

Universitatea Politehnica Timișoara
Ingineria sistemelor

Soluții hardware-software IIoT pentru interoperarea și îmbunătățirea sistemelor din industria automotivă în contextul Industry 4.0

Rezumatul tezei de doctorat

Alexandru IOANA

Președintele comisiei: prof.univ.dr.ing. Radu-Emil PRECUP

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Ioan SILEA

Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Grigore STAMATESCU

prof.univ.dr.ing. Cosmin IONETE

prof.univ.dr.ing. Gheorghe-Daniel ANDREESCU

CUPRINS

1. Introducere.....	3
1.1. Domeniul Tezei	3
1.2. Obiective.....	4
1.3. Lista Publicatiilor	5
2. OPC UA și SOME/IP Gateway în contextul comunicației Car-to-Infrastructure	6
2.1. Mecanismul OPC UA Publish-Subscribe.....	6
2.2. Arhitectura Sistemului	7
2.3. Studiu de caz 1	8
2.4. Studiu de caz 2	9
2.5. Studiu de caz 3	9
2.6. Studiu de caz 4	10
3. Îmbunătățirea mecanismului OPC UA Publish-Subscribe în contextul eficientizării comunicației în timp real	12
3.1. Mecanismul Publish-Subscribe: Design și Arhitectură	12
3.2. Arhitectura Sistemului	13
3.3. Rezultate și Revendicări	14
4. Abordarea mecanismului OPC UA Publish-Subscribe în contextul transmiterii de imagini	16
5. Coexistența protocoalelor DDS și OPC UA în contextul Industry 4.0 și a comunicației în timp real	18
5.1. Arhitectura Sistemului	18
5.2. Rezultatele Studiului de caz 1	20
5.3. Rezultatele Studiului de caz 2	21
6. Tehnologii IoT și Automotive de comunicație, aplicate într-un context V2X prin intermediul unui Gateway Multi-Protocol.....	25
6.1. Aplicabilitate în domeniul automotive.....	26
6.2. Arhitectura Sistemului	27
6.3. Rezultate	30
7. Contribuții personale	34
Bibliografie	35

1. INTRODUCERE

1.1. Domeniul Tezei

În ultimii ani, conceptele Industrial Internet of Things și Industry 4.0 au devenit tot mai prezente atât în cadrul cercetărilor științifice, cât și în industrie. Cele două concepte se bazează pe interoperabilitatea sistemelor complexe, specifice mai multor sectoare industriale, cu scopul îmbunătățirii performanțelor actuale. Interacțiunea sistemelor complexe implică, de la un sector industrial la altul, o multitudine de soluții hardware și software specializate pentru procese industriale particularizate, cu diverse necesități și dependențe tehnologice. De obicei, tehnologiile tradiționale utilizate în industrie la scară largă, au fost concepute cu obiective precise și au fost validate de-a lungul timpului în scenarii bazate pe nevoile unui sector industrial. Astfel, adaptarea soluțiilor actuale către cazuri de utilizare mai ample, reprezintă o provocare și singurul mod fezabil pentru a se realiza presupune o serie de etape de dezvoltare, începând de la nivel arhitectural până la implementarea efectivă a mecanismelor de bază și validarea acestora. Pentru a eficientiza pe cât posibil acest proces granular de dezvoltare, un prim pas trebuie să vizeze identificarea cât mai exactă a cerințelor și nevoilor pentru viitoarele sisteme IIoT, iar mai apoi selectarea tehnologiilor cu cel mai mare potențial și impact în cadrul sectoarelor industriale de interes major.

Domeniul automotive este la ora actuală unul din cele mai dezvoltate domenii industriale, fiind un pilon de bază în economia globală. Raportul dintre cerere și ofertă, facilitează producția în mod constant, iar de la an la an, se investește masiv în cercetare și dezvoltare, dorindu-se o evoluție tehnologică continuă. Ramurile aferente acestui sector sunt proiectarea, fabricarea, asamblarea și vânzarea de autoturisme. Luând în considerare progresele recente, se poate afirma că domeniul automotive trece printr-o perioadă de tranziție către producția în masă de mașini electrice și autonome. Această tranziție stimulează dezvoltarea de tehnologii hardware și software capabile să susțină industria pe termen lung, conturându-se o nouă viziune ce lărgeste orizonturile explorate până în prezent. Luând în considerare conceptele de conducere autonomă, cât și evoluția preconizată a arhitecturilor și a capabilităților de interconectare și interoperare, este cel mai prielnic moment pentru plasarea în context comun a sectoarelor automotive și IIoT, urmărindu-se principiile de dezvoltare specifice Industry 4.0. Având în vedere faptul că termenul Internet of Things are o acoperire semnificativă, pentru conceperea de soluții avansate de interoperare, va fi nevoie de îmbinarea de tehnologii cu capacități diverse, specifice în general sectoarelor de automatizare industrială, laolaltă cu cele mai avansate tehnologii automotive.

Principalele concepte și tehnologii vizate sunt în general protocoalele avansate de comunicare pe Ethernet, arhitecturile ce implică multiple dispozitive hardware cu capabilități variate și paradigmele de comunicație ce facilitează distribuția de date în mod eficient și de preferat în timp real. Pentru dezvoltarea soluțiilor automotive – IIoT, trebuie urmărite aspecte referitoare la eficiență, fezabilitate, scalabilitate, și flexibilitate. Eficiența comunicațiilor pe Ethernet stă la baza conceptului IoT și cu siguranță reprezintă o arie de cercetare unde se pot înregistra progrese semnificative cu impact industrial ridicat.

În cadrul etapelor de cercetare, tehnologiile vizate aparțin în prezent unor sectoare industriale clar definite, însă utilizate în context comun, oferă perspective noi și rezultate precise ce confirmă progresul și obiectivele propuse. Având în vedere domeniul automatizărilor industriale, ce poate fi perceput în mod indubitabil ca un subcomponent al sectorului IoT, protocolul OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) a fost utilizat în numeroase prototipuri și concepte originale, cunoscându-se amplitudinea și popularitatea sa atât în context industrial, cât și academic. Asociat protocolului OPC UA, s-au efectuat investigații și experimente în legătură cu tehnologia TSN (Time Sensitive Networking) și sistemele de operare Posix, ambele noțiuni reprezentând teme actuale, de mare interes în foarte multe dezvoltări industriale. Soluția middleware de comunicație pe Ethernet, recunoscută și validată în domeniul automotive este SOME/IP (Scalable service-Oriented MiddlewarE over IP). Fiind protocolul utilizat în majoritatea aplicațiilor disponibile la ora actuală și parte a standardului AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture), SOME/IP a fost selectat ca tehnologie de referință în cadrul diverselor etape de cercetare, urmărindu-se o autenticitate cât mai mare în raport cu industria. Adicional tehnologiilor ce pot fi asociate fără echivoc unor sectoare particulare din industrie, se mai regăsesc și tehnologii cu mare potențial, conforme atât cu sectorul automotive cât și cu domeniul IoT, ce nu sunt neapărat plasate și răspândite într-un context specific. Protocolul DDS (Data Distribution Service) și soluția middleware eCAL (enhanced Communication Abstraction Layer) se află în această ipostază, și au fost vizate în implementările aferente diverselor etape de cercetare. În ultimii ani, DDS a fost în continuă expansiune și a început

să fie categorisit ca protocol IoT, fiind utilizat în scenarii foarte diversificate, oferind inclusiv conformitate cu domeniul automotive, respectiv cu standardul AUTOSAR. Soluția middleware eCAL a devenit disponibilă mai recent, nu este foarte cunoscută, iar ariile de aplicabilitate încă nu sunt stabilite. Cu toate acestea, eCAL are originile tehnologice în domeniul automotive și reprezintă o alternativă la soluțiile existente de comunicație pe Ethernet, ce merită explorată în mod detaliat. Analiza acestor tehnologii în diverse contexte de operare, îmbunătățirea arhitecturilor, a mecanismelor aferente și explorarea posibilităților de funcționare în timp real, conturează tema actualei teze, urmărindu-se în final obținerea unor rezultate cât mai elocvente în legătură cu toate aspectele menționate și dezvoltarea unor soluții concrete ce eficientizează procesele industriale și prezintă noi capacități necesare în circumstanțele Industry 4.0.

1.2. Obiective

Obiectivele cercetării doctorale sunt structurate în concordanță cu nevoile industriale și cu temele de interes major din comunitatea academică. Se urmăresc principiile de interoperare asociate conceptelor Industry 4.0 și IIoT, iar soluțiile dezvoltate contribuie la îmbunătățirea sistemelor de comunicație pe Ethernet și la rafinarea arhitecturilor complexe. Conceptele dezvoltate sunt aplicate într-un context diversificat, urmărind la fiecare etapă a cercetării, asocierea cu procese industriale sofisticate. Tehnologiile vizate sunt analizate în mod amănunțit, iar implementările rezultate combină particularități tehnologice, cu scopul eficientizării capacităților de comunicare pe numeroase tipuri de dispozitive și sisteme de operare. Având în vedere multitudinea de protocoale de comunicare vizate, aplicațiile de tip gateway dezvoltate se aliniază criteriilor industriale și evidențiază perspective noi, atât din punct de vedere arhitectural cât și aplicativ. Îmbunătățirile aduse sunt prezentate sub forma unor rezultate precise, iar avantajele și dezavantajele strategiilor și metodelor utilizate, sunt descrise în mod obiectiv, în raport cu cerințele și cazurile de utilizare din sectoarele automotive și IoT.

Principalele obiective sunt următoarele :

1. Dezvoltarea unei aplicații Gateway între protocoalele OPC UA și SOME/IP, în contextul unui scenariu de comunicație de tip Car-to-Infrastructure, fiind utilizate paradigmele Server-Client, respectiv Publish-Subscribe, pentru obținerea pe cât posibil a unei funcționări în timp real;
2. Analiza și îmbunătățirea mecanismului OPC UA Publish-Subscribe, în concordanță cu cerințele industriei automotive, prin adaptarea arhitecturii pentru constrângeri de operare în timp real și pentru sincronizarea procedurilor de pe dispozitive separate;
3. Extinderea aplicabilității protocolului OPC UA în contextul transmiterii de imagini, prin utilizarea mecanismului Publish-Subscribe;
4. Dezvoltarea unei aplicații Gateway între protocoalele DDS și OPC UA, analizându-se compatibilitatea și eficiența în cadrul unei arhitecturi ce permite utilizarea celor două tehnologii atât în context paralel cât și comun;
5. Conceperea și dezvoltarea unei soluții configurabile de tip gateway multi-protocol, ce poate interfața entități SOME/IP, DDS, eCAL complet separate, extinzând aplicabilitatea către concepte V2X și interacțiuni între structuri de comunicare specifice diferitelor domenii industriale.

Având în vedere anvergura și dificultatea obiectivelor principale, în cadrul fiecărei etape de cercetare s-au stabilit anumite obiective adiționale sau derivate. Acest set complementar de obiective clarifică metode și strategii utilizate pe parcurs, respectiv detaliază abordări și rezultate obținute în urma numeroaselor experimente și analize.

- A. Analiza impactului tehnologiei TSN în raport cu protocoalele de comunicare pe Ethernet;
- B. Furnizarea unor concepte arhitecturale fezabile și a unui algoritm de sincronizare pentru îmbunătățirea mecanismului OPC UA Publish-Subscribe;
- C. Definirea unei strategii de comunicare UDP multi-canal pentru utilizarea mecanismului OPC UA Publish-Subscribe în contextul transmiterii de imagini;
- D. Definirea unor criterii și metode specifice, ce permit examinarea protocoalelor de comunicare de nivel înalt, în cadrul unor sisteme diversificate;
- E. Definirea unor arhitecturi eficiente în cazurile de interacțiune între multiple tehnologii automotive – IoT;
- F. Generarea unor rezultate cuantificabile ce evidențiază stabilitatea și capacitatea de funcționare în timp real pentru soluțiile dezvoltate pe parcursul etapelor de cercetare.

