

Real-time monitoring software for CNC machine production using Digital Twin concepts

FLORINA, POP^a

^aUNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN CLUJ-NAPOCA

Facultatea de Inginerie

Specializarea: Managementul Inovării și Dezvoltării Tehnologiei

Email: florina.pop2597@gmail.com

Abstract

Through this project, I propose the development of real-time monitoring software for the parameters required for CNC machine production, as well as the information necessary for the CNC machine production process, using concepts from Digital Twin technology. The development of this software has been designed using the SQL programming language for data transmission and the .NET framework for developing the main interface of the software.

The advantages of this project are continuous data synchronization between virtual and physical systems, monitoring of key performance indicators of productivity and machine operation, and the promotion of Industry 4.0 technologies.

Keywords: *real-time monitoring, digital twin concepts.*



Introducere

În contextul industrial din ziua de azi, marcat de avansuri tehnologice rapide și cereri crescânde ale pieței, organizațiile de producție sunt supuse unei presiuni tot mai mari de a îmbunătăți productivitatea, a optimiza procesele și a menține competitivitatea. Printre gama de tehnologii emergente, integrarea mașinilor cu control numeric pe calculator (CNC) și a conceptelor de Gemen Digital au atras o atenție semnificativă, promițând beneficii transformative pentru medii de producție. Cu toate acestea, în ciuda adoptării tot în creștere a acestor tehnologii, persistă o discrepanță critică în domeniul soluțiilor de monitorizare în timp real adaptate proceselor de producție ale mașinilor CNC.

Piața globală a mașinilor CNC a cunoscut o creștere exponențială în ultimii ani, cu o rată compusă anuală de creștere (CAGR) proiectată de peste 6% în perioada de prognoză. Această creștere poate fi atribuită cererii în creștere pentru prelucrare de înaltă precizie în diferite industrii, inclusiv automotive, aerospațială, electronică și medicală. În același timp, conceptul de Gemen Digital, care implică crearea replicilor virtuale ale activelor și proceselor fizice, a câștigat teren ca mijloc de optimizare a eficienței operaționale, facilitarea întreținerii predictive și stimularea inovației.

De asemenea, piața tehnologiei Gemen Digital în industria manufacturieră a cunoscut o creștere semnificativă în ultimii ani, iar perspectivele de creștere sunt încurajatoare. Conform unui raport recent al unei firme de cercetare de piață, piața tehnologiei Gemen Digital în industria manufacturieră este proiectată să crească cu o rată anuală de aproximativ 25% în perioada următoare, alimentată de cererea pentru soluții inovatoare de monitorizare și optimizare a proceselor de producție.

În acest context, necesitatea unor soluții de monitorizare în timp real adaptate proceselor de producție ale mașinilor CNC devine din ce în ce mai pronunțată. Abordările tradiționale de monitorizare adesea nu reușesc să ofere informații în timp util cu privire la metricile critice de performanță, cum ar fi utilizarea mașinii, uzura sculelor și calitatea producției. Prin urmare, producătorii se confruntă cu provocări în identificarea ineficiențelor, reducerea timpului de nefuncționare și optimizarea alocării resurselor.

Prezentul și utilizarea actuală

Pentru a aborda aceste provocări cu care se confruntă producătorii, acest proiect propune dezvoltarea unui software de monitorizare în timp real, pentru mediile de producție ale mașinilor CNC, valorificând principiile tehnologiei Gemen Digital. Prin crearea replicilor virtuale ale mașinilor CNC și sincronizarea datelor între sistemele virtuale și fizice, software-ul își propune să reducă discrepanța dintre domeniile digital și fizic, permițând producătorilor să obțină informații cuprinzătoare despre operațiunile lor de producție.

Prin monitorizarea continuă a indicatorilor cheie de performanță (KPI-uri) și a parametrilor operaționali ai mașinilor, producătorii pot identifica în mod proactiv blocajele, pot anticipa nevoile de întreținere și pot optimiza programul de producție. În plus, prin valorificarea datelor istorice și utilizarea algoritmilor de învățare automată, software-ul facilitează analiza predictivă, permițând producătorilor să ia decizii bazate pe date și să încurajeze inițiativele de îmbunătățire continuă.

Mai mult, integrarea conceptelor de Gemen Digital în mediile de prelucrare CNC deține un potențial imens de a revoluționa peisajul de producție.

