pe tehnologii web**

### 4.1. Obiective și sinopsisul contribuției originale

**Obiectivul** metodei prezentate în acest studiu de caz este de a reuni DT-ul unei celule robotice cu platforma web dezvoltată pentru monitorizarea procesului de producție.

Cerințele studiului de caz sunt următoarele:

- Piesa de prelucrat este o componentă din plastic de mari dimensiuni (1800 mm x 900 mm), cu toleranțe mici, care prezintă bavuri (defecte), turnată prin injecție.
- Sistemele de debavurare care utilizează controlul activ al forței sunt costisitoare și foarte complexe, prin urmare, ar trebui să se introducă o soluție rentabilă.
- Generarea a numeroase treceri pentru întreaga piesă de prelucrat în funcție de înălțimea bavorilor și de raza frezei sculei ar crește timpul de prelucrare și ar scădea eficiența energetică a robotului, prin urmare, ar trebui implementată o metodă de debavurare mai eficientă.

Aplicația propusă utilizează un robot de tip braț articulat cu un sistem automat de schimbare a efectorilor, o sculă cu control pasiv al forței și complianță radială, și un efector cu vacuum pentru manevrarea piesei de prelucrat. Din cauza dimensiunii piesei de prelucrat, celula robotică pentru debavurare utilizează o configurație standard de tip „sculă în acțiune” („tool-in-hand”): în timpul procesului de debavurare, piesa de prelucrat este fixată, iar robotul manipulează scula de debavurare.

Contribuțiile originale ale lucrării pot fi grupate în următoarele categorii:

#### **Contribuții practice aplicabile în domeniul ingineriei industriale:**

- Aplicarea unei soluții rentabile de debavurare bazate pe un efector de debavurare cu control pasiv și complianță radială.
- Dezvoltarea unei metode de debavurare pe baza tehnologiilor de inspecție video pentru a crește eficiența procesului de fabricație.

#### **Contribuții metodologice:**

- Dezvoltarea unui DT pentru o aplicație robotică de debavurare în ABB RobotStudio.
- Integrarea platformei web pentru monitorizarea celulei robotizate de debavurare în vederea afișării consumului de energie al robotului și a datelor de producție.
- Folosirea unui bot Telegram cu un set de reguli specifice pentru declanșarea alertelor.

#### **Contribuții în domeniul programării roboților:**

- Programarea robotului prin tehnici de OLP pentru a debavura piesa, împreună cu:
  - analiza consumului de energie a acestuia.
  - simularea offline pe bază de semnale a celulei robotice.

## **Secțiunea 1. Aplicație de debavurare robotizată**

### 4.2. Introducere

În aplicațiile obișnuite, sistemele de prelucrare robotizate au fost utilizate doar pentru proceduri care nu implică sarcini mari de prelucrare sau care nu necesită o precizie ridicată a traiectoriei. Roboții industriali sunt utilizați în mod obișnuit pentru proceduri care necesită o forță redusă, cum ar fi rectificarea, decuparea, lustruirea, găurirea sau frezarea. Datorită rentabilității, adaptabilității și multifuncționalității lor, roboții industriali au câștigat un interes semnificativ atât în mediul academic, cât și în producție (**Ivan et al., 2015**).

Bavurile sunt defecte legate de proces (Aurich et al., 2009) pe marginile pieselor prelucrate, care au geometrii și grosimi imprevizibile. Debavurarea de înaltă precizie, în care bavurile mici sunt îndepărtate cu ajutorul sculelor de tăiere care conturează marginile pieselor prelucrate, poate fi distinsă de debavurarea grosieră, care implică îndepărtarea bavurilor mai mari, cum ar fi bavurile de turnare. Din cauza necesității de a utiliza mai multe scule, celulele de lucru sunt construite de obicei cu o configurație "piesă în acțiune" („part-in-hand”), în care robotul manipulează piesa de prelucrat, iar sculele de debavurare sunt fixe. Pentru piesele de prelucrat mai mari se preferă configurația „sculă în acțiune” („tool-in-hand”), în care robotul manevrează sculele.

În general, se pune accentul pe asigurarea unor condiții optime de contact între scula de debavurare și marginile de contur, pe adaptarea poziției și rigidității sculei la prezența și grosimea bavurilor și pe prevenirea ruperii sculei în cazul unor abateri neprevăzute ale piesei de prelucrat. Sculele de debavurare robotizate și suporturile pentru piese de prelucrat sunt proiectate cu sisteme de complianță adaptive pentru a asigura un contact și o presiune constantă între sculă și piesa de prelucrat, indiferent de forma bavurii sau de imprecizia de poziționare a robotului, și pentru a evita vibrațiile de prelucrare. Sunt utilizate în mod obișnuit metode de complianță activă și pasivă, cum ar fi sistemele hibride avansate de control al forței/poziției sau al impedanței și sistemele pasive de amortizare cu arc. Sculele cu sisteme de complianță îmbunătățesc performanța prin atenuarea efectelor preciziei limitate a mișcării robotului cauzate de rigiditatea scăzută, de recul, de erorile cinematice și de factorii de mediu.

Utilizarea unor instrumente avansate pentru programarea și simularea roboților cu ajutorul tehnologiei DT poate contribui la creșterea eficienței sistemelor robotice de debavurare prin prezicerea erorilor de prelucrare și prin furnizarea de compensații suplimentare de traiectorie. Integrarea Cloud Computing-ului în sistemele robotice permite serviciilor bazate pe Cloud să extindă funcționalitățile roboților și să rezolve conflictul dintre nevoile de calcul intensiv și cerințele de control local. Pentru a simula procesul de producție, este important să se dispună de informații exacte, în timp real, despre sistemele robotice fizice pentru a se asigura că modelele de simulare reflectă starea lor actuală.

În domeniul roboticii industriale, problemele legate de consumul de energie au fost abordate ocazional, de obicei cu referire la circumstanțe specifice. Reducerea consumului de energie al unui singur robot poate fi realizat într-o varietate de moduri, începând cu faza de planificare a traiectoriei, dar sustenabilitatea pe termen lung poate fi obținută numai printr-o



optimizare energetică de ansamblu a întregii celule robotice, bazată pe proceduri de optimizare eficiente. Minimizarea consumului de energie al roboților necesită o monitorizare, o evaluare și o prognoză precisă a consumului de energie. Modelarea și simularea consumului de energie pe bază de tehnologie DT sunt mijloace eficiente pentru a îndeplini aceste cerințe.

Aplicațiile web permit activități de producție eficiente și eficace prin colaborări la distanță cu ajutorul serviciilor web. Cu toate acestea, există încă obstacole care trebuie depășite în ceea ce privește constrângerile de timp real, securitatea și confidențialitatea, viteza de procesare și întreruperile din producție. De obicei, pentru a minimiza latența în aplicațiile web în timp real, se utilizează modele 3D bazate pe grafuri de scenă cu noduri de control comportamental încorporate, dirijat de datele reale ale senzorilor, în locul transmiterii în direct a imaginilor camerei video.

#### 4.3. Metoda propusă pentru aplicația de debavurare robotizată

În ciuda folosirii sistemelor de măsurare cu laser și a diverselor sisteme de control și tehnici de compensare a erorilor în procedurile de prelucrare robotizată, se remarcă o lipsă a studiilor privind utilizarea sculelor cu complianță radială, în special în situațiile în care toleranțele pieselor sunt mici, iar piesa de prelucrat are dimensiuni mari. Acesta este un considerent important în cazul studiului actual de debavurare. Sistemele de control pasiv al forței nu monitorizează forțele de tăiere; în schimb, acestea se adaptează la conturul piesei și furnizează o forță constantă. În aplicațiile de frezare, complianța radială permite sculei să se rotească pe 360 de grade în cadrul unei raze de complianță. Aceste sisteme sunt cele mai potrivite pentru aplicațiile cu bavuri sau defecte în general consistente, dar cu toleranțe slabe de la piesă la piesă, pentru a diminua în mod semnificativ deteriorarea piesei de prelucrat (Stan et al., 2022).

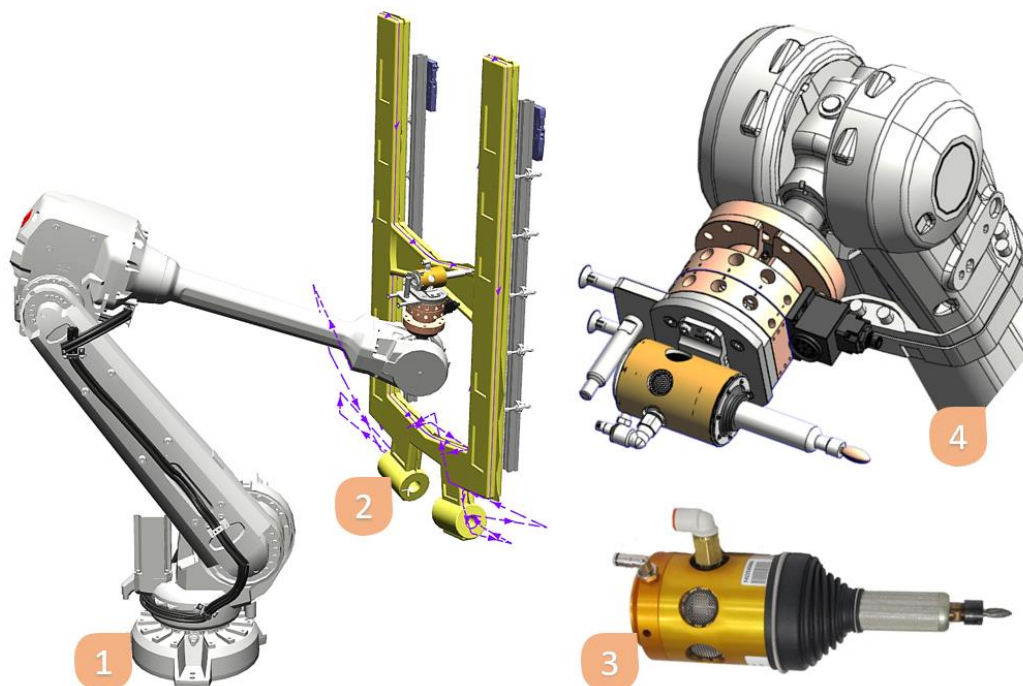


Fig. 4.1. Robot de tip braț articulat (1) care debavurează o piesă de prelucrat din material plastic (2) utilizând o sculă cu control pasiv și cu complianță radială (3,4).