1.3. Lista Publicațiilor

Din punct de vedere statistic, pe parcursul cercetării doctorale au fost elaborate în total 6 lucrări științifice, toate indexate Web of Science, lucrarea inițială fiind prezentată în cadrul unei reputeate conferințe. Cele cinci lucrări ce au urmat au fost publicate în jurnale de prestigiu, obținându-se un factor de impact cumulat de 19.235. Detalii suplimentare pot fi observate pe baza enumerării lucrărilor, în ordine cronologică în funcție de data publicării, după cum urmează :

- Capitolul 2 se bazează pe rezultatele lucrărilor:

A. Ioana and A. Korodi, "VSOMEIP - OPC UA Gateway Solution for the Automotive Industry," *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICE.2019.8792619.

Ioana, A.; Korodi, A. OPC UA Publish-Subscribe and VSOME/IP Notify-Subscribe Based Gateway Application in the Context of Car to Infrastructure Communication. *Sensors* 2020, *20*, 4624. <https://doi.org/10.3390/s20164624>.

- Capitolul 3 se bazează pe rezultatele lucrării:

Ioana, A.; Korodi, A. Improving OPC UA Publish-Subscribe Mechanism over UDP with Synchronization Algorithm and Multithreading Broker Application. *Sensors* 2020, *20*, 5591. <https://doi.org/10.3390/s20195591>.

- Capitolul 4 se bazează pe rezultate lucrării:

Ioana, A.; Burlacu, C.; Korodi, A. Approaching OPC UA Publish-Subscribe in the Context of UDP-Based Multi-Channel Communication and Image Transmission. *Sensors* 2021, *21*, 1296. <https://doi.org/10.3390/s21041296>.

- Capitolul 5 se bazează pe rezultatele lucrării:

Ioana, A.; Korodi, A. DDS and OPC UA Protocol Coexistence Solution in Real-Time and Industry 4.0 Context Using Non-Ideal Infrastructure. *Sensors* 2021, *21*, 7760. <https://doi.org/10.3390/s21227760>.

- Capitolul 6 se bazează pe rezultatele lucrării:

Ioana, A.; Korodi, A.; Silea, I. Automotive IoT Ethernet-Based Communication Technologies Applied in a V2X Context via a Multi-Protocol Gateway. *Sensors* 2022, *22*, 6382. <https://doi.org/10.3390/s22176382>.

2. OPC UA ȘI SOME/IP GATEWAY ÎN CONTEXTUL COMUNICAȚIEI CAR-TO-INFRASTRUCTURE

Etapă curentă de cercetare definește o serie de obiective concrete, bazate pe interacțiunea OPC UA – VSOME/IP:

- Dezvoltarea de aplicații Gateway între OPC UA și VSOME/IP, acoperind multiple scenarii industriale, oferind o analiză detaliată asupra trendurilor și tehnologiilor cu potențial ridicat.
- Implementarea paradigmelor de tipul Server-Client și Publish-Subscribe pentru ambele protocoale, prezentând pașii de implementare în mod detaliat. Analiza și îndeplinirea cerințelor de funcționare în timp real prin sincronizarea precisă a procedurilor de recepție și transmisie de date pentru toate entitățile implicate.
- Furnizarea unei viziuni clare asupra celor mai eficiente și fezabile soluții pentru comunicația de tipul Car-to-Infrastructure.

2.1. Mecanismul OPC UA Publish-Subscribe

Pentru ca OPC UA să evolueze și să îmbunătățească automatizarea în contextul Industry 4.0, pentru a obține funcționalitatea în timp real și pentru integrarea facilă a echipamentelor hardware provenite de la orice furnizor, îndeplinind cerințele de comunicație rapidă și integrare în infrastructuri cloud, OPC Foundation a conceput mecanismul Publish-Subscribe ca parte a 14-a a specificațiilor OPC UA. Când se face referire la comunicația între două controlere, nevoile sunt reprezentate de latența scăzută într-un design al transmisiei de tip one-to-one. Când se face referire la interacțiunea cu structuri de tip cloud, designul transmisiei devine de tip one-to-many sau many-to-many, fiind nevoie de o rețea cu capacitate mare. În momentul combinării la scară largă a diverselor tipuri de tipare de comunicație și dispozitive cu caracteristici variate, mecanismul Publish-Subscribe se dovedește a fi potrivit din punct de vedere al flexibilității, performanței, iar în funcție de tipul de transport selectat, mecanismul este permisiv în integrarea dispozitivelor cu capacități diferite, în același context. Pentru transmisii frecvente și volum redus de informații, transportul UDP cu mesaje codificate binar reprezintă o soluție bună în transmisiile de tip one-to-one și one-to-many. Pentru integrarea cu structurile cloud și aplicațiile de analiză, sunt preferate protocoalele standard de mesagerie precum MQTT și AMQP. Pe baza flexibilității și integrării facile a dispozitivelor, cerințele de funcționare în timp real necesită a fi rezolvate, iar tehnologia TSN oferă posibilitatea de a atinge o calitate maximă a serviciilor în ceea ce privește sincronizarea, viteza, predictibilitatea și lățimea de bandă, prin implementarea standardelor specifice nivelului Data Link Layer. Astfel, capabilitățile OPC UA se extind din punct de vedere al scalabilității și eficacității. În contextul relației dintre conceptele, specificațiile și protocoalele abordate în acest studiu Figura 1 prezintă corelația dintre nivelele modelului OSI în cazul OPC UA și VSOME/IP.

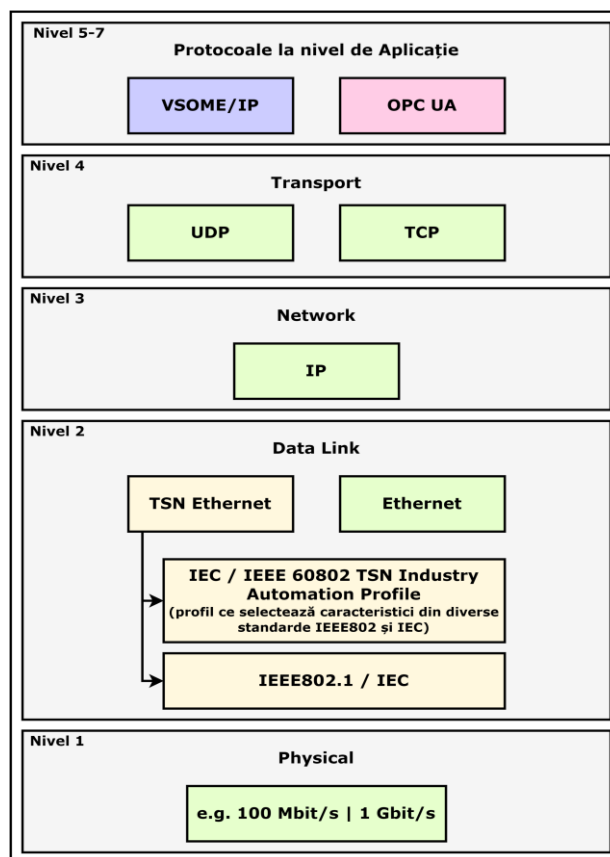


Figura 1. Protocoalele OPC UA și VSOME/IP în relație cu UDP, TSN, Raw Ethernet, în contextul modelului OSI

2.2. Arhitectura Sistemului

Considerând conceptul inovator de interoperabilitate între două protocoale complexe de nivel înalt și obiectivul dezvoltării unei aplicații Gateway performante, neexistând alte implementări ce pun în același context tehnologiile OPC UA și VSOME/IP, actuala cercetare a fost structurată din punct de vedere practice sub forma a 4 studii de caz. Fiecare studiu de caz conține particularități din punct de vedere al paradigmelor folosite, al scenariilor vizate și al componentelor hardware și software necesare. Având în vedere aceste diferențe semnificative, a fost definită o arhitectură generală a conceptului de interfațare pe baza aplicației de tip Gateway ce poate fi observată în Figura 2.

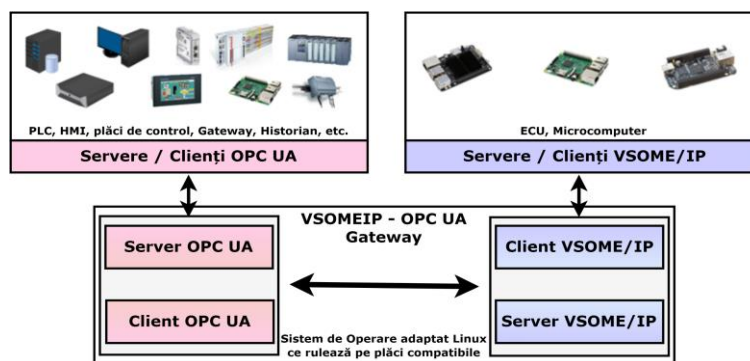


Figura 2: Arhitectura generală a conceptului VSOME/IP-OPC UA Gateway

Deși diferențele între cazurile de studiu presupun modificări în legătură cu entitățile dezvoltate, se poate defini o structură arhitecturală de bază a sistemului, validă în toate aceste

cazuri cu mici ajustări în funcție de scenariul vizat. Această arhitectură se bazează pe 5 entități cu roluri diferite, după cum urmează:

1. Un Server/Publisher OPC UA ce stochează datele necesare pentru a fi transmise și reprezintă punctul de pornire al schimbului de date.
2. Un Client OPC UA (în cazul în care entitatea 1 este de tip Server), ce modifică datele stocate cu o recurență configurabilă.
3. Aplicația Gateway – având un subcomponent OPC UA Client/Subscriber responsabil de recepționarea datelor provenite de la furnizorul OPC UA.
4. Aplicația Gateway – având un subcomponent sub forma unui serviciu VSOME/IP cu rolul de Server/Notifier, responsabil pentru trimiterea datelor mai departe către receptorul final.
5. Un Client/Subscriber VSOME/IP cu rolul de receptor final al datelor.