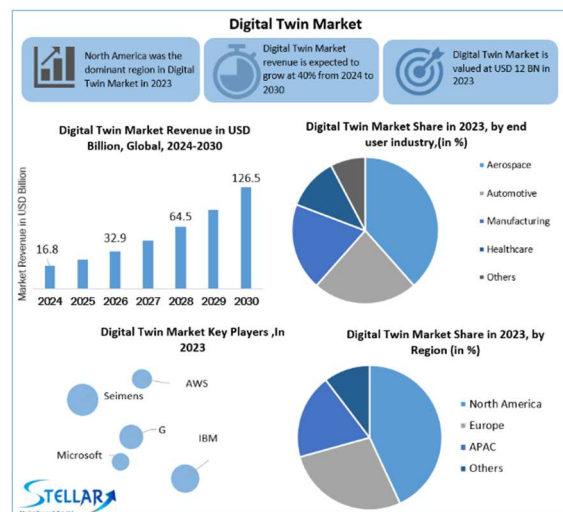


Fig. 1. Evoluția previzionată Digital Twin la nivel global (2024 - 2030). Autor: Florina Pop

Cercetarea de piață Digital Twin în ultimii 5 ani de către Stellar [1] a ajuns la concluzia că America de Nord a dominat piața globală Digital Twin cu aproximativ 36% cotă de piață și este de așteptat să-și continue dominația în perioada de prognoză. Dominanța este susținută în principal de SUA, Canada și Mexic. SUA, cu un CAGR de aproape 40%, a dominat piața Digital Twin din America de Nord. Companii precum Microsoft, Rockwell Automation, Ansys, IBM, Siemens, Dassault Systems și altele sunt câteva companii importante care operează în regiunea Americii de Nord analizate în raport. Europa și APAC contribuie, de asemenea, în mod semnificativ la piața digitală globală. În figura de mai sus putem observa creșterea previzionată pe regiuni și sectoare de activitate.

Secțiunea preliminară

Tema lucrării, scopuri și obiective

În cadrul mediului industrial modern, procesele de producție sunt supuse unei presiuni continue de a fi optimizate pentru a răspunde cerințelor tot mai exigente ale pieței și pentru a menține competitivitatea. În acest context, tema acestei lucrări se concentrează pe dezvoltarea și implementarea unui sistem de monitorizare în timp real a producției mașinilor cu control numeric pe calculator (CNC) prin utilizarea conceptelor Digital Twin.

Scopul fundamental al acestei lucrări este de a propune și de a valida un sistem de monitorizare în timp real a producției mașinilor CNC, având ca obiectiv principal îmbunătățirea eficienței și a performanței acestora în mediul industrial. Prin intermediul acestui sistem, se urmărește facilitarea unei analize detaliate și continue a parametrilor cheie ai producției, în vederea identificării și corectării rapide a eventualelor probleme sau ineficiențe.

Obiectivele pe care doresc să le ating prin această lucrare sunt unele simple, dar care au un impact pozitiv în contextul tematicii abordate:

Proiectarea sistemului de monitorizare: Elaborarea unei arhitecturi robuste și scalabile pentru sistemul de monitorizare în timp real, care să permită monitorizarea eficientă a datelor de producție.

Dezvoltarea sistemului de monitorizare: Crearea unei hărți 3D a mașinilor implicate în procesul de producție pentru monitorizarea parametrilor de funcționare al mașinilor și a informațiilor necesare desfășurării procesului de producție care se actualizează la fiecare modificare a parametrilor sau informațiilor înregistrate în procesul de producție.

Implementarea conceptelor Digital Twin: Integrarea și implementarea conceptelor Digital Twin pentru crearea unei replici virtuale a mașinilor CNC și a mediului lor de lucru, în vederea efectuării unei monitorizări precise și a unei analize detaliate a performanței.

- Dezvoltarea și implementarea unui sistem pentru analiza și monitorizarea datelor în timp real, cu accent pe identificarea rapidă a parametrilor procesului de producție și a parametrilor de funcționare ai mașinilor.
- Realizarea unui produs software cu un design intuitiv și responsive pe orice dispozitiv pe care rulează sistemul de operare Windows.
- Prezentarea rezultatelor obținute în urma testelor și a măsurilor luate pentru optimizarea și îmbunătățirea sistemului.
- Evaluarea impactului sistemului asupra eficienței operaționale, a productivității și a calității produselor finale.
- Identificarea unor direcții viitoare pentru cercetare și dezvoltare, precum și sugestii pentru îmbunătățirea și extinderea sistemului propus.

Fundamentarea teoretică

Structura sistemului de gemeni digitali

Gemenii digitali creează un sistem virtual care corespunde sistemului fizic. Un sistem virtual este o mapare completă a unui sistem fizic, reflectând starea operațională a sistemului fizic. Utilizând acest mediu virtual, este stabilit un sistem de monitorizare vizuală 3D pentru a oferi o monitorizare transparentă și cuprinzătoare a sistemului fizic.