Metoda dezvoltată pentru aplicația de debavurare robotizată (ilustrată în Fig. 4.1) cuprinde:

- Un robot de tip braț articulată, ABB IRB 4600, având o capacitate de manevrare de 40kg, o rază maximă de acțiune de 2.55 m, o precizie în repetabilitatea de poziționare de 0.06 mm și o precizie a traiectoriei de 0.28 mm.
- Un controler al robotului, IRC5, cu un singur dulap, OmniCore V250XT.
- Un sistem automat de schimbare a efectorilor, ATI QC-41.
- O sculă cu control pasiv al forței și complianță radială, ATI Flexdeburr RC300.
- Datorită dimensiunii piesei de prelucrat, celula de debavurare urmărește o configurație standard de tip „sculă în acțiune” („tool-in-hand”)

#### 4.4. Sisteme robotizate pentru debavurare

Cererea de roboți industriali a crescut datorită tendințelor de automatizare și a progreselor tehnologice. Federația Internațională de Robotică (IFR) preconizează că, până în 2024, vor fi instalate 500.000 de unități pe an la nivel mondial. Industria electronică a depășit industria auto ca principal beneficiar al roboților industriali. Experții prezic că firmele se vor concentra pe colaborarea om-mașină, pe aplicații simplificate și pe roboți simpli. Pentru ca roboții să fie competitivi în producție, aceștia trebuie să fie fiabili, rezistenți și capabili să respecte mediul înconjurător. De asemenea, ar trebui să fie configurabili cu senzori suplimentari, să aibă o programare simplă și să fie versatili pentru a reduce cheltuielile cu dispozitivele de fixare cu scopuri speciale. Datorită flexibilității lor deosebite în timp ce se deplasează de-a lungul marginilor unor componente de formă complexă, sistemele robotice sunt considerate soluții rentabile pentru automatizarea procesului de debavurare, dar necesită o precizie ridicată a traiectoriei sculei și o precizie ridicată în repetabilitate a poziției. S-au efectuat studii pentru a analiza și a atenua erorile de prelucrare robotizate cauzate de erorile parametrilor cinematici, rigiditatea scăzută, frecare, jocuri, lățimea de bandă limitată și factorii de mediu. Au fost prezentate soluții inteligente, cum ar fi metode de calibrare cinematică, metodologii de compensare prin complianță a erorilor și sisteme de măsurare externe.

Principalele direcții de cercetare pentru creșterea rigidității robotului sunt reprezentate de proiectarea componentelor robotului și de optimizarea parametrilor de control. Au fost propuse diverse metode pentru a îmbunătăți rigiditatea robotului, cum ar fi compensarea online, offline și hibridă a complianței. Metodele offline necesită cunoașterea rigidității robotului și implică ajustarea traiectoriei dorite pe baza devierii estimate a sculei. Metodele online utilizează măsurători efectuate în timpul procesului robotului, cum ar fi senzorii de forță/cuplu, pentru a compensa în timp real eroarea de prelucrare. Vibrațiile cauzate de forțele de proces în timpul frezării pot duce la deviații semnificative ale traiectoriei și la instabilitate în cazul prelucrării robotizate. Erorile de producție ale roboților pot fi corectate prin calibrare, dar efectele de derivă, cum ar fi uzura și schimbările de temperatură, trebuie compensate în permanență. În literatură au fost prezentate, de asemenea, abordări pentru compensarea abaterilor legate de temperatură.

#### 4.5. Scule cu sisteme de complianță

În aplicațiile industriale, erorile piesei de prelucrat sunt compensate în limitele toleranței admise, în principal datorită apariției sculelor compliante care compensează neregularitățile suprafeței, menținând în același timp o forță specifică. Complianța reprezintă capacitatea unei

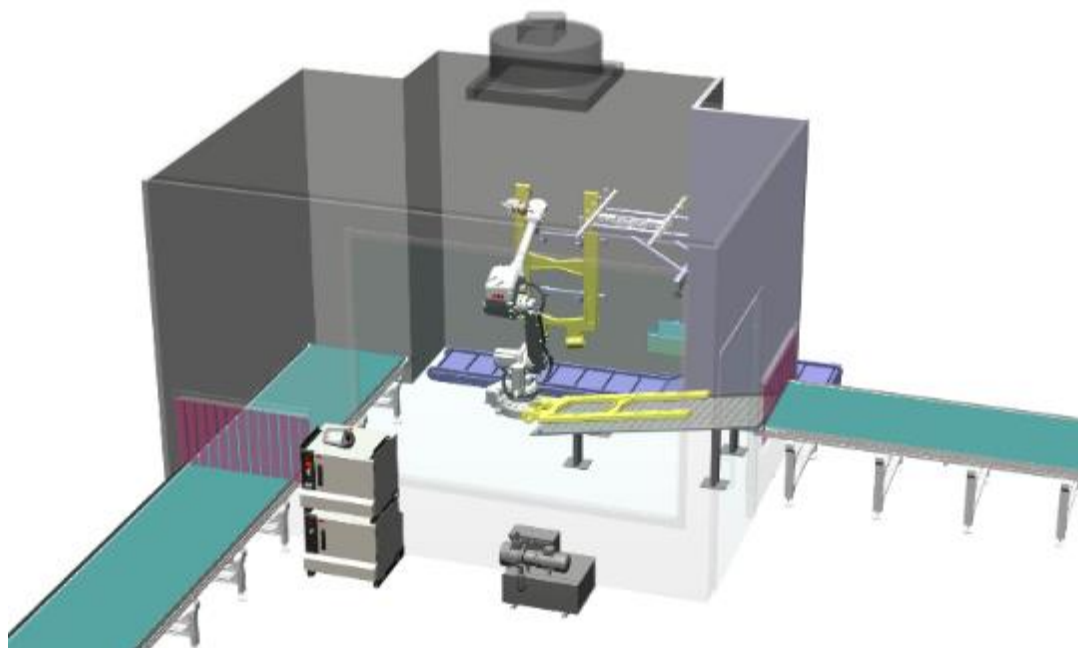
scule de a menține contactul și forța de tăiere cu piesa de prelucrat și poate fi obținută cu ajutorul diferitelor dispozitive active și pasive de control al forței. Sistemele pasive sunt mai puțin costisitoare, ideale pentru debavurarea cu forță brută și în cazul în care rezultatul este definit doar de o suprafață fără bavuri cu toleranțe reduse, în timp ce sistemele active sunt cele mai potrivite pentru aplicații care au cerințe foarte exigente privind suprafața, în cazul în care costurile pot fi justificate. Sistemele compliante pasive asigură o deviere controlată pentru a gestiona forțele de tăiere, pentru a preveni ciobiturile severe și deteriorarea pieselor. Aceste sisteme se prezintă sub diferite forme, cum ar fi cele liniare, radiale, rotaționale sau o combinație de complianță radială și liniară. Conformitatea radială este o tehnică în care este permisă mișcarea unei scule pe o rază de 360 de grade în jurul unei poziții centrale, menținând în același timp o forță de contact constantă. Această tehnică este potrivită pentru îndepărtarea liniilor de separare și a bavurilor de pe piesele turnate.

## **Secțiunea 2. Simulare offline și verificare**

### 4.6. Elaborarea modelului DT

Componentele celulei robotice au fost proiectate cu instrumente CAD moderne în scopul asigurării eficienței și fiabilității. Modelul virtual reproduce procesul de fabricație privind designul, detecția coliziunilor, detecția defectelor, testarea, planificarea, optimizarea și monitorizarea. Pentru elaborarea modelului DT (Fig. 4.2), ABB RobotStudio a pus la dispoziție instrumentele necesare pentru:

- Virtualizarea celulei robotizate
- Generarea traiectoriilor robotului fără coliziuni
- Programarea robotului prin intermediul tehnicilor OLP luând în considerare datele semnalelor din celulă și modelele virtuale ale componentelor fizice.



**Fig. 4.2. Modelul DT al aplicației de debavurare robotizată**

#### 4.7. Controlerul virtual și programarea robotului.

Controlerul virtual poate fi descris ca fiind un software care emulează controlerul real al robotului pentru a permite ca același software care controlează roboții să ruleze pe un PC în scopuri de programare, simulare și analiză offline. Crearea programului robotului a constat în definirea punctelor din traiectoriile robotului care pot fi atinse, a mișcărilor fără coliziuni și a vitezelor adecvate. Au fost specificate sisteme de coordonate pentru punctele de centru (TCP) ale flanșei robotului, flanșei master a sistemului de cuplare-decuplare automată QC-41, sculei de debavurare și efectorului vacuumatic. Au fost definite procese folosind semnale I/O ca mijloace de comunicare între controler și dispozitivele externe. După validarea tuturor mișcărilor, programul robotului a fost încărcat în controlerul virtual. Traiectoriile și rutinele de mișcare ale robotului sunt reprezentate în Fig. 4.3.