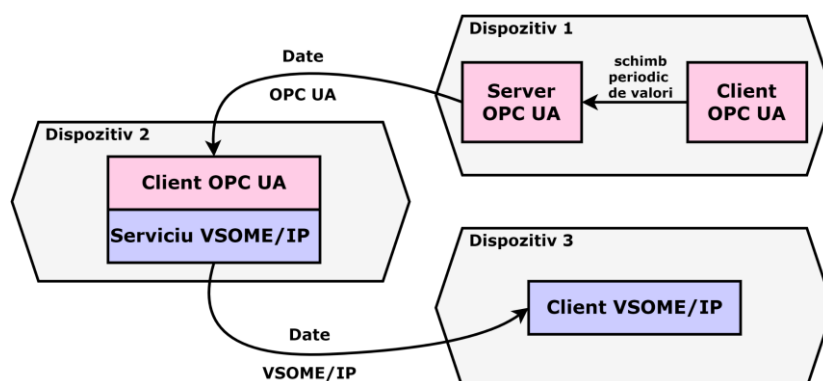


Figura 3. Arhitectura Hardware în raport cu entitățile dezvoltate

2.3. Studiu de caz 1

Primul studiu de caz reprezintă confirmarea compatibilității celor două protocoale utilizate, precum și să evidențieze capabilitățile de interacționare cu structuri industriale deja validate. Urmărind designul arhitectural și adoptând paradigmele clasice de tipul Server/Client respectiv Request-Response, entitatea OPC UA este considerată furnizorul datelor de interes, fiind asociată unui proces industrial (de exemplu un semafor inteligent). Aplicația Gateway facilitează recepționarea datelor prin subcomponentul de tip OPC UA Client și le transmite subcomponentului VSOME/IP Server pentru pregătirea livrării către receptorul final VSOME/IP Client. Această transmisie este structurată sub forma a 5 pași, după cum urmează:

- Pasul 1. Serverul OPC UA transmite datele (mesajul "0xaa") către aplicația Gateway.
- Pasul 2. Aplicația Gateway transferă mesajul mai departe către receptorul final.
- Pasul 3. Clientul VSOME/IP recepționează datele de interes și pregătește un mesaj de confirmare.
- Pasul 4. Clientul VSOME/IP trimite mesajul de confirmare (mesajul "0xcc") către aplicația Gateway.
- Pasul 5. Aplicația Gateway recepționează mesajul de confirmare și îl expediază către Serverul OPC UA

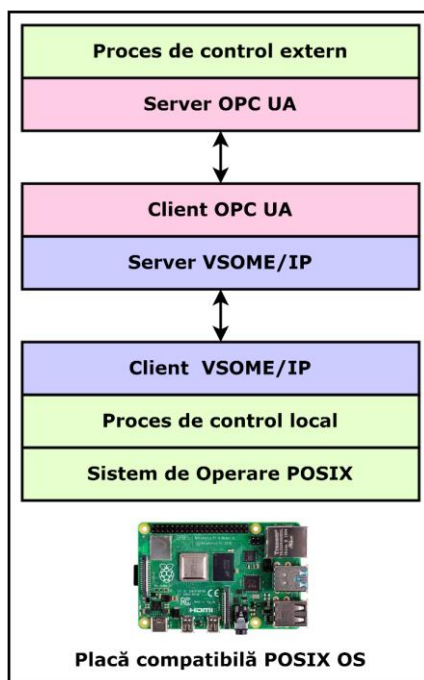


Figura 4. Secvența de transmisie în cadrul plasării tuturor entităților pe același dispozitiv

A doua fază a primului studiu de caz constituie interacțiunea dintre aplicația Gateway și structuri externe OPC UA validate în scenarii industriale. Prin urmare, scenariul luat în considerare a presupus conectarea la un Server OPC UA dintr-o instalație funcțională, asociat unui Server SCADA WinCC Professional v13.

```

[2019-01-14 22:00:34.596 (UTC+0200)] info/userland 1.We receive from node DB111_MCC_FB1_SA1_ENERGIE value:17.275760
[2019-01-14 22:00:34.818 (UTC+0200)] info/userland 2.We receive from node DB1_HMI_ACREL[1].PEAKS value:55.599998
[2019-01-14 22:00:43.179 (UTC+0200)] info/userland 1.We receive from node DB111_MCC_FB1_SA1_ENERGIE value:17.275778
[2019-01-14 22:00:43.376 (UTC+0200)] info/userland 2.We receive from node DB1_HMI_ACREL[1].PEAKS value:55.599998
[2019-01-14 22:01:39.858 (UTC+0200)] info/userland 1.We receive from node DB111_MCC_FB1_SA1_ENERGIE value:17.275896
[2019-01-14 22:01:40.061 (UTC+0200)] info/userland 2.We receive from node DB1_HMI_ACREL[1].PEAKS value:55.599998
    
```

Figura 5. Aplicația Gateway recepționează valori valide de la un OPC UA Server extern

2.4. Studiu de caz 2

Studiul de caz 2 se focalizează pe corelarea datelor trimise, cu culorile și coordonatele unui semafor inteligent, structurând mai concret mesajele distribuite și automatizând procesul de comunicare păstrând paradigma OPC UA Client-Server și adoptând paradigma Notify-Subscribe specifică VSOME/IP.

Mecanismul browse request – browse response (UA_BrowseRequest and UA_BrowseResponse) facilitează filtrarea informației din diferite noduri, în funcție de tipul nodului și de structura datelor. Această abilitate permite viitoarelor arhitecturi de servere OPC UA complexe să stocheze volume mari de date fără a exista pericolul amestecării informațiilor, oferind un grad ridicat de flexibilitate. În ciuda acestui fapt, mecanismul Publish-Subscribe reprezintă o soluție superioară atât din punct de vedere al filtrării datelor cât și al integrării în cazuri de utilizare cu cerințe restrictive de timp real.

2.5. Studiu de caz 3

Al treilea studiu de caz implementat pentru actualul concept se focalizează pe scenariul de interacțiune între aplicația Gateway și trei servere OPC UA diferite, datele fiind accesate concomitent. Acest scenariu are scopul de a evidenția potențialul sistemului din punct de vedere al flexibilității și eficacității, oferind posibilitatea integrării într-o arhitectură mult mai amplă. Obiectivele ce aparțin de viteza de transmitere completă și acuratețea datelor livrate rămân valabile, utilizându-se aceleași

metode de testare și aceleași intervale de timp ca în studiul de caz anterior. Testarea a fost realizată cu succes atât în cadrul unei singure rețele, cât și în cadrul poziționării dispozitivelor în rețele diferite. performanțele obținute sunt identice cu cele anterioare confirmând implementarea robustă a tuturor entităților implicate, cât și a arhitecturii definite.

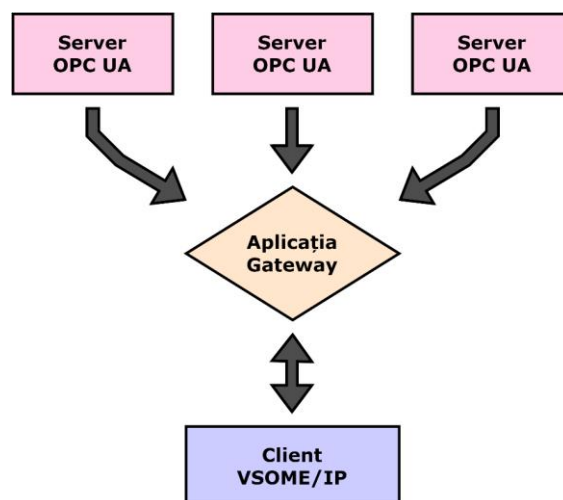


Figura 6. Aplicația Gateway accesând trei OPC UA Servere

2.6. Studiu de caz 4

Implementarea studiului de caz 4 se bazează pe adoptarea paradigmei OPC UA Publish-Subscribe împreună cu paradigma similară VSOME/IP Notify-Subscribe, infrastructura inteligentă (în cazul de față semaforul) fiind reprezentată de un element de tipul OPC UA Publisher. Acest Publisher comunică cu aplicația Gateway prin-un subcomponent complementar de tip OPC UA Subscriber, respectând structura aplicației bazată pe două subcomponente. Odată cu trecerea la paradigme orientate către distribuirea de date în mod automat la recurențe de timp configurabile, sistemul evoluează semnificativ spre îndeplinirea necesităților de funcționare în timp real, la nivel de aplicație. Integrarea celor două paradigme se face mai ușor decât în studiile de caz 2 și 3, nefiind nevoie de o entitate adițională pentru adaptarea la momentul potrivit a valorilor stocate de furnizor.

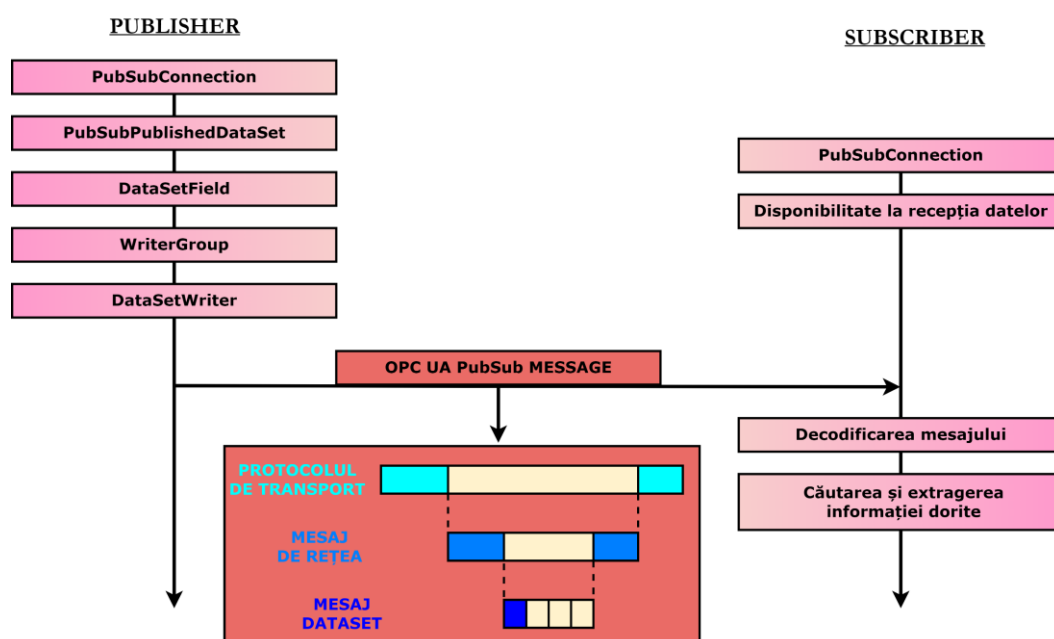


Figura 7. Secvența configurării mecanismului OPC UA Publish-Subscribe

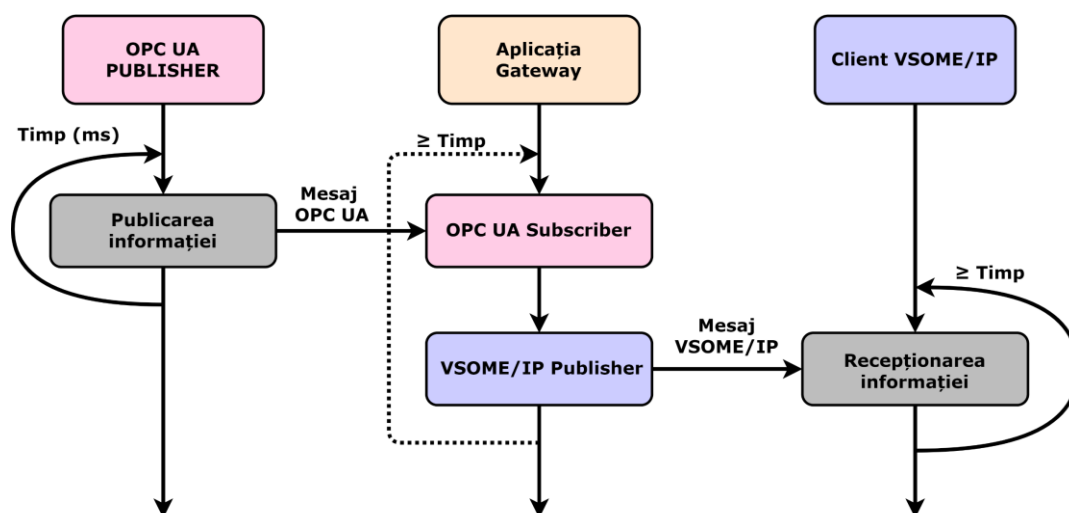


Figura 8. Dependența între subcomponentele aplicației Gateway, OPC UA și VSOME/IP în contextul Publish-Subscribe în timp real

3. ÎMBUNĂTĂȚIREA MECANISMULUI OPC UA PUBLISH-SUBSCRIBE ÎN CONTEXTUL EFICIENTIZĂRII COMUNICAȚIEI ÎN TIMP REAL

Obiectivele etapei actuale de cercetare sunt următoarele:

- Furnizarea unei analize a interfațării OPC UA utilizând paradigma Publish-Subscribe, în ceea ce privește constrângerile în timp real și distribuția rolurilor între entități, luând în considerare starea actuală a dezvoltărilor și a strategiilor de interfațare bine fundamentate din sectorul automotive;
- Conceperea și implementarea unei soluții ce vizează mecanismul OPC UA Publish-Subscribe prin UDP, axată pe un algoritm de sincronizare și pe o aplicație broker multithreading care să faciliteze reacții în timp real și o eficiență mai mare, pentru a extinde QoS și aplicabilitatea mecanismului de interfațare. Soluția prevede reducerea magnitudinii cuplării slabe între Subscriber și Publisher, a dificultății de a trimite volume mai mari de date pentru diverși abonați la viteze mari, minimalizând sarcina aplicată rețelei și serviciilor în ceea ce privește interogarea și filtrarea. Disponibilitatea și siguranța trebuie să ghideze această abordare, întrucât soluția trebuie să gestioneze apariția defectelor, concentrându-se pe detectare, toleranța și recuperare.