Arhitectura gemenilor digitali este compusă din 3 elemente principale [2]: lumea fizică, lumea virtuală și conectivitatea între cele două. Fiecare element va integra o varietate de componente în funcție de

nevoile și cerințele designerului. Cu toate acestea, unele componente de bază includ senzori în lumea fizică (pentru a colecta informații din mediul real), un gemen fizic, capacități de prelucrare la marginea rețelei, securitatea datelor, gemenul digital în sine, capacități de prelucrare a datelor (activate de învățarea automată (ML), inteligența artificială (AI), big data, etc.) și interfețe de comunicare precum internetul, Bluetooth-ul, satelitul etc. O parte importantă a acestei arhitecturi de DT include și vizualizarea datelor pentru utilizator. Acest lucru este prezentat în Figura 2, în care lumea fizică este compusă din obiectul sau procesul fizic, senzori, actuatore și capacități de prelucrare. Lumea digitală este compusă din gemenul digital în sine, învățarea automată și capacitățile de prelucrare a datelor și baze de date. Ambele sunt conectate în elementul de comunicare, unde sunt disponibile mai multe protocoale și interfețe cum ar fi WiFi, Bluetooth și conexiuni prin cablu. Pentru utilizator, această arhitectură permite monitorizarea și vizualizarea constantă.

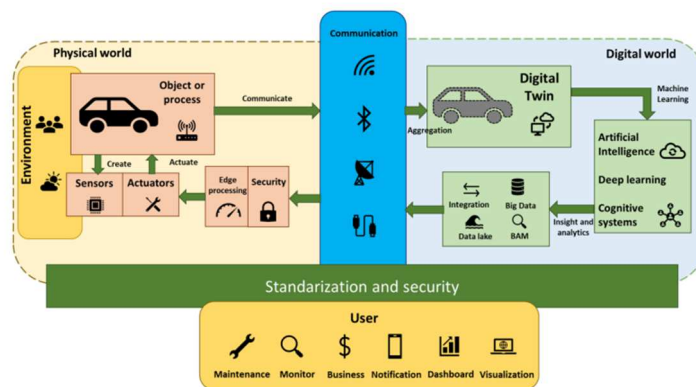


Fig. 2. Arhitectura Digital Twin Autor: Florina Pop

Nivelul de maturitate al germenilor digitali

Majoritatea conceptelor de gemeni digitali se situează la nivelele 0-3 de maturitate, iar puține au început integrarea cu fluxuri de date în timp real din cauza provocării semnificative a colectării, filtrării și procesării datelor în timp real, precum și a defecțiunilor dispozitivelor și a calibrării slabe care pot crea anomalii sau puncte de date lipsă. Modelarea simulării 3D cu componenta temporală este abordarea preferată până în prezent datorită disponibilității de a rula mai multe scenarii „what-if” alimentate de seturi reale de date. In Figura 3 de mai jos găsim nivelele de maturitate [3] existente în momentul actual.

Level	Principle	Usage
0	Reality capture (e.g., point cloud, drones, photogrammetry or drawings/sketches)	Brownfield (existing) as-built survey
1	2D map/system or 3D model (e.g., object-based, with no metadata or building information models)	Design/asset optimization and coordination
2	Connect model to persistent (static) data, metadata and building information model (BIM) Stage 2 (e.g., documents, drawings, asset management systems)	4D/5D simulation, design/asset management, BIM Stage 2
3	Enrich with real-time data (IoT, sensors)	Operational efficiency
4	Two-way data integration and interaction	Remote and immersive operations; control the physical from the digital
5	Autonomous operations and maintenance	Complete self-governance with total oversight and transparency

Fig. 3. Nivele de maturitate Digital Twin Autor: Florina Pop

Gemenii Digitali în procesul de fabricație inteligentă

Conform definiției larg utilizate de către Institutul Național de Standarde și Tehnologie [4], sistemele de fabricație inteligentă trebuie să fie entități de fabricație colaborative capabile să răspundă în timp real la schimbările de condiții și cereri.