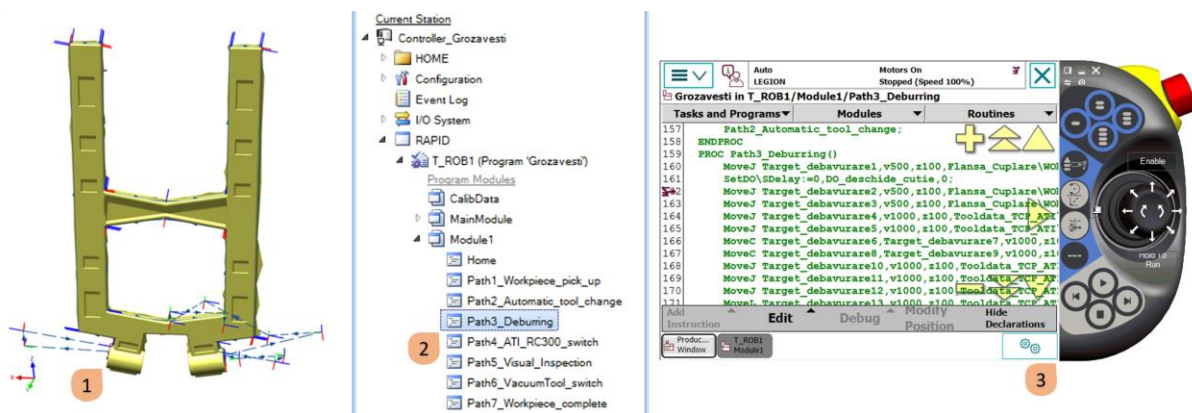


Fig. 4.3. Traiectoriile sculei de debavurare (1), secvența de operațiuni (2) și instrucțiunile robotului afișate pe consola de operare a robotului (3).

Programarea pe bază de semnale ale senzorilor asigură fiabilitatea întregului sistem și integritatea comunicării dintre robot și sistem. Dispunerea senzorilor celulei de lucru a fost adaptată atât la controlerul virtual, cât și la platforma web, asigurând sincronizarea datelor senzorilor.

#### 4.8. Programarea offline a celulei de fabricație robotizate

Fig. 4.4 prezintă structura celulei robotizate de debavurare, precum și configurația senzorilor. Elaborarea modelului DT reprezintă contribuția originală la acest studiu de caz, care a presupus crearea modelului digital al celulei robotizate, programarea robotului offline, virtualizarea datelor senzorilor celulei de lucru, simularea offline și analiza procesului de fabricație.

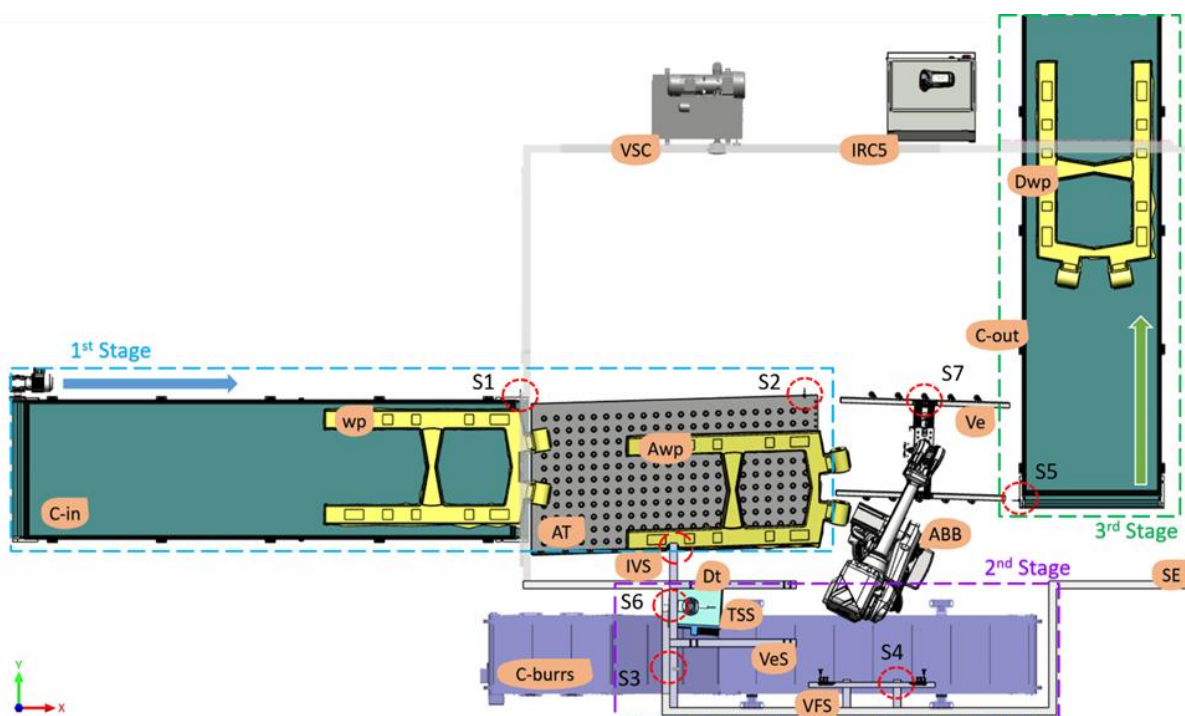


Fig. 4.4. Structura celulei de debavurare robotizată și amplasarea senzorilor.

### Secțiunea 3. Calcularea traiectoriilor cu ajutorul tehnicilor de procesare a imaginilor

#### 4.9. Aspecte generale

Sistemele de calcul a traiectoriilor roboților au fost dezvoltate pentru a crește eficiența și viteza de programare a roboților. Aceste sisteme au ca scop optimizarea planificării traiectoriei prin reducerea timpului de procesare și armonizarea traiectoriilor. Cu toate acestea, majoritatea metodelor de optimizare trebuie să găsească un compromis între viteză și calitate. Cercetătorii au propus diverse tehnici de debavurare robotizată, inclusiv tehnici iterative pentru detectarea abaterilor de formă și adaptarea proceselor de debavurare, sisteme robotizate asistate vizual pentru finisarea pieselor sudate și utilizarea Învățării Automate și a Cloud Computing-ului pentru a îmbunătăți operațiile de debavurare în industria de fabricare a aeronavelor. Majoritatea studiilor privind traiectoriile roboților generate de procesarea imaginilor nu iau în considerare utilizarea sculelor cu complianță radială și acționare pasivă sau debavurarea pieselor de prelucrat de mari dimensiuni cu bavuri neregulate. Au fost propuse metode precedente de debavurare care utilizează sisteme video, dar în prezent nu există soluții pentru generarea traiectoriei robotului exclusiv în regiuni izolate variabil (Stan et al., 2022).

#### 4.10. Metoda propusă pentru calcularea traiectoriilor de debavurare

Strategia propusă folosește procesarea imaginilor pentru a identifica și elimina bavurile parțial îndepărtate prin mai multe iterații, în funcție de înălțimea bavurii și de raza frezei. Din cauza complianței radiale a sculei, pot rămâne bavuri reziduale după debavurare. Având în vedere dimensiunea mare a piesei de prelucrat, este mai eficient să se re-debavureze doar defectele rămase, decât să se re-parcurgă întregul contur al piesei de prelucrat.

Sistemul de viziune folosit în procedura de inspecție vizuală este o cameră VGA de mare viteză, poziționată în flanșa principală a sistemului ATC, cu o dimensiune compactă care o face potrivită pentru montarea în spații înguste. Modelul camerei este Cognex 8400 (cu software integrat pentru procesarea imaginilor), cu o rezoluție de 640x480, o rată maximă de achiziție de 217 cadre pe secundă, comunicare Gigabit Ethernet și alimentare Ethernet. Camera a fost selectată pentru capacitățile sale software, care includ instrumente de înaltă performanță pentru localizarea obiectelor, detectarea și inspecția marginilor, măsurarea pieselor, compararea modelelor și alte tehnici specifice pentru procesarea imaginilor.



**Fig. 4.5. Echipamentele folosite pentru sistemul de viziune: PC-ul pe care rulează ABB RobotStudio (1), controlerul robotului (2), camera Cognex 8400 (3), sistemul ATC (4).**

#### 4.11. Algoritmul implementat pentru debavurarea robotizată a bavurilor parțial îndepărtate

A fost elaborată o metodă pentru a calcula traiectoriile necesare pentru îndepărtarea bavurilor remanente identificate prin inspecție vizuală, numai în zonele în care acestea există. Această abordare asigură că se folosește doar timpul necesar pentru îndepărtarea bavurilor, fără a fi necesară repetarea întregului proces de debavurare. Metoda utilizează instrumentele disponibile în RobotStudio pentru a găsi zonele care trebuie prelucrate suplimentar, pentru a calcula numărul de iterații a traiectoriilor și pentru a stabili rutinele adecvate pentru apropierea și retragerea robotului.