3.1. Mecanismul Publish-Subscribe: Design și Arhitectură

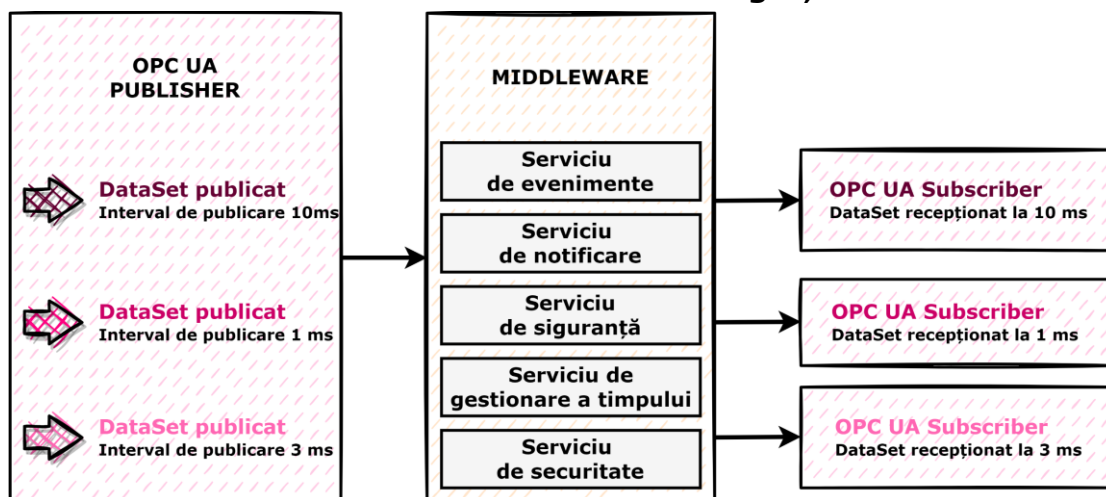


Figura 9. Propunerea de design și servicii, aferente unui component Middleware, în cazul unui scenariu de funcționare în timp real

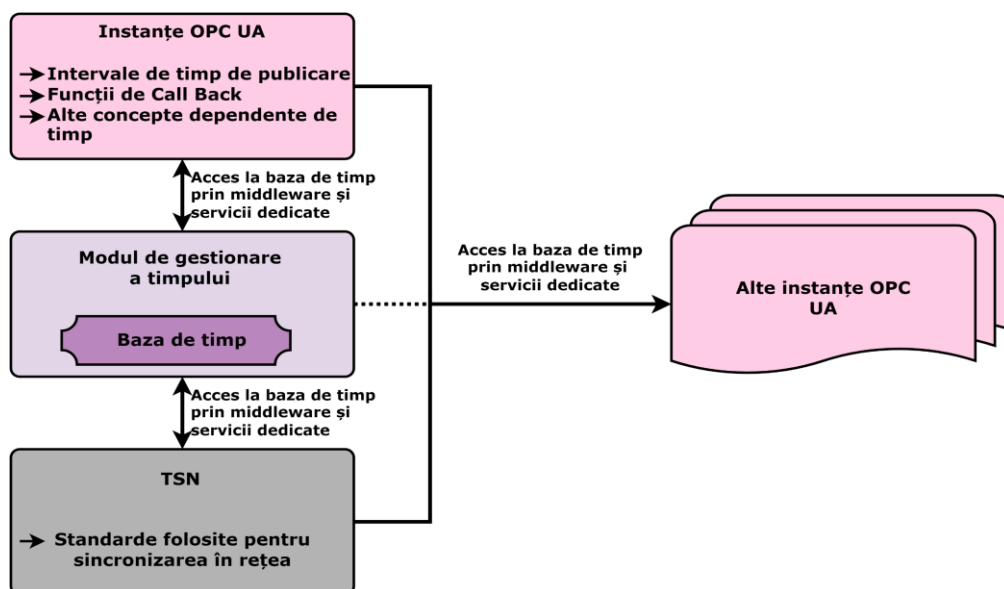


Figura 10. Propunere de design în care toate entitățile se bazează pe o bază temporală comună

3.2. Arhitectura Sistemului

Scopul aplicației de tip broker este de a asigura interfațarea între Publisher și Subscriberi într-un mod eficient, menținând implementarea aproape de specificații. Având mai multe entități prezente, abordarea studiului de caz presupune ca fiecare entitate să ruleze pe un dispozitiv separat, cu sistem de operare bazat pe Linux, după cum se vede în Figura 11.

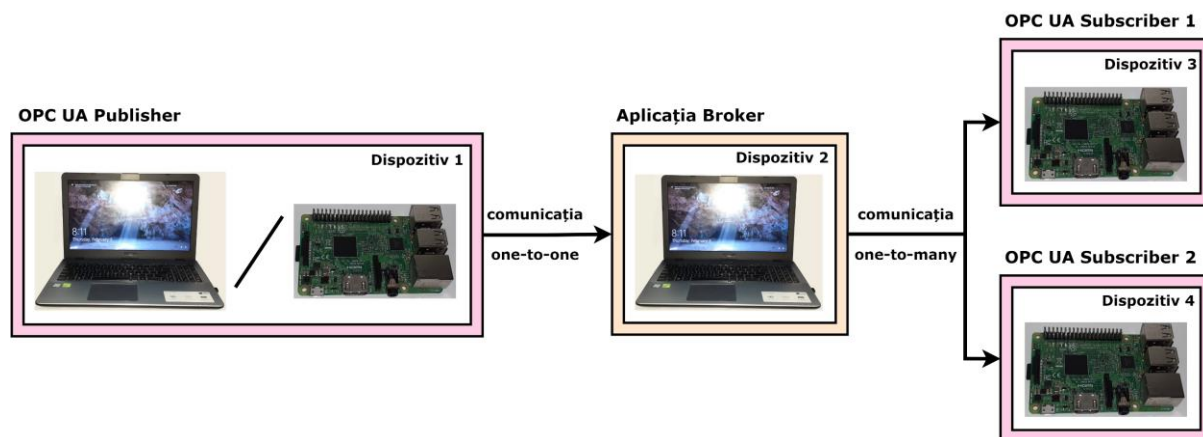


Figura 11. Arhitectura sistemului

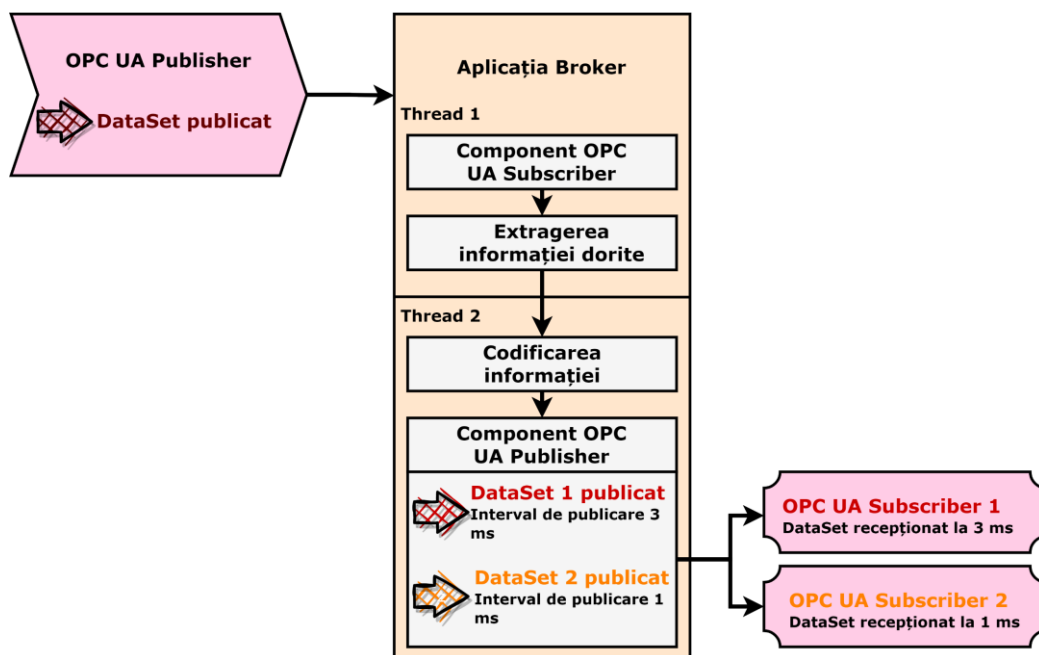


Figura 12. Arhitectura internă și Interacțiunea aplicației Broker

Cu aplicația Broker în funcțiune și cu receptorii care așteaptă mesaje corecte la momentul de timp potrivit, pentru cazul ideal de funcționare, toate configurațiile sunt corecte. Cu toate acestea, există scenarii în care doar configurarea corectă a detaliilor de sincronizare atât pentru Broker, cât și pentru receptori, nu este suficientă pentru a realiza sincronizarea în timp real între entități care nu au o bază temporală comună și nu fac schimb constant de referințe temporale prin intermediul unui mecanism de notificare. În aceste cazuri, provocarea constă în sincronizarea dinamică a entităților separate, știind intervalele aproximative ale operațiunilor de transmisie și recepție.

Algoritmul de sincronizare implementat se dovedește a fi eficient, iar testarea implementării a confirmat faptul că, comportamentul vizat este prezent atât la aplicația Broker cât și la cele două entități Subscriber.

3.3. Rezultate și Revendicări

În urma fazei de implementare, se pot observa o serie de rezultate și revendicări concrete. Implementarea aplicației Broker alături de entități de tip Publisher și Subscriber, a fost realizată cu succes, dovedind că acest concept poate fi funcțional. Au fost atinse obiectivele majore din punct de vedere arhitectural, oferind avantaje concrete pentru comunicație OPC UA.