Pentru a obține date, a analiza și a optimiza consumul de energie al unei producții inteligente de fabricație, pentru care fluxurile de materiale, fluxurile de date și procesele particulare sunt prezentate în Figura 4, proiectarea și implementarea unei platforme de analiză sunt absolut fundamentale. Este crucial să se pună în aplicare sisteme de gestionare a datelor în scopul stocării și gestionării scenariilor de date energetice, consumul și parametrii procesului de producție. Prin colectarea datelor, identificarea aspectelor cel mai consumatoare de energie ale anumitor procese va fi posibilă, ceea ce va facilita apoi integrarea noilor tehnologii digitale, gestionarea distribuită a procedurilor și optimizarea bazată pe date. Consumul de energie al echipamentelor și proceselor poate diferi semnificativ din cauza diverselor factori specifici, inclusiv tipul de utilaj, condițiile în care operează și programul de producție. Pentru a determina procesele sau echipamentele intensive în consum de energie, este necesar să se colecteze date despre consumul de energie, producție și eficiență, folosind senzori inteligenți selectați în mod specific, contoare și alte dispozitive de monitorizare care vor fi conectate la utilajele de fabricație.

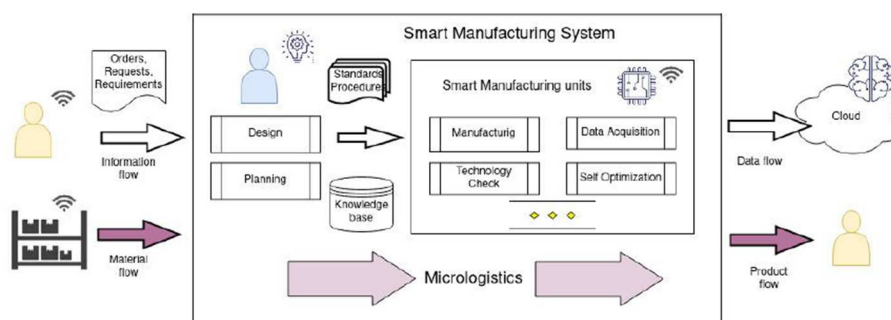


Fig. 4. Procesele, fluxurile și artefactele pentru utilizarea în fabricația inteligentă Autor: Florina Pop

Prezentarea generală a procesului de Setup și Producție CNC

Configurarea și producția mașinii CNC [5] urmează procesul prezentat în Figura 5 de mai jos.

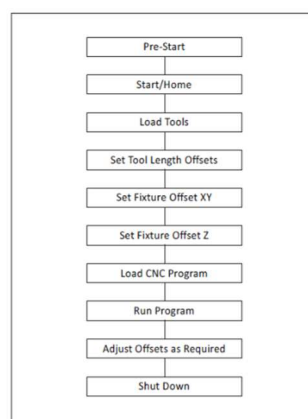


Fig. 5. Proces de producție CNC Autor: Florina Pop

Modele - Aplicații WPF cu Șablonul de Proiectare Model-View-ViewModel (MVVM)

Încă de când oamenii au început să creeze interfețe de utilizator software, au existat modele de proiectare populare care să ajute la facilitarea acestui proces. De exemplu, șablonul de proiectare Model-View-Presenter (MVP) [6] a fost popular pe diverse platforme de programare a interfeței utilizatorului. MVP este o variație a șablonului de proiectare Model-View-Controller (MVC), care există de decenii. În cazul în care nu ai folosit niciodată șablonul MVP înainte, iată o explicație simplificată. Ceea ce vezi pe ecran este View-ul, datele pe care le afișează sunt modelul, iar Presenter-ul le leagă între ele. View-ul se bazează pe un Presenter pentru a-l popula cu datele modelului, a reacționa la intrările utilizatorului, a furniza validare a intrării (poate prin delegarea către model) și alte astfel de sarcini. Clasele ViewModel pot moșteni toată funcționalitatea comună de la o clasă de bază. Clasele ViewModel formează ierarhia de moștenire văzută în Figura 6.

Notificări și acțiuni real-time folosind Microsoft SignalR Hub

SignalR [7] este o bibliotecă pentru dezvoltatori, creată de Microsoft, care facilitează comunicația în timp real între client și server în aplicațiile web. Folosește WebSocket pentru comunicații eficiente, dar poate adapta alte tehnologii în lipsa WebSocket-ului. Oferă o API simplificată pentru trimiterea și recepționarea de mesaje, suport pentru diverse platforme și limbaje de programare, funcționalități avansate precum gestionarea conexiunilor și securitate integrată. Este utilizată pentru dezvoltarea de aplicații web interactiv și în timp real.