#### 4.12. Consumul de energie al robotului

Reducerea Consumului de Energie (CE) al roboților este importantă pentru creșterea productivității. Activitățile de cercetare se concentrează pe soluții hardware, cum ar fi componente mai ușoare și dispozitive de stocare a energiei, precum și pe soluții software pentru calcularea traiectoriilor și programarea mișcărilor. CE este afectat de parametrii operaționali și este constrâns de arhitectura celulei de lucru, de nevoile de productivitate și de condițiile de mediu în timpul fazei de optimizare. După cum este ilustrat în Fig. 4.6, a fost studiată o înregistrare a CE totale și a puterii totale absorbite pentru un singur ciclu de lucru pentru o piesă în care bavurile au fost eliminate în mod eficient în procesul de debavurare (1), precum și pentru o piesă în care a fost necesar un proces suplimentar de debavurare pentru a elimina bavurile reziduale (2). Fig. 4.6 (2) prezintă energia înregistrată în timpul unui ciclu de lucru al unei piese pentru care inspecția vizuală a robotului a detectat o singură regiune în care bavurile

au fost numai parțial îndepărtate și pentru care algoritmul propus a conceput un al doilea proces de debavurare numai pentru zona indicată.

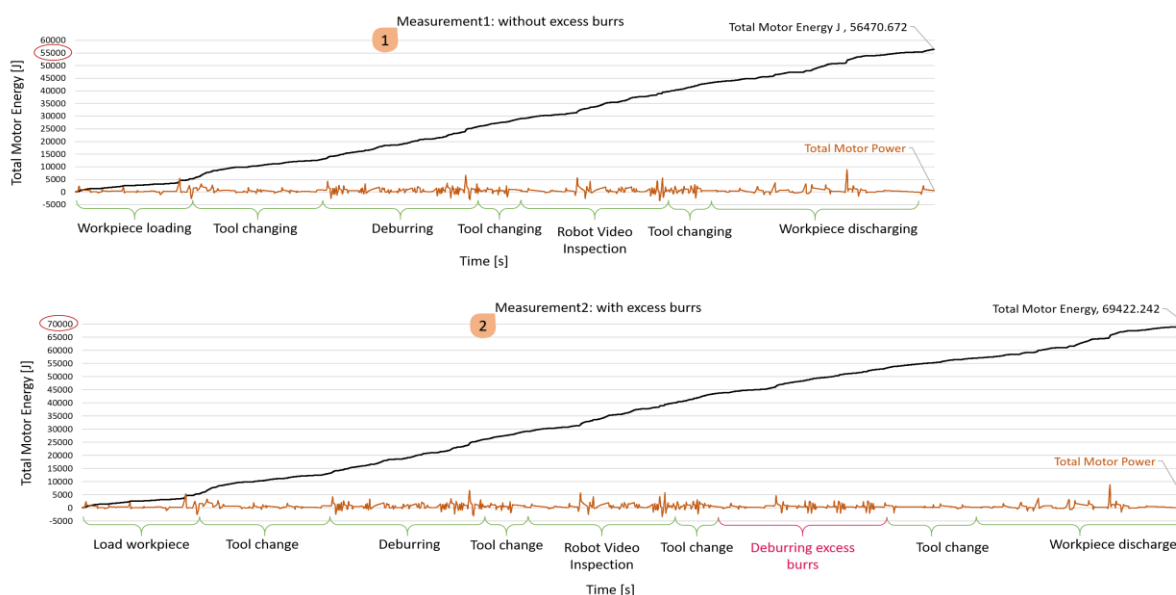


Fig. 4.6. Energia totală (negru) și puterea totală (portocaliu) a robotului în timpul unui ciclu de lucru de debavurare fără bavuri remanente (1) și cu bavuri remanente (2).

Se presupune că bavurile care nu sunt îndepărtate complet în timpul primei proceduri de debavurare sunt mai groase, forțând scula cu complianță radială să devieze, iar îndepărtarea lor în mod corespunzător ar necesita numeroase iterații. În studiul de caz, traiectoriile suplimentare de prelucrare au fost calculate pe baza razei sculei, ceea ce a dus automat la o rutină de debavurare mai lungă.

## Secțiunea 4. Platforma web pentru monitorizare

### 4.13. Aspecte generale

Operarea eficientă a roboților la distanță într-un cadru descentralizat necesită capacități de monitorizare în timp real și de control de la distanță care să fie receptivă și adaptabilă la evenimente imprevizibile. SOA, care utilizează servicii web, permite comunicarea de la mașină la mașină prin intermediul unei rețele folosind HTTP și asigură interoperabilitatea. O soluție web pentru un sistem de monitorizare a producției facilitează utilizarea unei mari varietăți de dispozitive cu suport de interfață grafică (Stan et al., 2017). În literatura de specialitate au fost prezentate diverse sisteme de monitorizare și control de la distanță a roboților bazate pe dispozitive Android/IOS și pe comunicare Wi-Fi (Coman et al., 2019).

### 4.14. Proiectarea platformei web

Fig. 4.7 prezintă elementele cheie ale platformei web realizate în cadrul aplicației de debavurare robotizată. Un sistem inteligent de mesagerie (Telegram bot) va genera notificări bazate pe condiții. Toți senzorii prezenți în celula de lucru au un corespondent digital în controlerul virtual.

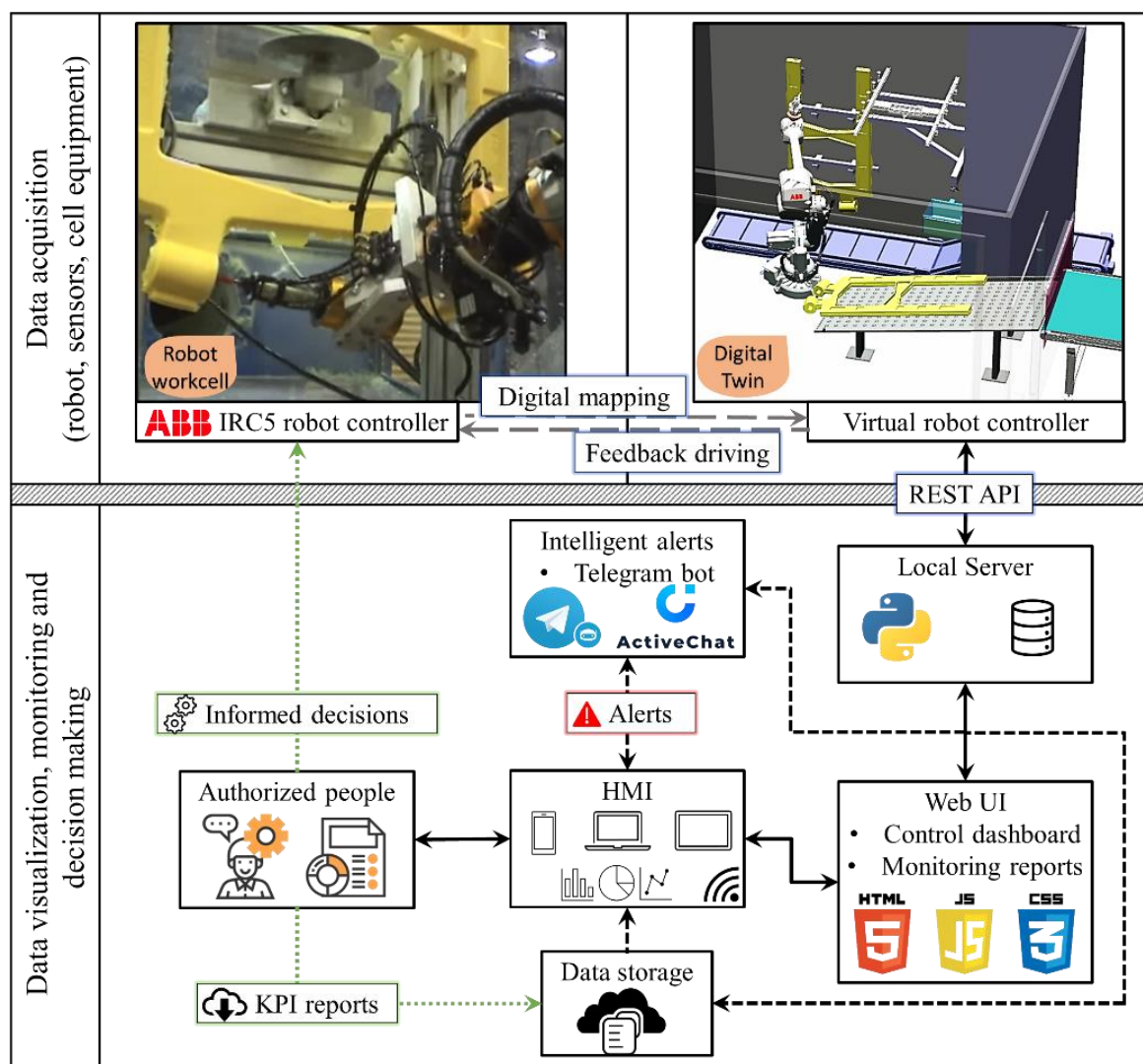


Fig. 4.7. Platformă de monitorizare și control bazată pe tehnologii web pentru producția robotizată.