Tabel 1: Analiza rezultatelor studiului de caz

Entitate	Avantaje	Dezavantaje	Realizări
OPC UA Publisher	- dificultate moderată în implementare - configurație ușoară pentru toate entitățile Subscriber ce au necesități diferite - decuplaj total față de receptori	o modalitate ușoară de a trimite cantități mari de date pentru mai multe entități Subscriber cu necesități diferite	

Broker App	- capabilități multithreading - capabilități de funcționare în timp real	- complexitate mare în implementare - este necesar un prim pas pentru obținerea cerințelor și ID-urile de la entitățile Subscriber (în implementarea actuală, informația este hard-codată)	- comportament în timp real și sincronizare cu entitățile Subscriber - Stocare de date (data buffering) - rol de furnizor de rezervă - capabilități de siguranță în cazul opririi furnizorului
OPC UA Subscribers	- dificultate mică/moderată în implementare - decuplaj total față de furnizorul de date - capabilități de sincronizare bazate pe algoritmul de sincronizare descris	este necesar un prim pas pentru transmiterea cerințelor și ID-urile (în implementarea actuală, informația este hard-codată)	- comportament în timp real și sincronizare cu aplicația Broker - se evită procesul de interogare a rețelei - se evită filtrarea în scopul identificării mesajelor de interes

4. ABORDAREA MECANISMULUI OPC UA PUBLISH-SUBSCRIBE ÎN CONTEXTUL TRANSMITERII DE IMAGINI

Protocolul Open Platform Communication Unified Architecture (OPC UA) este un facilitator cheie pentru Industry 4.0 și al Internetului industrial al lucrurilor (IIoT). OPC UA este deja validat de către industrie și se așteaptă ca prezența sa să ajungă în tot mai multe domenii, aplicații și niveluri ierarhice. Studiul actual își propune să ia în considerare volume de date mai mari, să abordeze comunicarea bazată pe protocolul de transport UDP (User Datagram Protocol) utilizând mai multe canale și să analizeze robustețea mecanismului dezvoltat în contextul transmiterii de date pe termen lung. În consecință, etapa de cercetare curentă propune extinderea aplicabilității OPC UA în contextul transmiterii de imagini. Conceptul și dezvoltările actuale sunt aplicate luând în considerare atât procesul de fabricație industrială la sfârșitul liniei de producție în sectorul automotive, cât și comunicarea între autovehicule și infrastructură. Fără constrângeri hardware speciale, rezultatele obținute se dovedesc a fi apreciable, deschizând diverse perspective de viitor pentru transmiterea de imagini cu ajutorul OPC UA.

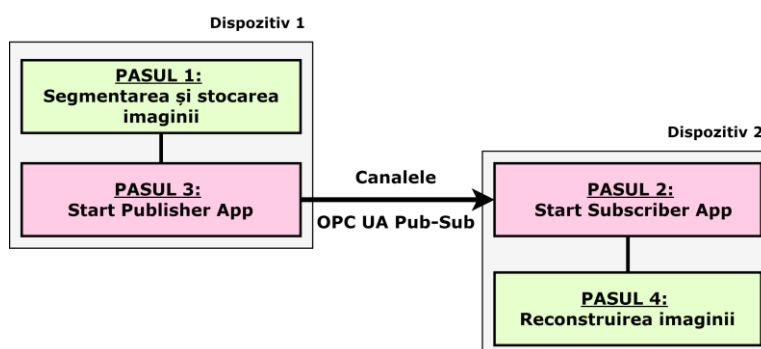


Figura 13. Etapele pentru transmisia de imagini prin mecanismul OPC UA Publish-Subscribe

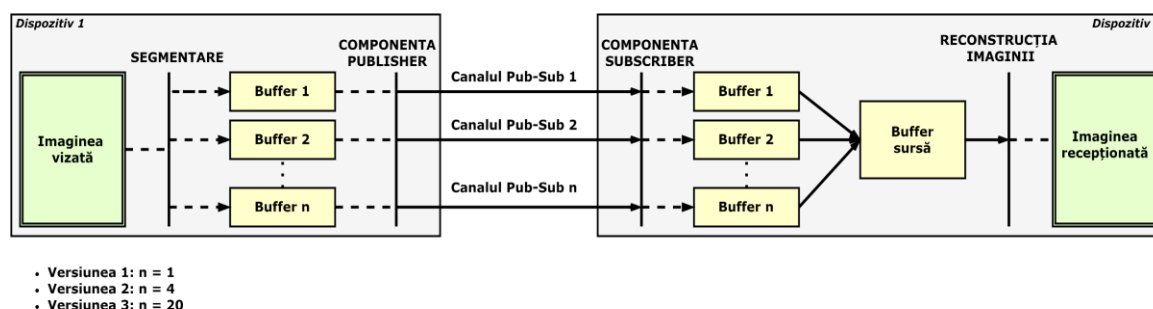


Figura 14. Arhitectura generală a sistemului

Mecanismul OPC UA Publish-Subscribe poate produce aplicații complexe cu capacități de funcționare în timp real și poate extinde utilizarea actuală a protocolului către alte funcționalități sau alte domenii. Pe baza unor căutări amănunțite, autorul nu a identificat alte studii privind transmiterea de imagini prin OPC UA, acesta fiind deocamdată singurul studiu ce pune în context comun tehnologia OPC UA și transmiterea de imagini. Pe baza popularității protocolului în industrie și a evoluției tehnologiilor și mecanismelor integrate, aceste implementări cu obiective concrete, îndeplinite, pot rezolva sau îmbunătăți scenariile actuale și pot reprezenta un pas înainte către interconectivitate în contextul IIoT.

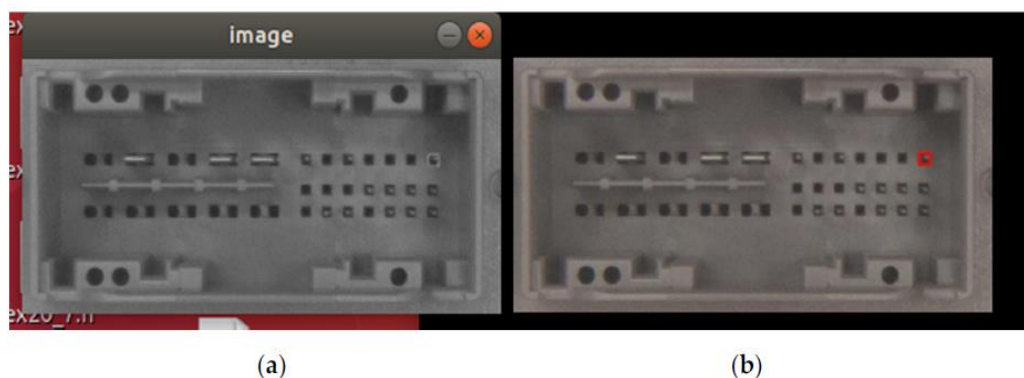


Figura 15. Utilizarea mecanismului OPC UA Publish-Subscribe pe 20 de canale, pentru transmiterea imaginilor pe baza procesului AOI asupra componentelor ECU: (a) Imaginea recepționată și (b) Imaginea originală.

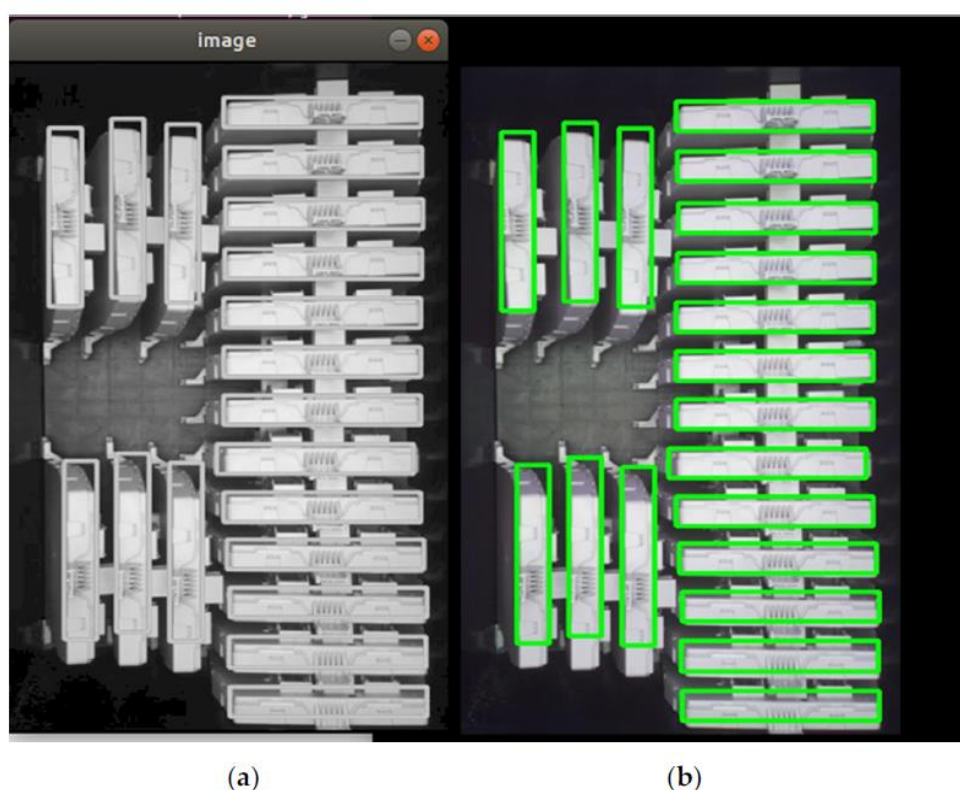


Figura 16. Utilizarea mecanismului OPC UA Publish-Subscribe pe 20 de canale, pentru transmiterea imaginilor cu ambalarea cutiilor la sfârșitul liniei de producție: (a) Imaginea recepționată și (b) Imaginea originală

Odată cu transmiterea cu succes, a imaginilor prin mecanismul OPC UA Publish-Subscribe, aplicabilitatea protocolului OPC UA se extinde către noi funcționalități și confirmă fezabilitatea ridicată a paradigmei Publish-Subscribe pentru viitoare dezvoltări, oferind posibilitatea de a satisface cerințele industriale. Performanțele actuale și comportamentul în timp real pot fi îmbunătățite în contextul tehnologiei TSN. Acest concept oferă modalități de implementare pentru aplicații cu capacități mari de schimb de date, la viteze mari, între diferite dispozitive, prin Ethernet, asigurând astfel obiectivele indispensabile în contextul IIoT și Industry 4.0.

5. COEXISTENȚA PROTOCOALELOR DDS ȘI OPC UA ÎN CONTEXTUL INDUSTRY 4.0 ȘI A COMUNICAȚIEI ÎN TIMP REAL

Continuând evoluția către Industry 4.0, protocoalele de comunicare industrială reprezintă un subiect de interes major, deoarece schimbul de date în timp real între mai multe dispozitive constituie pilonul scenariilor IIoT (Industrial Internet of Things). Deși protocoalele tradiționale sunt încă persistente în industrie, tranziția a fost inițiată de protocolul cheie de facilitare a conceptului Industry 4.0, Open Platform Communication Unified Architecture (OPC UA). OPC UA trebuie să atingă nivelul preconizat de aplicabilitate și, prin urmare, trebuie să ia în considerare coexistența cu alte aplicații emergente orientate spre funcționarea în timp real în liniile de producție. Protocolul DDS (Data Distribution Service) va fi cu siguranță prezent în viitoarele arhitecturi din anumite sectoare ca cel al roboților industriali, co-boților și al unităților compacte. Se propune o soluție de evaluare a coexistenței și funcționării în timp real în cazul protocoalelor OPC UA și DDS, atât în paralel cât și într-un context ce implică o aplicație gateway. Scopul acestui studiu este de a demonstra fezabilitatea și compatibilitatea între cele două protocoale, împreună de o definire generală a criteriilor de evaluare și a așteptărilor, din punct de vedere arhitectural. Se identifică astfel avantaje și dezavantaje în cazul utilizării protocoalelor în context comun, conturând o viziune cuprinzătoare asupra posibilităților și soluțiilor disponibile la ora actuală. Arhitectura definită pentru actualul studiu, este menită să corespundă atât cu scenarii de comparație a performanțelor, cât și cu scenarii de interacțiune, prin intermediul unei aplicații de tip gateway. Având în vedere tendințele industriale, soluția dezvoltată este aplicată folosind infrastructuri non-ideale, pentru a oferi autenticitate și aplicabilitate rapidă în liniile de producție.