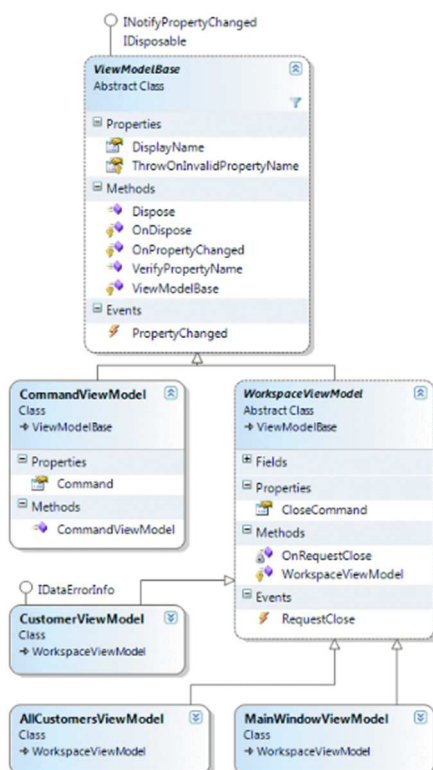


Fig. 6. Ierarhia de moștenire a claselor ViewModel
Autor: Florina Pop

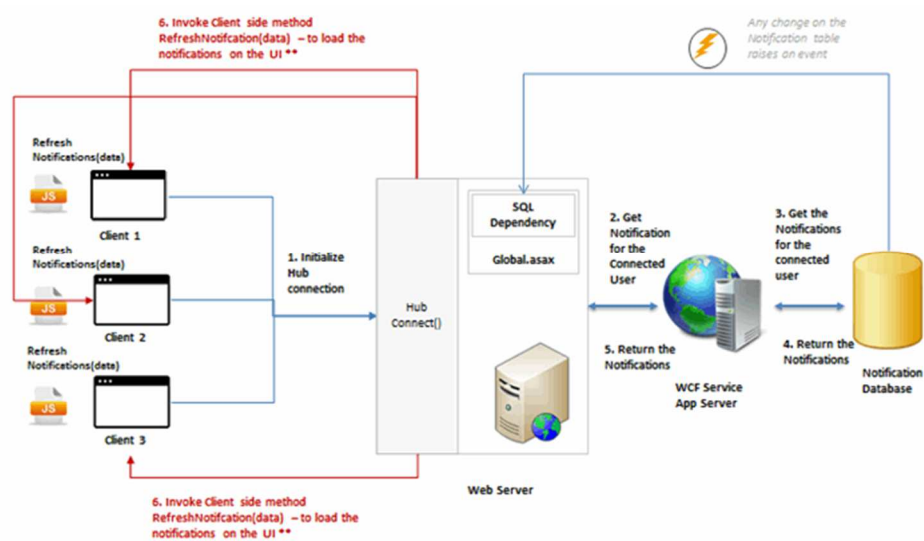


Fig. 7. Arhitectura Notificări Real-Time SignalR Autor: Florina Pop

Proiectarea în detaliu și implementarea

Baza de date

Aplicația propusă folosește baza de date creată în MYSQL folosind limbajul de programare SQL. Aceasta, în urma organizării ei, conține 9 tabele.

În procesul proiectării bazei de date interne MYSQL, s-a ținut cont de normalizarea acesteia, evitându-se câmpurile redundante, cheile sintetice și referințe circulare, dar și alte procese după cum urmează:

- S-a definit o structură clară a tabelor, cu nume de coloane și tabele sugestive.
- Fiecare tabel conține informații legate doar de un singur obiect care a fost definit.
- Fiecare tabel are o cheie primară.
- Câmpurile tabelor au fost definite în funcție de cel mai optim tip prin prelucrarea câmpurilor cu ajutorul funcțiilor.
- În figura de mai jos vom ilustra diagrama bazei de date înainte de derivarea tabelor.

Organizarea proiectului software WPF C#

Proiectul este realizat în .NET 8 WPF. Acesta conține:

Controls: conține interfețe reutilizabile în alte ferestre. De exemplu, Controlul ResourceControl conține design-ul fiecărei resurse din harta real-time și este re-utilizat pentru fiecare resursă fără a fi nevoie de definirea acestor setări pentru fiecare resursă. Este folosit pentru a putea configura o interfață responsive pentru fiecare resursă din harta live fără a fi nevoie să rescriem același cod.

- **Helpers:** conține clasele necesare pentru a fi executate comenzile, converterele de valori, implementarea sistemului de dialog.
- **Resources:** conține toate resursele proiectului cum ar fi imaginile, stilurile și toate informațiile globale care sunt disponibile în toate interfețele pentru a fi re-utilizate.
- **Models:** definirea tabelor și câmpurile existente în baza de date pentru o entitate.
- **ViewModels:** funcționalitatea fiecărei interfețe pentru a putea separa datele prelucrate.
- **Windows:** interfața principală care conține restul interfețelor utilizate în aplicație.