## Secțiunea 5. Concluzii

Acest studiu de caz descrie elaborarea unei aplicații de debavurare robotizată și a modelului DT, împreună cu programarea robotului offline și pe bază de senzori. În continuare, platforma web propusă este utilizată pentru a monitoriza procesul de producție. Studiul prezintă, de asemenea, o nouă soluție de debavurare pe baza unui algoritm care calculează traiectoriile sculei de prelucrare a bavurilor care au fost îndepărtate parțial și identificate după inspecția video. În plus, este realizată o scurtă prezentare generală a consumului de energie al robotului, și menționate beneficiile aplicării soluției de debavurare propuse și capacitățile de monitorizare ale platformei web aplicate sistemului de fabricație robotizat. Obiectivul principal al proiectului este de a utiliza platforma web propusă pentru a monitoriza aplicația de debavurare și de a furniza date sigure pentru generarea rapoartelor de performanță.



În acest capitol, a fost realizată o prezentare succintă a prelucrării robotizate, cu accent pe progresele recente care vizează îmbunătățirea rigidității robotului și a parametrilor de control prin metode de compensare a complianței. Metodele examinate includ calibrarea cinematică, sistemele de urmărire cu laser, sistemele de măsurare externă, sistemele de compensare a complianței online și diverse metode de corectare a abaterilor cauzate de temperatură. De asemenea, a fost oferită o introducere în utilizarea sistemelor de complianță a sculelor, care sunt utilizate pentru a compensa neregularitățile suprafeței, păstrând în același timp o forță de tăiere dorită. Totodată, a fost prezentată o analiză succintă a strategiilor actuale de reducere a consumului de energie în cazul roboților. Accentul a fost pus pe abordările bazate pe hardware, pe soluțiile bazate pe software și pe algoritmi concepuți pentru a minimiza consumul de energie prin ajustarea vitezei robotului.

Acest studiu de caz demonstrează eficacitatea sistemului propus, bazat pe servicii web, prin îndeplinirea mai multor cerințe cheie pentru o implementare corectă. Aceste cerințe includ colectarea și vizualizarea datelor, interoperabilitatea realizată prin aderarea la modelul de arhitectură orientată pe servicii și la colecția sa de standarde deschise de comunicare între mașini, precum și monitorizarea în timp real prin furnizarea de actualizări continue de la senzorii și roboții implicați. Capacitatea de monitorizare în timp real permite decizii prompte și un răspuns rapid în cazul unor defecțiuni, îmbunătățind astfel eficiența generală a sistemului.

Studiile viitoare pot pune accentul pe încorporarea altor tehnologii asociate cu Industria 4.0, cum ar fi securitatea cibernetică și tehnologii de Învățare Automate. Platforma web este concepută pentru a oferi capacități de control și monitorizare de la distanță pentru celule de fabricație flexibile. Nevoia de control de la distanță în producția robotică a devenit mai importantă în contextul pandemiei recente și este acum un subiect de cercetare practic. Platforma web are potențial de extindere pentru a cuprinde monitorizarea proceselor la nivelul întregii fabrici, colectarea de date, analiza și furnizarea de statistici de producție în timp real și pentru a servi drept nucleu operațional pentru a îmbunătăți performanța operațională și rentabilitatea.

Contribuțiile originale ale lucrării pot fi grupate în următoarele categorii:

#### **Contribuții practice aplicabile în domeniul ingineriei industriale:**

- Aplicarea unei soluții rentabile de debavurare bazate pe un efector de debavurare cu control pasiv și complianță radială.
- Dezvoltarea unei metode de debavurare pe baza tehnologiilor de inspecție video pentru a crește eficiența procesului de fabricație.

#### **Contribuții metodologice originale:**

- Dezvoltarea unui DT pentru o aplicație robotică de debavurare în ABB RobotStudio.
- Integrarea platformei web pentru monitorizarea celulei robotizate de debavurare în vederea afișării consumului de energie al robotului și a datelor de producție.
- Folosirea unui bot Telegram cu un set de reguli specifice pentru declanșarea alertelor.

**Contribuții în domeniul programării roboților:**

- Programarea robotului prin tehnici de OLP pentru a debavura piesa, împreună cu:
  - analiza consumului de energie a acestuia.
  - simularea offline pe bază de semnale a celulei robotice.

Rezultatele cercetării și metoda elaborată au fost publicate în:



**Stan, L., Nicolescu, A.F., Pupăză, C. et al. (2022). *Digital Twin and web services for robotic deburring in intelligent manufacturing*. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-17, Impact factor: **7.136** (2021) Q1, WOS: 000805461000002,**

<https://doi.org/10.1007/s10845-022-01928-x>

## Capitolul V. Platforma web pentru introducerea unor tehnologii avansate de formare în robotică

### 5.1. Obiective și sinopsisul contribuțiilor originale

Chiar dacă roboții ocupă un loc proeminent în literatura de specialitate privind conceptele Industriei 4.0, există insuficiente studii privind metodele de formare pentru operarea roboților industriali utilizați în producția modernă.

**Obiectivul** acestui studiu de caz este de a oferi cursanților o experiență practică și posibilitatea de a dobândi competențele necesare pentru gestionarea eficientă a sistemelor de producție robotizate actuale. Disponibilitatea echipamentelor de laborator permite aprofundarea cunoștințelor privind roboții utilizați în aplicațiile moderne de fabricație.

Acest lucru duce la o îmbunătățire a cunoștințelor cu privire la:

- Roboții industriali și modul în care funcționează celulele robotizate, principiile de proiectare și control ale acestora.
- Software-ul utilizat într-un domeniu de producție pentru achiziția de date din diferite surse (cum ar fi senzori), controlul continuu, date operaționale și ale mașinilor, date de proces, sau utilizat în robotica asistată de viziune, cum ar fi achiziția de date video.
- Gestionarea ciclului de viață al produsului (PLM) prin utilizarea datelor obținute din sistemul de fabricație pentru a planifica resursele necesare și a analiza productivitatea (pe baza indicatorilor de performanță (KPI)) a proceselor de fabricație.

Studiul de caz prezintă o aplicație a roboților industriali pentru formarea în domeniul fabricației industriale, oferind cursanților o experiență de învățare interdisciplinară prin abordări bazate pe probleme și proiecte, cu accent pe procesul de învățare și un rol de instrument suport pentru profesor.

#### Contribuție teoretică originală:

- A fost prezentată o vedere de ansamblu a conceptelor didactice avansate specifice învățământului tehnic în relație cu robotica modernă.

#### Contribuție metodologică originală:

- Elaborarea unui sistem de formare conceput pentru a sprijini paradigma Educație 4.0, care constă în:
  - O platformă web pentru aplicații robotice având capacitatea de a integra alte tehnologii Industry 4.0 pentru diferite strategii de instruire, cum ar fi securitatea cibernetică, inteligența artificială și realitatea augmentată.
  - Un sistem de mesagerie pentru a automatiza alertele și rapoartele.
  - Un model DT al unei celule robotizate care folosește un robot de tip braț articulat în operații de asamblare.

## **Secțiunea 1. Introducere în Educație 4.0**

### 5.2. Aspecte generale

Dezvoltarea profesională continuă este unul dintre domeniile importante în care este necesar să se acționeze pentru a implementa în mod corespunzător obiectivele Industrie 4.0; în acest sens, educația și formarea trebuie să țină pasul cu progresele tehnologice. În prezent, universitățile au sarcina de a-și asuma o poziție de lider în stabilirea unor conexiuni eficiente între cercetare, educație și inovare (Nicolescu et al., 2019).

Educația 4.0 combină tehnologia, metodele noi de instruire și cele mai bune practici. Departamentele educaționale, institutele de cercetare și universitățile sprijină educatorii și cercetătorii să conducă proiecte de inovare educațională prin crearea și dezvoltarea de noi practici, metode și tehnologii aplicate care se potrivesc cu obiectivele instituțiilor și răspund la contextele sociale actuale. Programele de învățare la distanță utilizează conectivitatea, digitalizarea și virtualizarea, dar se constată o lipsă de cunoștințe, abordări de proiectare și mecanisme de evaluare pentru valorificarea tehnologiilor emergente și a pedagogiei pentru a oferi soluții inovatoare pentru programele ingineresti.

Sistemele mecanizate cu abur, producția de masă și automatizarea au caracterizat primele trei revoluții industriale, în timp ce conectivitatea, digitalizarea și virtualizarea sunt tehnologii industriale proeminente din prezent. Educația 4.0 este caracterizată de filosofii heutagogice și cibergogice care se concentrează pe promovarea autonomiei, capacității și aptitudinilor pentru învățarea pe tot parcursul vieții și pe crearea unei învățări angajate într-un mediu virtual. Strategia de învățare este predominant centrată pe cursant, iar obiectivul vizat este dobândirea de abilități atât tehnice cât și interpersonale.

## **Secțiunea 2. Concepte de formare emergente**

### 5.3. Cerințele de formare și calificare pentru Industria 4.0

Adaptarea educației în domeniul ingineriei la Industria 4.0 este crucială pentru succes. Programele educaționale europene au depus eforturi pentru a găsi și a testa metode și tehnologii de predare inovatoare pentru a ajuta studenții să învețe despre rolul lor în Industria 4.0 și pentru a alinia educația la cerințele industriei. Au fost publicate studii privind educația în domeniul ingineriei în contextul Industriei 4.0, care se concentrează pe noile competențe și calificări cerute absolvenților și lucrătorilor și care oferă planuri de parcurs pentru adaptarea educației la nevoile Industriei 4.0 prin modificarea programelor de studii sau prin noi structuri și metode de învățare.