Considerând situația actuală, această etapă de cercetare propune următoarele obiective:

- Definirea unor criterii specifice, ce permit examinarea protocoalelor DDS și OPC UA într-un sistem imperfect, astfel luând în considerare multe provocări prezente în industrie.
- Analizarea comportamentului în timp real pentru DDS și OPC UA, implementând toate mecanismele necesare pentru acest proces.
- Definirea unei arhitecturi adecvate pentru utilizarea DDS și OPC UA în paralel, oferind însă și opțiunea de interacțiune între cele două protocoale de comunicare.
- Implementarea unei aplicații de tip gateway DDS-OPC UA.

5.1. Arhitectura Sistemului

Arhitectura definită a fost concepută pentru a respecta atât scenariile de comparare a performanțelor, cât și scenariile de interacțiune prin intermediul unei aplicații gateway, cu scopul de a demonstra compatibilitatea și fezabilitatea dintre DDS și OPC UA și de a oferi o definire generală a criteriilor și așteptărilor din punct de vedere arhitectural.

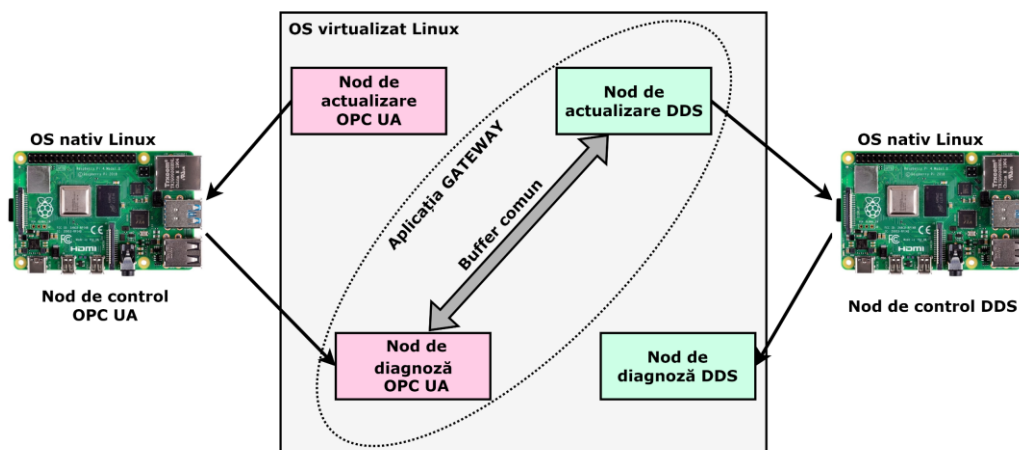


Figura 17. Arhitectura Sistemului

Dezvoltarea de aplicații de comunicare ce implică dispozitive multiple, trebuie să asigure o eficiență sporită și o bună gestionare a resurselor pe toate dispozitivele. În studiul de caz actual, pentru ambele protocoale a fost utilizată paradigma Publish-Subscribe, vizând un comportament în timp real la nivelul aplicației, pentru toate nodurile.

Prezenta lucrare se focalizează pe două studii de caz. Primul vizează observații asupra modului în care fiecare protocol de comunicare reacționează în funcție de sistemul de operare pentru operațiile executate la diferite recurențe temporale. Se analizează cât de eficient se comportă tehnologiile atunci când rulează pe sisteme de operare nespecializate (de uz general), fără mecanisme dedicate funcționării în timp real, utilizându-se, de asemenea, o rețea ce nu oferă garanții de timp pentru transmiterea pachetelor. Al doilea studiu de caz propune o soluție gateway pentru scenarii în care interacțiunea între cele două protocoale este necesară. Comutarea între cele două cazuri de utilizare poate fi realizată cu efort minim la faza de configurare și fără modificări arhitecturale.

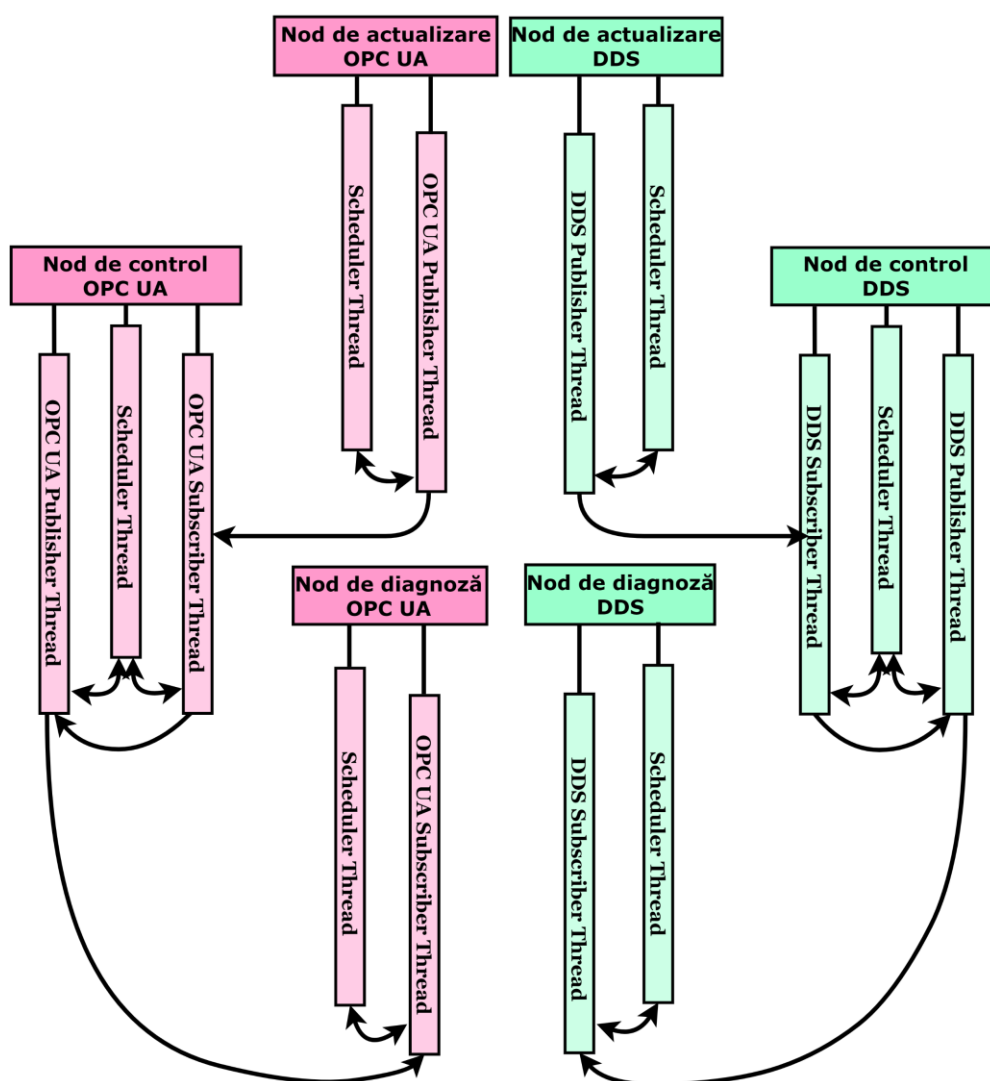


Figura 18. Nodurile multithreading din perspectiva arhitecturală

5.2. Rezultatele Studiului de caz 1

Rezultatele procesului de verificare a apelurilor de funcții, pot fi observate în tabelele 2-5 pentru DDS și în tabelele 6-9 pentru OPC UA, conform primului criteriu al studiului de caz. Tabelele prezintă ratele de succes pentru fiecare recurență de timp.

Tabel 2. Nod de actualizare DDS – OS Virtualizat Linux – Operațiune de Publicare.

Operațiune de Publicare – Verificarea Execuțiilor Recurente			
10 ms	5ms	2ms	1ms
≈100%	≈90%	≈74%	≈64%
Număr TOTAL de teste: 2790			

Tabel 3. Nod de control DDS – OS Nativ Linux – Operațiune de Publicare.

Operațiune de Publicare – Verificarea Execuțiilor Recurente			
10 ms	5ms	2ms	1ms
≈100%	≈93%	≈84.6%	≈77%
Număr TOTAL de teste: 2865			

Tabel 4. Nod de control DDS – OS Nativ Linux – Operațiune de Recepție.

Operațiune de Recepție – Verificarea Execuțiilor Recurente			
10 ms	5ms	2ms	1ms
≈100%	≈85%	≈65%	≈48.5%
Număr TOTAL de teste: 2805			

Tabel 5. Nod de diagnoză DDS – OS Virtualizat Linux – Operațiune de Recepție.

Operațiune de Recepție – Verificarea Execuțiilor Recurente			
10 ms	5ms	2ms	1ms
≈100%	≈85%	≈65%	≈47%
Număr TOTAL de teste: 3015			

Tabel 6. Nod de actualizare OPC UA – OS Virtualizat Linux – Operațiune de Publicare.

Operațiune de Publicare – Verificarea Execuțiilor Recurente			
10 ms	5ms	2ms	1ms
≈100%	≈95%	≈81.2%	≈56%
Număr TOTAL de teste: 2685			

Tabel 7. Nod de control OPC UA – OS Nativ Linux – Operațiune de Publicare.

Operațiune de Publicare – Verificarea Execuțiilor Recurente			
10 ms	5ms	2ms	1ms
≈100%	≈100%	≈87%	≈56%
Număr TOTAL de teste: 2970			

Tabel 8. Nod de control OPC UA – OS Nativ Linux – Operațiune de Recepție.

Operațiune de Recepție – Verificarea Execuțiilor Recurente			
10 ms	5ms	2ms	1ms
≈100%	≈100%	≈91%	≈85%
Număr TOTAL de teste: 3015			

Tabel 9. Nod de diagnoză OPC UA – OS Virtualizat Linux – Operațiune de Recepție.

Operațiune de Recepție – Verificarea Execuțiilor Recurente			
10 ms	5ms	2ms	1ms
≈100%	≈87.5%	≈77%	≈64%
Număr TOTAL de teste: 3015			

Cel de-al doilea criteriu al studiului de caz 1 se axează pe mecanismul de data-buffering, utilizat pentru a evidenția modul în care sistemul de operare și desincronizarea dispozitivului influențează datele recepționate. Pe baza acestui mecanism de stocare a datelor, se generează rezultate statistice la diferite intervale de timp. Rezultatele pot fi observate în Figura 19.