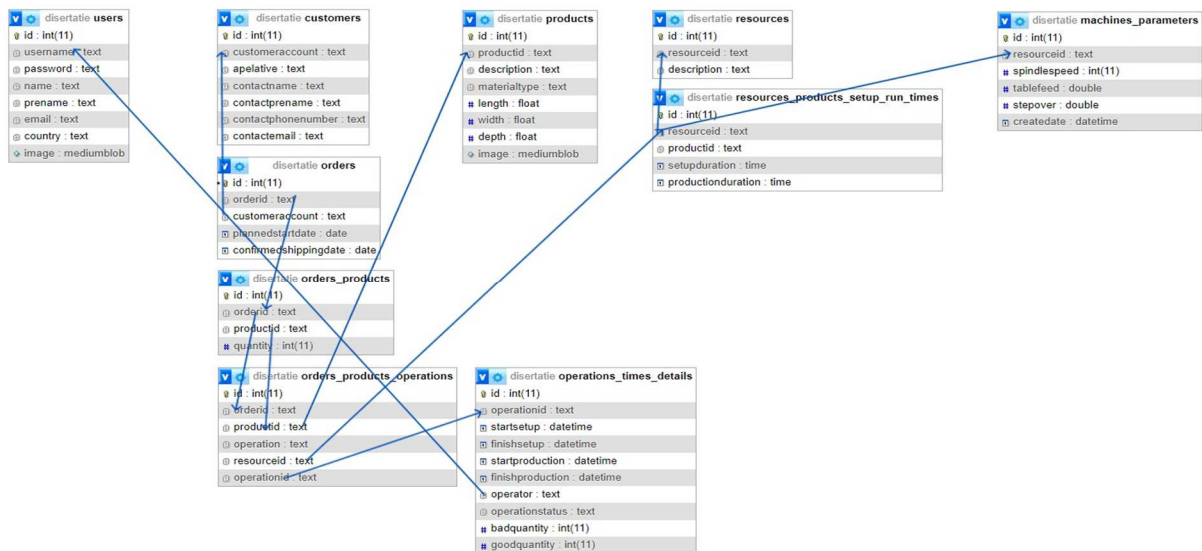


Fig.8. Diagrama bazei de date nedetalizată Autor: Florina Pop

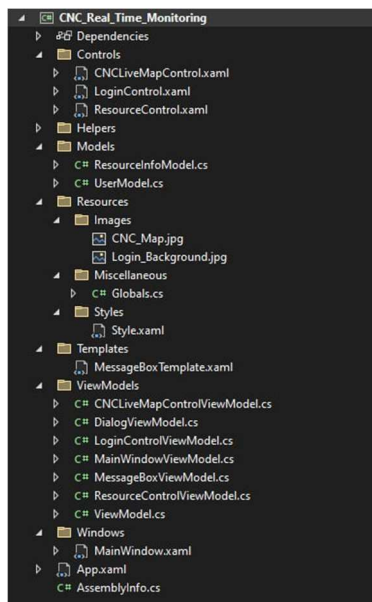


Fig.9. Structura proiectului de cod software Autor: Florina Pop

Manualul de utilizare

Pentru a putea folosi aplicația software este nevoie să o instalăm cu ajutorul kit-ului de instalare configurat, respectiv să pornim serverul de local host configurat în xampp pentru aplicație.

Interfețele sunt responsive pentru orice dispozitiv care rulează pe sistemul de operare Windows.

Structura aplicației

- Interfața de Login: autentificarea în aplicație se face pe baza unui user și a unei parole.
- Harta Live pentru monitorizarea producției și a mașinilor CNC: interfața care conține o replica reală 3D a unei hale cu 8 mașini CNC. Pentru fiecare mașină sunt disponibile în timp real informațiile importante pentru o comandă, respective a parametrilor relevanți de funcționare a mașini. Atunci când se modifică în procesul de producție la o comandă vreo informație (comandă s-a finalizat), în momentul în care se produce modificarea interfața își face automat refresh la toate informațiile.

Concluzii

Dezvoltarea și implementarea unui sistem de monitorizare în timp real a mașinilor cu control numeric pe calculator (CNC) folosind conceptele Digital Twin reprezintă o soluție eficientă pentru optimizarea proceselor de producție și menținerea competitivității în mediul industrial modern.

Prin intermediul acestui sistem, s-a reușit facilitarea unei monitorizării detaliate și continue a parametrilor cheie ai producției, permițând identificarea rapidă a problemelor sau ineficiențelor și luarea măsurilor corespunzătoare pentru corectarea acestora. De asemenea, implementarea conceptelor Digital Twin a contribuit la crearea unei replici virtuale precise a mașinilor CNC și a mediului lor de lucru, oferind o viziune cuprinzătoare asupra întregului proces de producție.