Cele trei modalități de formare profesională utilizate în mod obișnuit în cadrul educației 4.0 sunt învățarea față în față, învățarea la distanță și învățarea hibridă. Învățarea hibridă maximizează procesele și resursele de învățare prin utilizarea modelelor moderne axate pe cursant, a progreselor tehnologice actuale și viitoare, precum și a noilor abordări de învățare, cum ar fi învățarea mixtă, clasele inversate, învățarea bazată pe probleme, bazată pe provocări, bazată pe jocuri și învățarea prin acțiune. Abordările bazate pe IoT, cum ar fi AI și ML, Data

Analytics și procesarea virtuală a imaginii sunt, de asemenea, utilizate pentru a îmbunătăți procesele de predare-învățare. Sistemele de învățare pentru săli de clasă virtuale și platformele de colaborare sunt în curs de apariție, fie ca supliment, fie ca alternativă la modurile de învățământ convenționale și oferă sesiuni online sincrone pentru a ajuta studenții să învețe, utilizând tehnologii de conferințe web care includ voce, text, imagini și video, permițând studenților să se implice activ în sesiuni.

#### 5.4. Strategii de formare în contextul educației 4.0 raportate la roboții industriali moderni

În ultimele trei decenii au apărut noi concepte de formare și mai multe studii au identificat caracteristici și abordări educaționale esențiale pentru a răspunde cerințelor industriei 4.0. Unul dintre conceptele de predare emergente este abordarea de tip The Teaching Factory, care integrează viitorii ingineri în mediul de producție în strânsă cooperare cu specialiștii din domeniu pentru a-i familiariza cu cerințele acestuia și pentru a spori colaborarea între părțile cu expertiză și medii diferite. Un alt concept este abordarea de tip The Project-Based Learning (PjBL), care promovează autonomia și creativitatea studenților. Hassaan et al. (Hassan et al., 2015) au implementat o metodă axată pe probleme pentru a instrui controlul brațului robotului în contextul unui proiect și al unei competiții multidisciplinare. Tosello et al. (Tosello et al., 2019) au prezentat o abordare bazată pe proiecte pentru a instrui studenții în domeniul roboticii autonome și industriale pentru Industria 4.0, folosind un robot articulată, un robot mobil și un sistem de viziune 3D pentru a finaliza o sarcină de colectare și transport. Un laborator axat pe predare care utilizează un robot colaborativ a fost prezentat de Poor et al. (Poor et al., 2019) pentru ca studenții să pregătească aplicații robotice pentru industrie.

Deși roboții sunt proeminenți în literatura de specialitate referitoare la paradigmele din Industria 4.0, s-a constatat o lipsă de studii privind metodologiile de instruire axate pe roboți industriali. Acest lucru evidențiază importanța continuării cercetărilor în acest domeniu, deoarece ar putea duce la metode mai eficiente de predare a studenților cu privire la integrarea roboților în industrie și de pregătire a acestora pentru viitorul muncii în era Industriei 4.0.

### Secțiunea 3. Aplicație de asamblare robotizată

#### 5.5. Metoda propusă

Această secțiune prezintă un model de învățare bazat pe proiecte care utilizează ABB RobotStudio pentru programarea offline a robotului și achiziția de date prin intermediul serviciilor web ale robotului (Fig. 5.1).

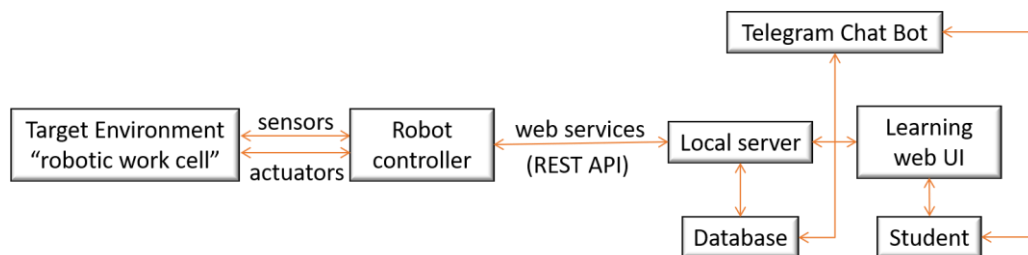


Fig. 5.1. Metoda propusă pentru o aplicație web educațională în domeniul roboților industriali.

## 5.6. Studiu de caz

Studiul de caz examinează procesul de asamblare robotizată în producție, în care roboți cu efectori specializați asamblează piese interschimbabile într-un produs funcțional. Acest proces necesită un nivel ridicat de repetabilitate, fiabilitate, adaptabilitate și secvențiere. Celula de lucru (6) închisă în laboratorul de robotică este echipată cu un braț articulat ABB IRB 140 6-DOF (1) cu o capacitate de manipulare de 6 kg, o rază de acțiune de 0,8 m și o repetabilitate a poziției de 0,03 mm, un controler IRC5 (5), un conveyer (4), senzori, actuatori, un compresor de vid, o cameră Cognex, un sistem de depozitare a sculelor (2), efectori și un schimbător automat de efectori. Fig. 5.3 ilustrează reprezentarea digitală și sistemele fizice ale laboratorului. Componentele digitale au fost proiectate cu ajutorul CATIA V5, în timp ce ABB RobotStudio a fost utilizat pentru programarea și simularea offline a robotului (Nicolescu et al., 2019).

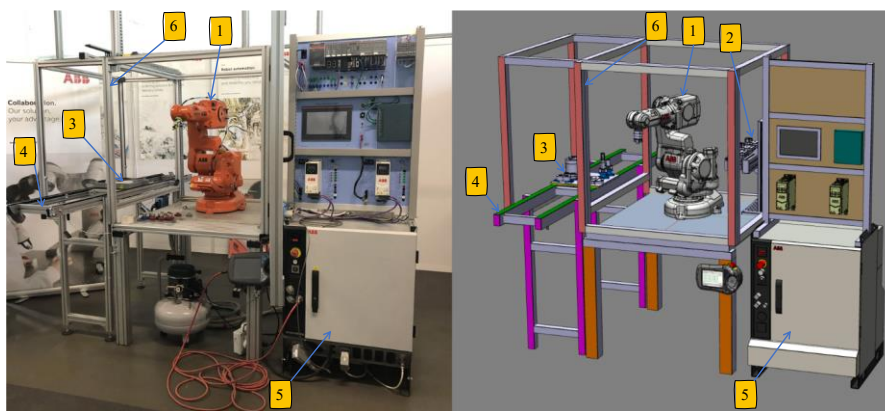


Fig. 5.2. Celula robotică fizică și modelul DT dezvoltat în ABB RobotStudio.

Obiectivele propuse:

- În acest model educațional, **cursanții pot proiecta, programa și îmbunătăți propriul proces virtual de fabricație a ansamblului robotizat**, facilitând procesul de învățare și permițând punerea în aplicare a ideilor personale.
- Monitorizarea performanțelor și a stării echipamentelor este un aspect crucial al sistemelor de producție pentru a spori eficiența și a preveni întreruperile neplanificate. În acest context, **cursanții pot evalua datele controlerului robotului, cum ar fi consumul de energie în timp real**. Controlerul robotului suportă, de asemenea, rețele industriale moderne de I/O, **permițându-le studenților să experimenteze monitorizarea datelor senzorilor și funcționalitățile determinate de KPI**. Datele colectate pot fi analizate și vizualizate pe platforma web
- O celulă de robot convențională este definită prin integrarea modulelor de servicii cu componentele fizice, împreună cu sistemul de control. În schimb, cadrul propus are ca scop operarea de la distanță a echipamentelor fizice prin intermediul unei rețele. **Folosind servicii web, cursanții pot învăța cum să opereze dispozitivele conectate la controlerul robotului, inclusiv actuatorii, senzorii și tehnici bazate pe viziune**.
- În cadrul metodei propuse, **cursanții pot experimenta cu un sistem de mesagerie care permite declanșarea automată și livrarea de notificări, rapoarte și alerte particularizate**.

## Secțiunea 4. Concluzii

Sistemul de învățare propus se bazează pe principiile heutagogiei și cibergogiei, cu scopul de a promova înțelegerea proceselor de fabricație robotizată, de a încuraja educația continuă și de a promova o mentalitate de dezvoltare continuă. Acesta va permite învățarea colaborativă într-un cadru virtual și presupune următoarele domenii de dezvoltare:

- Competențe CAD - Cursanții își vor crea propriile soluții pentru diverse celule robotizate de fabricație, utilizând instrumente CAD și baze de date CAD adecvate.
- Competențe OLP - Cursanții vor utiliza ABB RobotStudio pentru a programa roboții și vor efectua simulări pentru a optimiza ciclul de lucru pe baza consumului de energie, a duratei programului, a evitării coliziunilor și a configurațiilor axelor robotului.
- Servicii web pentru competențe în Industria 4.0 - Cursanții își pot adapta proiectul celulei robotizate la Industria 4.0 prin valorificarea serviciilor web și a datelor senzorilor pentru a declanșa acțiuni sau pentru a prezenta consumul de energie și productivitatea celulei robotizate pe baza rapoartelor de producție pe loturi.

În ceea ce privește Educația 4.0, abordarea de instruire propusă este axată pe student și facilitează utilizarea tehnologiilor actuale într-un cadru academic. Abordarea le oferă studenților posibilitatea de a dezvolta soluții inovatoare la provocările moderne de producție. Studiile viitoare privind această metodă educațională pot pune accentul pe încorporarea altor tehnologii asociate cu Industria 4.0 în strategia de instruire propusă, cum ar fi securitatea cibernetică, inteligența artificială și realitatea augmentată.