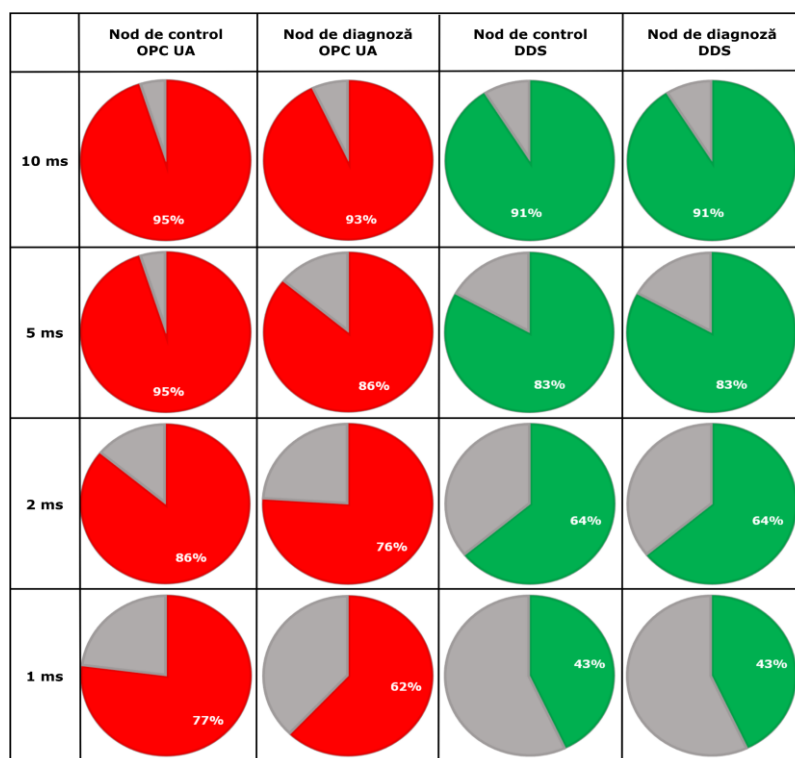


Figura 19. Rezultate procentuale bazate pe rata de succes a mecanismului data-buffering

Rezultatele mecanismului data-buffering la nivelul entităților Subscriber, confirmă rezultatele procesului de verificare a apelurilor de funcții. Cifrele sunt proporționale pentru ambele criterii, cu valori procentuale mai mici, conform așteptărilor, pentru procesul de stocare a datelor, validând astfel impactul suplimentar pe care stabilitatea rețelei îl are asupra procedurilor, față de impactul deja existent generat de limitările funcționării în timp real ale sistemului de operare. Deși la intervale mai mici de 5 milisecunde, diferențele dintre protocoale par să se accentueze ușor, există încă incertitudini cu privire la cât de mult pot fi afectate interacțiunea și schimbul de date dintre protocoale, iar în acest caz, un scenariu de tip gateway este de mare interes.

5.3. Rezultatele Studiului de caz 2

Pentru studiul de caz 2, obiectivul principal a fost implementarea unei aplicații gateway în cadrul arhitecturii actuale, oferind posibilitatea de a confirma fezabilitatea DDS și OPC UA în scenariile IIoT ce implică o gamă largă de echipamente. Existența unei aplicații de tip gateway pentru operațiunile de control și schimb de date între domenii separate, prin intermediul tehnologiilor Ethernet, confirmă capacitățile înalte ale celor două protocoale de comunicație și extinde posibilitățile de realizare a unor progrese viitoare. Impactul protocoalelor Ethernet în cazurile de utilizare în timp real este dificil de estimat. Chiar dacă există numeroase soluții disponibile și conforme cu cerințele de funcționare în timp real, interpretarea generală nu trebuie să se concentreze pe rapiditatea cu care un protocol de comunicație este capabil să livreze date, ci mai degrabă pe cât de stabilă este livrarea, la ce intervale de timp poate eșua schimbul de date și care sunt factorii care pot influența performanța protocolului ales. Dezvoltarea actuală sugerează o exemplificare detaliată a modului în care impactul descris mai sus poate fi observat și înțeles, chiar și în scenarii în care datele sunt livrate la recurențe rapide.

Două tipuri de mesaje sunt trimise alternativ către aplicația gateway, care acționează ca Subscriber OPC UA pentru nodul de control OPC UA și ca Publisher DDS pentru nodul de control DDS. Odată ce mesajul este recepționat de nodul de control DDS, se generează un semnal digital în funcție de tipul mesajului primit (corespunzător stărilor high sau low), simulând controlul unui actuator ce necesită impulsuri recurente rapide. Semnalul digital generat este monitorizat cu ajutorul unui osciloscop. Astfel, pentru fiecare interval de timp stabilit pentru schimbul de date între noduri, semnalul este măsurat, oferind posibilitatea de a confirma durata și frecvența pulsurilor, ceea ce

Înseamnă că întreaga propagare a datelor prin arhitectură poate fi monitorizată. Desincronizările preconizate și problemele de stabilitate care pot apărea pentru intervalele sub 10 milisecunde, pot fi vizualizate cu ușurință, iar degradarea calitativă a semnalului generat poate fi observată în mod concret. Acest demers oferă o perspectivă sugestivă asupra necesității unor tehnologii suplimentare, capabile să garanteze sincronizarea între dispozitive și stabilitatea rețelei în cazurile de utilizare IIoT. Aplicația gateway facilitează propagarea datelor între mai multe noduri, dispozitive, protocoale și sisteme de operare distincte, fără a fi nevoie de o configurație diferită pentru software-ul deja implementat. Soluția confirmă faptul că atât OPC UA, cât și DDS sunt compatibile și fezabile pentru astfel de scenarii, chiar și în sisteme neideale. Acest tip de experiment sporește potențialul tehnologiilor, către aplicații mai complexe și scalabile, pentru mai multe domenii industriale.



Figura 20. Semnalul digital generat pe baza mesajelor specifice livrate de Aplicația Gateway la o recurență de 10 ms



Figura 21. Semnalul digital generat pe baza mesajelor specifice livrate de Aplicația Gateway la o recurență de 5 ms



Figura 22. Semnalul digital generat pe baza mesajelor specifice livrate de Aplicația Gateway la o recurență de 2 ms



Figura 23. Semnalul digital generat pe baza mesajelor specifice livrate de Aplicația Gateway la o recurență de 1 ms

Cu arhitectura și conceptul propus, respectiv cu studiile de caz, implementate în mod performant, și pe baza rezultatelor obținute, au fost atinse următoarele obiective ale studiului actual:

- Cele două criterii definite pentru examinarea comportamentului DDS și OPC UA au furnizat o perspectivă complexă față de capacitățile protocoalelor selectate, într-un sistem care ia în considerare provocările actuale specifice comunicării între mai multe dispozitive prin intermediul Ethernet. Potențialul criteriilor actuale se poate extinde la dezvoltări viitoare care abordează etape specifice de îmbunătățire sau poate fi adaptat la mai multe sisteme și tehnologii specifice cu obiective similare;
- Mecanismul implementat și folosit pentru a analiza comportamentul în timp real al DDS și OPC UA a confirmat un nivel ridicat de eficiență, iar rezultatele cuantificabile obținute extind percepția actuală cu privire la tehnologiile vizate către noi domenii, industriale cât și de cercetare;
- Arhitectura definită s-a dovedit a fi fiabilă atât pentru utilizarea comună, cât și paralelă a protocoalelor, oferind nivelul dorit de flexibilitate și scalabilitate. Diversitatea factorilor industriali care defavorizează răspunsurile ideale din partea DDS și OPC UA adaugă autenticitate experimentului și permite adoptarea unor considerente arhitecturale similare pentru o gamă largă de aplicații;
- Dezvoltarea aplicației de tip gateway OPC UA - DDS extinde aplicabilitatea protocoalelor către scenarii între domenii industriale diferite, reconfirmă fezabilitatea și calitatea ridicată a serviciilor pentru ambele tehnologii și, în contextul actual, oferă un punct de vedere practic în ceea ce privește conformitatea cu cerințele de funcționare în timp real.

6. TEHNOLOGII IOT ȘI AUTOMOTIVE DE COMUNICAȚIE, APLICATE ÎNTR-UN CONTEXT V2X PRIN INTERMEDIUL UNUI GATEWAY MULTI-PROTOCOL

Abordarea arhitecturală pentru sistemele complexe de comunicații trebuie să se adapteze rapid și să ia în considerare setul tot mai mare de cerințe pentru fiecare domeniu industrial. Domeniul automotive evoluează către era electrificării, cu transformări tehnologice masive ce se realizează la toate nivelurile arhitecturale, hardware și software. Tradițională utilizarea exclusiv a microcontrolerelor este transformată prin adoptarea de microprocesoare cu funcționalități extinse, iar astfel se remodelează structura de dezvoltare. Deși sunt disponibile noi capacități hardware, iar protocoalele de comunicare pe Ethernet pot contribui la o nouă gamă de cazuri de utilizare pentru comunicațiile din interiorul autovehiculului sau pentru comunicațiile între vehicule (V2X), implicațiile utilizării mai multor protocoale care acoperă diferite tipuri de cerințe, în aceeași arhitectură, nu sunt pe deplin identificate. Importanța stabilirii unor așteptări clare pentru sistemele de comunicații inteligente, luând în considerare diverși factori tehnologici și arhitecturali, este decisivă pentru îmbunătățirile viitoare. Actuala etapă de cercetare se axează pe examinarea compatibilității și a capacităților de reacție în timp real, într-o arhitectură diversificată orientată spre servicii, pentru principalele tehnologii de comunicare automotive IoT bazate pe Ethernet. Analiza de fezabilitate se materializează într-o soluție de tip gateway multi-protocol ce facilitează schimbul de date între entități cu origini tehnologice diferite. Fiind cel mai important middleware pentru scenariile de comunicare intra-vehicul, SOME/IP (Scalable Service-Oriented Middleware over IP) este protocolul relevant în domeniul automotive. Odată cu adoptarea recentă în numeroase aplicații industriale și având conformitate cu standardele din domeniul automotive, DDS (Data Distribution Service) este utilizat ca tehnologie majoră, ce combină deja aplicabilitatea din domeniul automotive cu cea din sectorul IoT. ECAL (enhanced Communication Abstraction Layer) se adaugă la acest ansamblu ca o soluție alternativă pentru viitoarele scenarii de comunicare. Luând în considerare tendințele industriale, abordarea inovatoare de a combina diferite tehnologii de comunicare, pentru a satisface cerințe și cazuri de utilizare multiple, va extinde nivelul de aplicabilitate către sisteme mai complexe și mai performante.

În contextul menționat mai sus, studiul actual are următoarele obiective:

- Analiza compatibilității tehnologiilor de comunicare selectate, combinând strategii și viziuni cu potențial ridicat și evidențiind avantaje și dezavantaje din perspective multiple, oferind o mai bună înțelegere a modului în care fiecare protocol poate fi utilizat în contextul potrivit;
- Definirea unei arhitecturi adecvate, aliniată la cele mai recente principii arhitecturale Adaptive, care să includă elementele necesare pentru o aplicabilitate sporită în domeniul automotive și IIoT, și care să abordeze provocările specifice tehnologiilor Ethernet;
- Conceperea și dezvoltarea unei soluții configurabile de tip gateway multi-protocol, care poate interfața entități SOME/IP, DDS, eCAL complet separate, extinzând aplicabilitatea către concepte V2X și interacțiuni între structuri de comunicare specifice diferitelor domenii industriale;
- Explorarea capabilităților de funcționare în timp real, ale soluției de tip gateway multi-protocol, examinând impactul posibil al viitoarelor îmbunătățiri realizabile și stabilind un set clar de așteptări cu privire la cerințele industriale în evoluție