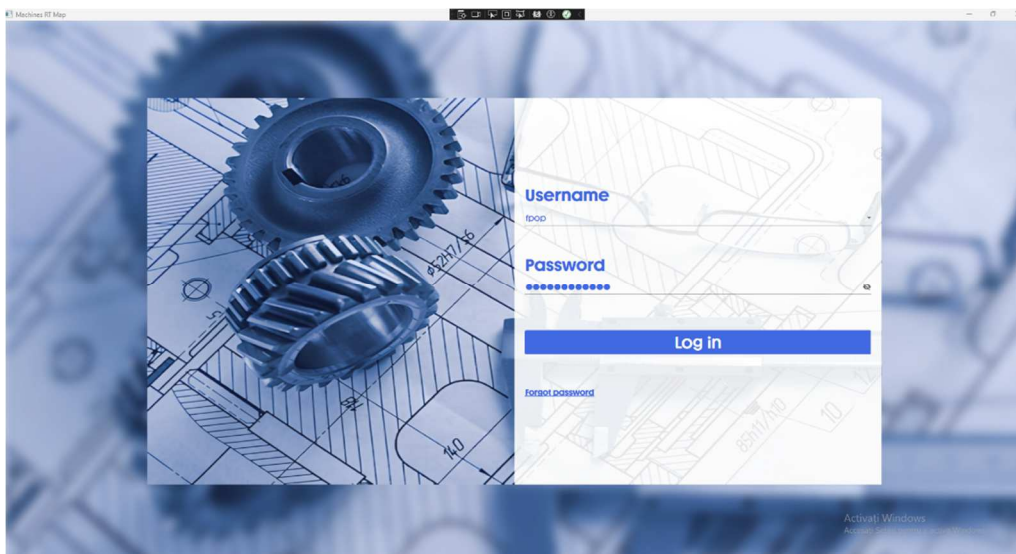


Fig.10. Interfața de Login
Autor: Florina Pop

Obiectivele inițiale ale proiectului au fost atinse prin proiectarea, dezvoltarea și implementarea unui sistem robust de monitorizare, optimizarea fluxului de date și a analizei algoritmice, evaluarea impactului sistemului asupra eficienței operaționale și a calității produselor finale, precum și identificarea unor direcții viitoare pentru cercetare și dezvoltare.

În concluzie, proiectul a demonstrat că utilizarea tehnologiilor moderne și a conceptelor inovatoare poate contribui semnificativ la îmbunătățirea proceselor industriale, conducând la creșterea eficienței, productivității și competitivității în industrie.