Contribuțiile originale ale lucrării pot fi grupate în următoarele categorii:

### Contribuție teoretică originală:

- A fost prezentată o vedere de ansamblu a conceptelor didactice avansate specifice învățământului tehnic industrial în relație cu robotica modernă.

### Contribuție metodologică originală:

- Elaborarea unui sistem de formare conceput pentru a sprijini paradigma Educație 4.0, care constă în:
  - O platformă web pentru aplicații robotice având capacitatea de a integra alte tehnologii Industry 4.0 pentru diferite strategii de instruire, cum ar fi securitatea cibernetică, inteligența artificială și realitatea augmentată.
  - Un sistem de mesagerie pentru a automatiza alertele și rapoartele.
  - Un model DT al unei celule robotizate care folosește un robot de tip braț articulat în operații de asamblare.

Rezultatele cercetării și metoda propusă au fost publicate în:



Nicolescu, A.F., Stan, L., & Pupăză, C. (2019) *E-Learning Platform for Robotic Applications*, 12th annual International Conference of Education, Research and Innovation, ICERI2019 Proceedings, pp. 7384-7391, [WOS: 000530212403050](https://www.wos.org/wos/000530212403050), [doi: 10.21125/iceri.2019.1760](https://doi.org/10.21125/iceri.2019.1760).

## Capitolul VI. Concluzii finale

### 6.1. Sinteza principalelor realizări

În domeniul ingineriei industriale și al automatizării, aplicații precum monitorizarea la distanță și vizualizarea datelor permit operarea de la distanță, planificarea întreținerii, investigarea incidentelor și optimizarea. Gestionarea și monitorizarea de la distanță a dispozitivelor cu ajutorul IoT sunt importante atunci când mașinile sau echipamentele sunt inaccesibile sau prezintă un risc pentru siguranța umană. Combinarea IT și OT are un impact revoluționar asupra producției moderne. Cu toate acestea, apar provocări în reducerea discrepanțelor dintre IT și OT, în special în ceea ce privește transmiterea, stocarea și analiza datelor, din cauza echipamentelor vechi, a lipsei de putere de calcul și a lipsei de interfețe și protocoale standard între mașini. **Capitolul II a prezentat stadiul actual al tehnologiei în ceea ce privește mai mulți facilitatori-cheie ai Industriei 4.0: CPS și DT, Edge, Fog și Cloud Computing, sisteme robotice avansate și tehnici de învățare de tip RL pentru aplicații robotizate de asamblare (Stan et al., 2020).**

Sustenabilitatea, ca transformarea digitală, este un progres al Industriei 4.0 care are un impact major asupra proceselor moderne de producție. Consumul de energie al mașinilor și al roboților are atât o semnificație pentru mediu, cât și una economică în producție. Prin urmare, studiile continuă să se concentreze asupra analizei, monitorizării și reducerii consumului de energie.

Platforma web (Stan et al., 2023) a fost dezvoltată cu următoarele obiective: utilizarea de standarde deschise pentru interoperabilitate, scalabilitate și colaborare; furnizarea unei interfețe ușor de utilizat; posibilitatea monitorizării și controlului de la distanță în timp aproape real; și aderarea la o metodologie DevOps pentru o îmbunătățire continuă.

Observații importante:

- Edge computing aduce achiziția de date mai aproape de sursă, reducând latența și crescând fiabilitatea colectării datelor în timp real. Prin urmare, noile sisteme IIoT trec de la cloud computing centralizat, care este potrivit pentru aplicații în timp nedefinit cu nevoi mari de stocare și procesare, la edge computing distribuit, cu latență redusă, pentru servicii în timp real. **Platforma web propusă folosește strategia de edge computing prin colectarea și stocarea datelor pe un server aflat în apropierea sistemului robotic.**
- Interconectarea sistemelor de control și a sistemelor de întreprindere, cum ar fi ERP, permite o gamă largă de noi aplicații care beneficiază de integrarea verticală, de la fabrica de producție până la managementul întreprinderii. Cu toate acestea, conectarea sistemelor de control direct la rețeaua fabricii prezintă riscuri de securitate, cum ar fi infecțiile cu programe malware, refuzul de servicii și pierderile de date. Nevoia de acces și control de la distanță a proceselor critice a devenit mai importantă în perioada COVID-19, care a accelerat dezvoltarea tehnologiilor și serviciilor de securitate cibernetică pentru a proteja activele din fabrică prin intermediul Ethernet-ului industrial și al conexiunii la internet.



**Platforma web propusă încorporează funcțiile de securitate ale controlerului de robot IRC5, în special sistemul de autentificare.**

- Combinația dintre programarea offline și programarea bazată pe semnale reprezintă o abordare modernă a programării roboților industriali în producție. Programarea offline permite dezvoltarea și testarea programelor robotului într-un mediu virtual, ceea ce poate economisi timp și resurse. Programarea bazată pe semnale utilizează informațiile de la dispozitivele prezente în celula de lucru pentru a furniza robotului date în timp real. Prin urmare, platforma web trebuie să fie capabilă să comunice cu fiecare dispozitiv dintr-un sistem de producție. Acest criteriu este îndeplinit, deoarece **platforma web poate comunica cu fiecare robot, senzor și dispozitiv de acționare care este comandat de controlerul robotului.**

**După cum s-a prezentat în Capitolul III, pentru dezvoltarea platformei web, au fost create următoarele elemente:** o legătură de comunicare între controler și serverul web; o clasă de utilitate pentru a facilita comunicarea controler-server web și un program utilitar pentru colectarea și stocarea datelor; o interfață grafică web care permite monitorizarea unei selecții de semnale ale senzorilor de la celula de lucru (Tabloul de Bord); diagrame de vizualizare care permit monitorizarea productivității celulei de lucru și a consumului de energie al robotului (Graficele de Control).

Capabilitățile platformei de monitorizare web au fost demonstrate printr-o procedură de simulare, iar experimentele au fost efectuate pe un sistem robotic real pentru a valida eficiența acesteia. Studiul de caz s-a axat pe o aplicație de asamblare robotică și s-a demonstrat:

- Comunicarea bidirecțională permite sistemului de monitorizare să obțină date de la controlerul robotului și să preia controlul asupra acestuia, cum ar fi oprirea robotului în caz de urgență.
- Folosind serviciile web, sistemul implementat colectează date din oră în oră, în timp ce controlul asupra robotului este imediat.
- Procesul robotizat este în întregime automatizat, iar modelul DT include funcții de simulare robuste, cum ar fi verificarea traiectoriilor robotului împotriva coliziunilor și calcularea consumului de energie.

Studiile care abordează cercetările transdisciplinare privind sistemele robotice complexe pentru producția modernă care implică diverse aspecte, cum ar fi soluțiile de debavurare robotică rentabile sau monitorizarea consumului de energie al roboților prin intermediul serviciilor web, sunt relativ puține. Acest lucru se datorează probabil complexității și naturii interdisciplinare a acestor sisteme, precum și necesității de expertiză în mai multe domenii, cum ar fi robotica, ingineria industrială, punerea în aplicare a unor soluții rentabile pentru fabricație, consumul de energie, serviciile web și dezvoltarea web. În plus, studiile de această natură necesită adesea un număr semnificativ de resurse și colaborarea între mai multe instituții și organizații. Prin urmare, deși astfel de cercetări sunt importante pentru avansarea domeniului producției moderne, ele nu sunt la fel de frecvente ca cercetările axate pe aspecte cu caracter mai specific. Pentru a aborda această problemă, **Capitolul IV a prezentat o abordare holistică pentru o metodă de monitorizare a unei aplicații robotizate bazată pe servicii web (Stan et al., 2022) și a evidențiat:**

- Aplicarea unei soluții de debavurare rentabile bazată pe un efector de debavurare cu control pasiv și compliantă radială.
- Programarea offline a unui robot industrial pentru a debavura o piesă de prelucrat din plastic de mari dimensiuni, împreună cu simularea offline a celulei robotizate.
- Dezvoltarea unei metode de debavurare pe baza tehnologiilor de inspecție video pentru a crește eficiența procesului de fabricație.
- O scurtă prezentare generală a consumului de energie al roboților industriali, a beneficiilor aplicării soluției de debavurare propuse și a capacităților de monitorizare a platformei web pentru sistemul de fabricație robotizat.

**Cea mai mare provocare privind conceperea sistemului de monitorizare bazat pe servicii web este integrarea armonioasă a paradigmelor specifice Industriei 4.0** (de exemplu, virtualizarea, programarea roboților, achiziția și procesarea imaginilor, comunicarea în rețea), achiziția de date și evaluarea acestora în elemente interactive de interfață grafică.

Din cauza complexității în creștere a tehnologiilor inovatoare, cercetătorii și-au mutat atenția asupra educației, afirmând că instituțiile academice trebuie să ofere abordări didactice orientate spre practică în fabricile de formare pentru a permite viitorilor ingineri să înțeleagă implicațiile acestor progrese. În consecință, se conturează metode de predare a tacticilor de digitalizare în HRC și CPPS. Chiar dacă roboții ocupă un loc prominent în literatura de specialitate privind conceptele Industrie 4.0, s-a observat o lipsă a studiilor privind abordările educaționale pentru roboții industriali utilizați în producția modernă. Pentru a acoperi această lipsă, **Capitolul V s-a axat pe potențialul educațional al platformei web propuse (Nicolescu et al., 2019)** și a introdus următoarele:

- O examinare a tehnicilor avansate utilizate în Educație 4.0 pentru a promova o mentalitate pozitivă și pentru a reduce decalajul dintre educația absolvenților de inginerie și competențele necesare pe piața forței de muncă.
- O investigație a utilizării roboților industriali în producția modernă prin intermediul unui studiu de caz, utilizând platforma web propusă. În acest context, platforma web poate încorpora alte tehnologii ale industriei 4.0, cum ar fi securitatea cibernetică, învățarea automată și realitatea augmentată, pentru a dezvolta metodologii de predare suplimentare.

## 6.2. Contribuții originale

Contribuțiile originale ale tezei de doctorat pot fi clasificate după cum urmează:

### 1. Contribuții teoretice:

- Prezentarea într-o manieră originală și cuprinzătoare a stadiului actual care conturează paradigmele Cyber-Physical Systems și Digital Twin, precum și caracteristicile lor specifice și provocările actuale.
- Prezentarea tehnologiilor inovatoare în domeniul Cloud Computing și evidențierea avantajelor și vulnerabilităților acestora.
- Realizarea unei analize cuprinzătoare a soluțiilor avansate pentru colaborarea om-robot (Human-Robot Collaboration (HRC)) și prezentarea stadiului actual.

- O prezentare aprofundată a soluțiilor avansate de RL folosite în aplicațiile de asamblare robotizate
- Utilizarea unui controler robotic virtual în scopuri de testare și pentru replicarea funcționalității platformei web.
- A fost prezentată o vedere de ansamblu a conceptelor didactice avansate specifice învățământului tehnic din ingineria industrială în relație cu robotica modernă.

## 2. Contribuții metodologice:

- Dezvoltarea platformei de monitorizare web pentru sistemele robotice într-o abordare detaliată, pas cu pas, care cuprinde o descriere completă a metodologiei.
- Realizarea unei proceduri de simulare pentru a demonstra funcționalitatea platformei.
- Dezvoltarea unui DT pentru o aplicație robotică de debavurare în ABB RobotStudio.
- Integrarea platformei web pentru monitorizarea celulei robotizate de debavurare în vederea afișării consumului de energie al robotului și a datelor de producție.
- Elaborarea unui sistem de formare conceput pentru a sprijini paradigma Educație 4.0, care constă în:
  - O platformă web pentru aplicații robotice având capacitatea de a integra alte tehnologii Industry 4.0 pentru diferite strategii de instruire, cum ar fi securitatea cibernetică, inteligența artificială și realitatea augmentată.
  - Un sistem de mesagerie pentru a automatiza alertele și rapoartele.
  - Un model DT al unei celule robotizate care folosește un robot de tip braț articulată în operații de asamblare.

## 3. Contribuții în domeniul programării roboților:

- Programarea robotului prin tehnici de OLP pentru a debavura piesa, împreună cu:
  - analiza consumului de energie a acestuia.
  - simularea offline pe bază de semnale a celulei robotice.

## 4. Contribuții practice aplicabile în domeniul ingineriei industriale:

- Aplicarea unei soluții rentabile de debavurare bazate pe un efector de debavurare cu control pasiv și complianță radială.
- Dezvoltarea unei metode de debavurare pe baza tehnologiilor de inspecție video pentru a crește eficiența procesului de fabricație.
- Aplicarea metodei de Edge Computing pentru achiziția și prelucrarea datelor într-un sistem robotic.

### 6.3. Direcții de cercetare viitoare

Lucrările viitoare de cercetare pot fi orientate spre numeroase domenii importante:

- **Platforma web poate fi extinsă pentru a include mai mult de un sistem robotizat**, conferindu-i capacitatea de a monitoriza producția în fabrică a diferitelor aplicații robotizate, de a colecta și de a analiza date pentru a furniza statistici de producție în timp real. Prin utilizarea serviciilor web, platforma poate funcționa ca un nucleu de comunicare pentru numeroase sisteme robotizate, îmbunătățind astfel performanța operațională și rentabilitatea. În mod specific, controlerile roboților pot comunica între ele prin intermediul backend-ului platformei web sau cu alte dispozitive, cum ar fi camerele industriale, permițând alte abordări avansate pentru aplicațiile robotice, cum ar fi debavurarea sau asamblarea.
- **Atunci când cererea de capacitate de procesare va crește, sistemul poate fi extins la cloud computing**, care va oferi, de asemenea, capacități suplimentare de analiză, cum ar fi abordări bazate pe inteligență artificială pentru monitorizarea condițiilor.
- **În contextul educației, lucrările viitoare pot pune accentul pe încorporarea altor tehnologii asociate cu Industria 4.0**, cum ar fi securitatea cibernetică, AI și realitatea augmentată.
- **Investigarea punctelor slabe de securitate ale mașinilor conectate în rețea și ale sistemelor robotizate**, precum și dezvoltarea de metode și arhitecturi de securitate, reprezintă direcții la fel de promițătoare.
- După perioada pandemiei COVID-19, **îmbunătățirea controlului și a monitorizării de la distanță a sistemelor de producție** este un subiect de cercetare important pentru lucrările viitoare.

## Bibliografie

- ABB Robot Web Services*. (2022). <https://developercenter.robotstudio.com/api/rwsApi/>
- Aurich, J. C., Dornfeld, D., Arrazola, P. J., Franke, V., Leitz, L., & Min, S. (2009). Burrs—Analysis, control and removal. *CIRP Annals*, 58(2), 519–542.
- Bootstrap v4.6*. (2022). <https://getbootstrap.com/docs/4.6/getting-started/introduction/>
- Coman, G. C., **Stan, L.**, Ivan, A. M., Nicolescu, A. F., & Verdete, B. (2019). Programming and wireless control of a wafer manipulation SCARA robot using a mobile device. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 591(1), 012074.
- Hassan, H., Dominguez, C., Martinez, J.-M., Perles, A., Capella, J.-V., & Albaladejo, J. (2015). A Multidisciplinary PBL Robot Control Project in Automation and Electronic Engineering. *IEEE Transactions on Education*, 58(3), 167–172.
- Highcharts*. (2022). <https://www.highcharts.com/docs/index>
- Inductive Automation*. (2022). <https://inductiveautomation.com/>
- International Organisation for Standardization. (2019). *ISO - ISO/TS 15066:2016 - Robots and robotic devices — Collaborative robots*. <https://www.iso.org/standard/62996.html>
- Ivan, M. A., Nicolescu, F. A., Aram, C. G., & **Stan, L.** (2015). Robotic deburring cell virtual prototyping. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 10(4), 183–188.
- Komenda, T., Reisinger, G., & Wilfried Sihm, A. (2019). A Practical Approach of Teaching Digitalization and Safety Strategies in Cyber-Physical Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 31, 296–301.
- Koren, Y., Gu, X., & Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. In *Frontiers of Mechanical Engineering* (Vol. 13, Issue 2, pp. 121–136). Springer.
- Kraus, S., Jones, P., Kailer, N., Weinmann, A., Chaparro-Banegas, N., & Roig-Tierno, N. (2021). Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. *SAGE Open*, 11(3), 2158244021110475.
- Microsoft Azure*. (2022). <https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/industries/discrete-manufacturing/#overview>
- Nadkarni, S., & Prügl, R. (2021). Digital transformation: a review, synthesis and opportunities for future research. *Management Review Quarterly*, 71(2), 233–341.
- Nicolescu, A. F., **Stan, L.**, & Pupaza, C. (2019). E-Learning Platform for Robotic Applications. *ICERI2019 Proceedings*, 7384–7391.
- Patera, L., Garbugli, A., Bujari, A., Scotece, D., & Corradi, A. (2021). A Layered Middleware for OT/IT Convergence to Empower Industry 5.0 Applications. *Sensors*, 22(1), 190.
- Poor, P., Broum, T., & Basl, J. (2019). Role of Collaborative Robots in Industry 4.0 with Target on Education in Industrial Engineering. *2019 4th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC)*, 42–46.
- RESTful API*. (2022). <https://restfulapi.net/>
- Sievers, T. S., Schmitt, B., Rückert, P., Petersen, M., & Tracht, K. (2020). Concept of a mixed-reality learning environment for collaborative robotics. *Procedia Manufacturing*, 45, 19–24.
- Stan, L.**, Nicolescu, A. F., & Pupăză, C. (2020). Reinforcement Learning for Assembly Robots: a Review. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 15(3), 135–146.
- Stan, L.**, Nicolescu, A. F., Pupăză, C., & Jiga, G. (2022). Digital Twin and web services for robotic deburring in intelligent manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing 2022*, 1–17.
- Stan, L.**, Pupăză, C., & Nicolescu, A. F. (2016). Studiu De Fundamentare a Conceptului “Internet of Things.” *Student Scientific Session*.

- Stan, L.,** Pupăză, C., & Nicolescu, A. F. (2017). Platformă informatică pentru monitorizarea de la distanță via Internet a funcționării sistemelor de producție robotizate. *Student Scientific Session*.
- Stan, L.,** Pupăză, C., & Nicolescu, A. F. (2023). Remote Monitoring and Control via Robot Web Services. *UPB Scientific Bulletin*.
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661.
- Tosello, E., Castaman, N., & Menegatti, E. (2019). Using robotics to train students for Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 52(9), 153–158.
- Wang, L., & Wang, X. V. (2018). Condition Monitoring for Predictive Maintenance. In *Cloud-Based Cyber-Physical Systems in Manufacturing* (pp. 163–192). Springer International Publishing.
- Watanabe, K., & Inada, S. (2020). Search algorithm of the assembly sequence of products by using past learning results. *International Journal of Production Economics*, 226, 107615.