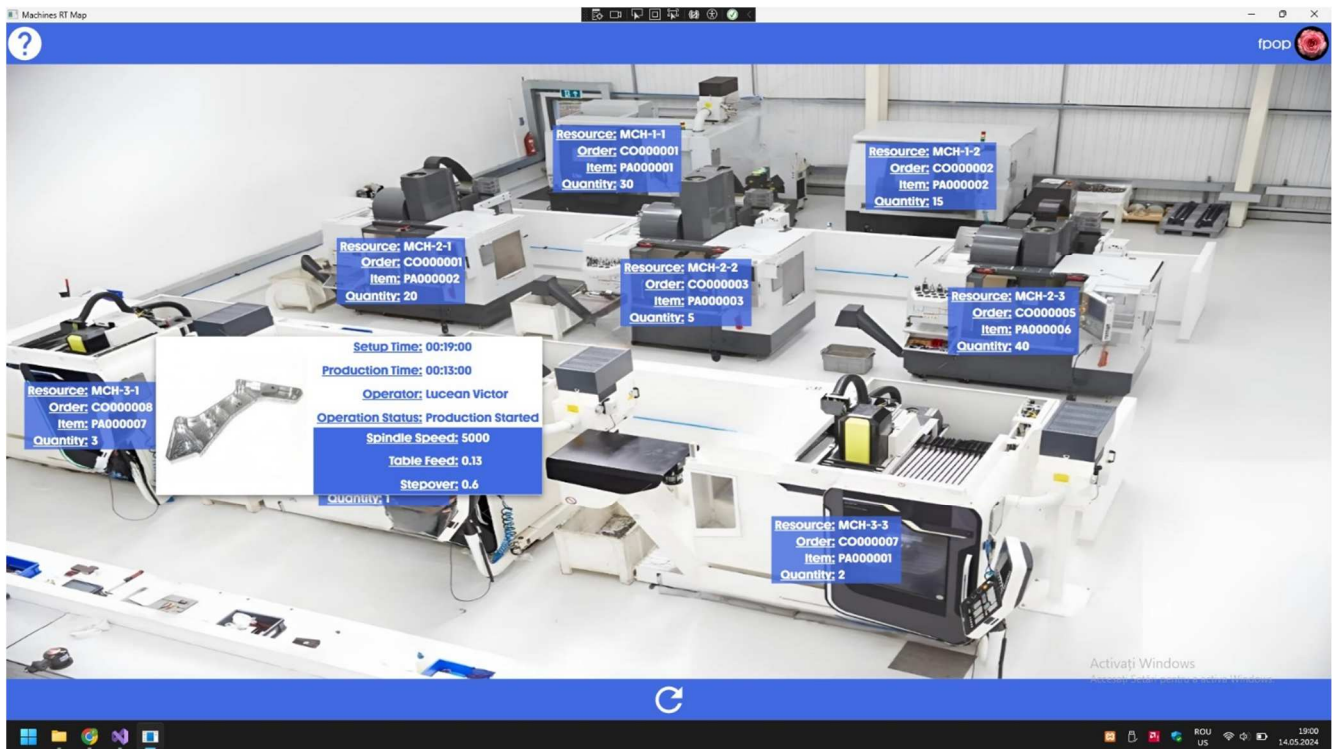


Fig. 11. Hartă Live Monitorizare proces producție al mașinilor CNC Autor: Florina Pop

Direcții de dezvoltare

Această lucrare reprezintă un prim pas în cercetarea și implementarea conceptului de Digital Twin (Gemeni Digital). În prezent, este axată pe monitorizarea în timp real a procesului de producție și a parametrilor de funcționare ai mașinilor CNC (Control Numeric Computerizat). În viitor, aceasta va continua prin implementarea unui sistem avansat, care să preia automat parametrii de funcționare direct de la mașina CNC.

Această evoluție implică mai multe aspecte:

- Implementarea unui sistem de colectare automată a parametrilor de funcționare: Se va dezvolta un software sau un sistem hardware care să preia automat parametrii de funcționare ai mașinilor CNC, fără intervenția manuală a operatorilor. Acest lucru va permite o colectare mai precisă și mai eficientă a datelor.
- Dezvoltarea unui software de analiză și raportare a performanței: Se va crea un software specializat care să analizeze datele colectate și să genereze rapoarte detaliate privind performanța mașinilor CNC. Aceste rapoarte vor oferi informații utile pentru optimizarea

procesului de producție și identificarea potențialelor probleme.

- Implementarea unui sistem de predicție a productivității și mentenanței mașinilor: Utilizând datele istorice și algoritmi de analiză avansată, se va dezvolta un sistem capabil să facă predicții cu privire la performanța viitoare a mașinilor CNC și necesitatea intervențiilor de mentenanță preventivă.

În ansamblu, această cercetare și implementare în domeniul Digital Twin are ca scop îmbunătățirea eficienței și fiabilității procesului de producție, prin utilizarea tehnologiilor moderne de monitorizare și analiză a datelor.

Bibliografie

- „Digital Twin Market: Global Industry Analysis and Forecast (2024-2030),” [Interactiv]. Available:
1] <https://www.stellarmr.com/report/Digital-Twin-Market/1606>.
- „Digital Twin Technology Challenges and Applications,” [Interactiv]. Available: [https://research-](https://research-management.mq.edu.au/ws/portalfiles/portal/195738450/195689060.pdf)
2] [management.mq.edu.au/ws/portalfiles/portal/195738450/195689060.pdf](https://research-management.mq.edu.au/ws/portalfiles/portal/195738450/195689060.pdf).
- „Research On Virtual Monitoring Method Based On Digital Twin,” [Interactiv]. Available: <https://ceur->
3] [ws.org/Vol-3387/paper11.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-3387/paper11.pdf).
- „Digital Twin Implementation in Transition of Smart Manufacturing,” [Interactiv]. Available: <https://ceur->
4] [ws.org/Vol-3468/paper2.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-3468/paper2.pdf).
- „Fundamentals of CNC Machining,” [Interactiv]. Available:
5] https://academy.titansofcnc.com/files/Fundamentals_of_CNC_Machining.pdf.
- „Patterns - WPF Apps With The Model-View-ViewModel Design Pattern,” [Interactiv]. Available:
6] <https://learn.microsoft.com/en-us/archive/msdn-magazine/2009/february/patterns-wpf-apps-with-the-model-view-viewmodel-design-pattern>.
- „Real Time Notifications using SignalR and SQL Dependency,” [Interactiv]. Available:
7] <https://www.codeproject.com/Articles/883702/Real-Time-Notifications-using-SignalR-and-SQL-Depe>.