6.1. Aplicabilitate în domeniul automotive

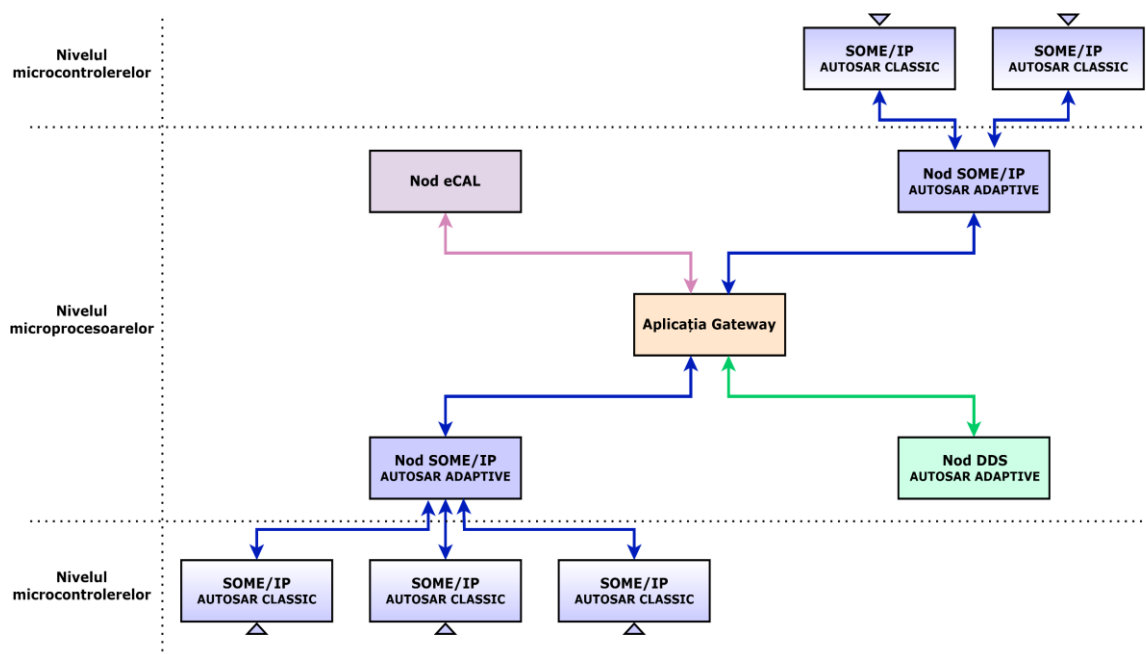


Figura 24. Prima perspectivă de aplicabilitate industrială pentru actualul concept gateway multi-protocol

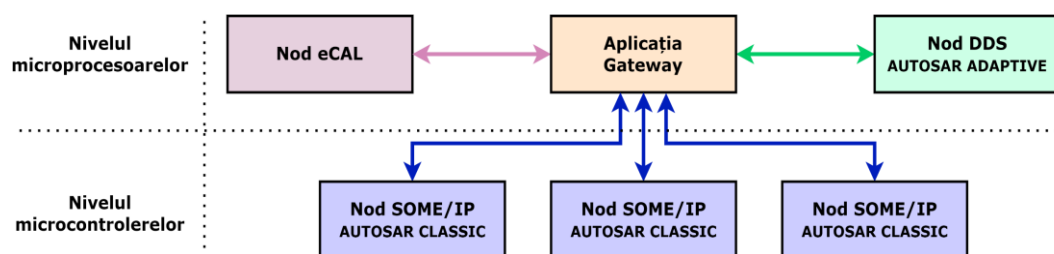


Figura 25. A doua perspectivă de aplicabilitate industrială pentru actualul concept gateway multi-protocol

6.2. Arhitectura Sistemului

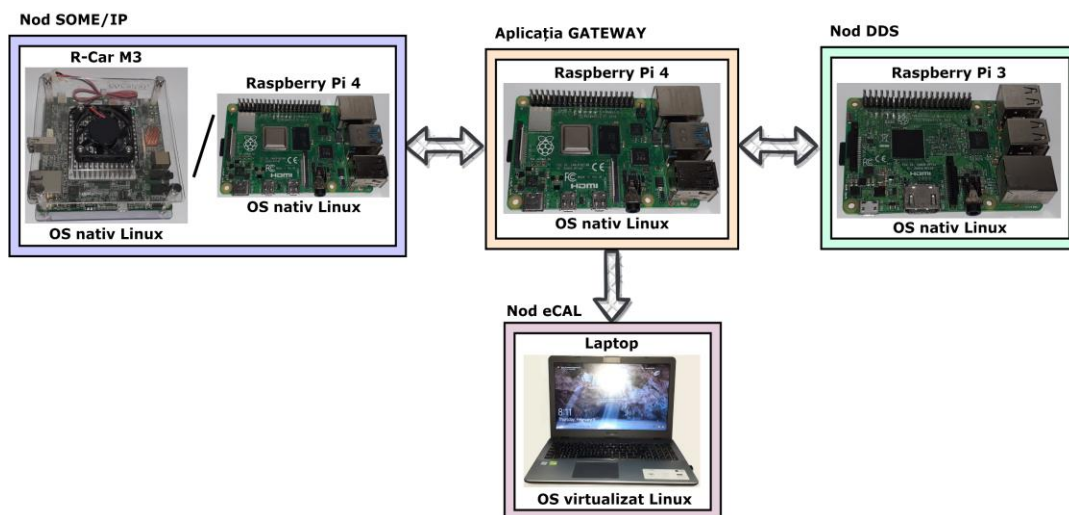


Figura 26. Arhitectura Hardware

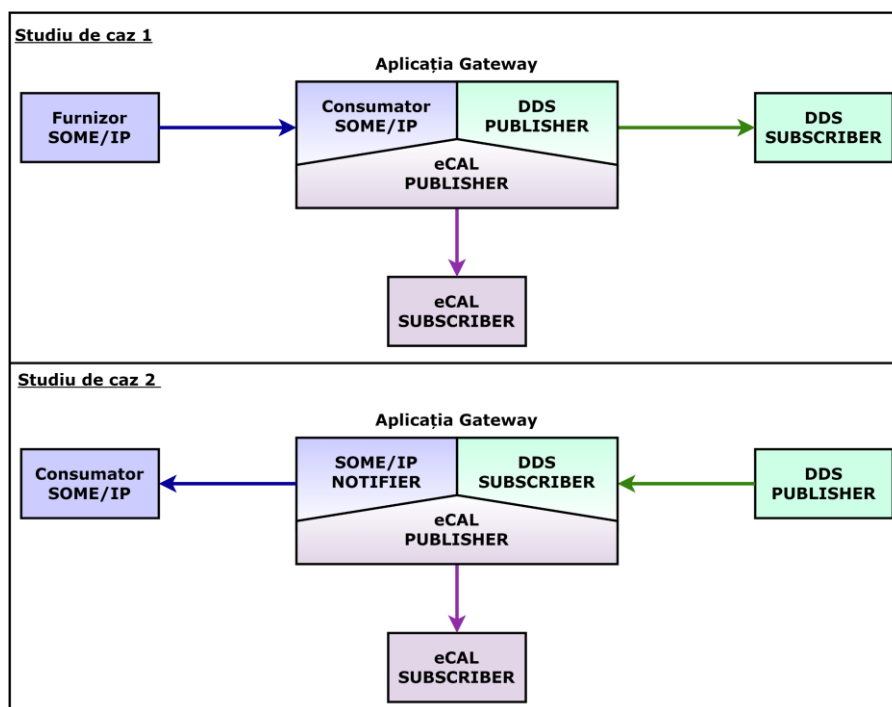


Figura 27. Arhitectura sistemului, fiind reprezentate ambele versiuni ale aplicației gateway

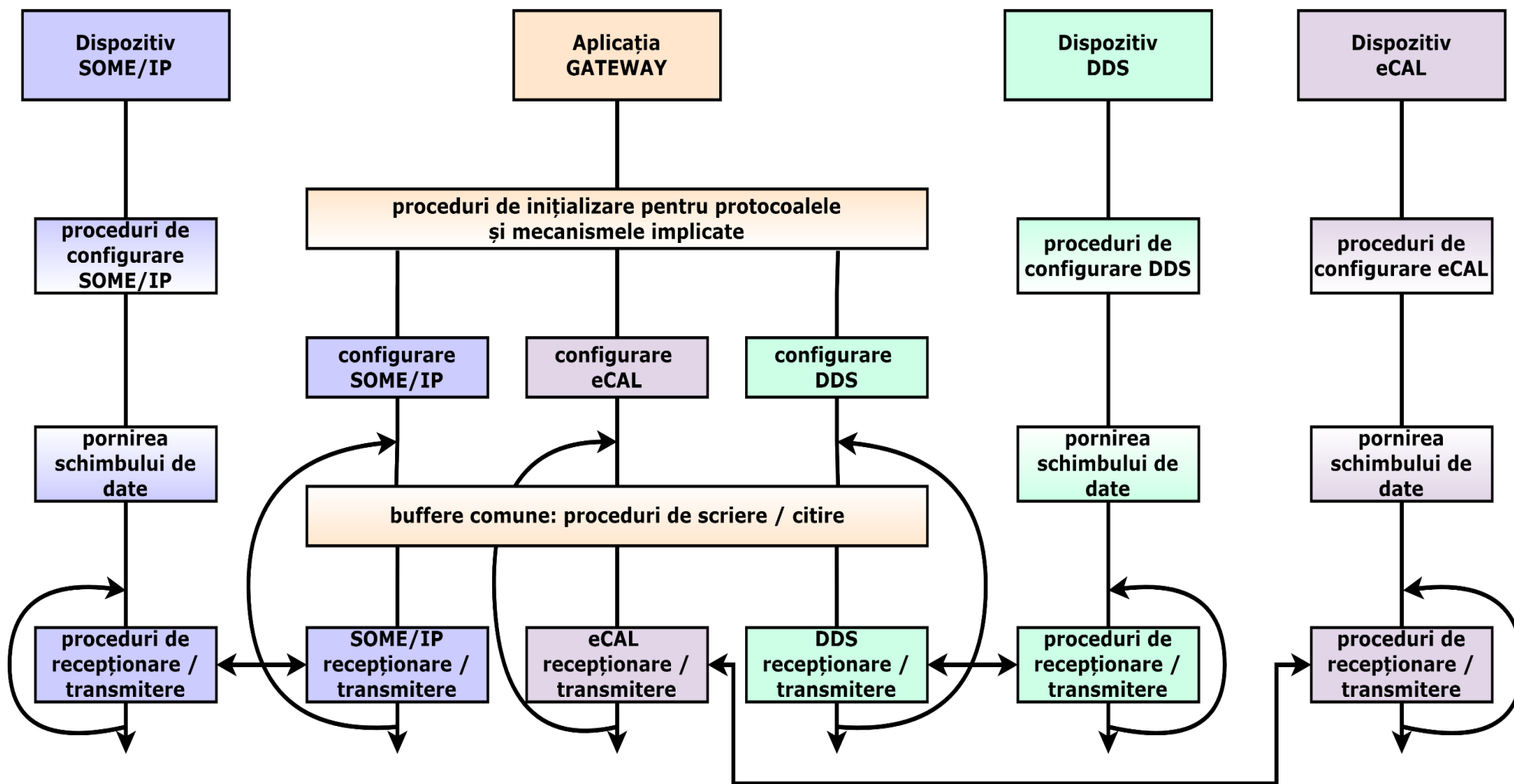


Figura 28. Secvența de proceduri pentru toate nodurile arhitecturii

Obiectivele studiilor de caz 1 și 2 care vizează fiabilitatea și eficiența conceptului sunt analizate prin conceperea și dezvoltarea unui mecanism de stocare a datelor (data buffering) și a unui mecanism de generare a semnalelor aferente evenimentului distribuit, de tip heartbeat. Fiecare mecanism implementat oferă rezultate clare în ceea ce privește comportamentul infrastructurii de comunicații, atunci când se iau în considerare cerințele de funcționare în timp real și impactul pe care rețeaua îl poate avea asupra livrării de mesaje la recurențe rapide. Capabilitatea de data buffering, este considerată o caracteristică importantă în sistemele de comunicații industriale IoT. Pentru scenariile actuale, acest procedeu de stocare a datelor este important pentru o mai bună înțelegere a obstacolelor ce pot apărea în arhitecturile complexe orientate pe servicii. Procesul de funcționare al mecanismului data buffering conceput, este detaliat din punct de vedere arhitectural în Figura 29.

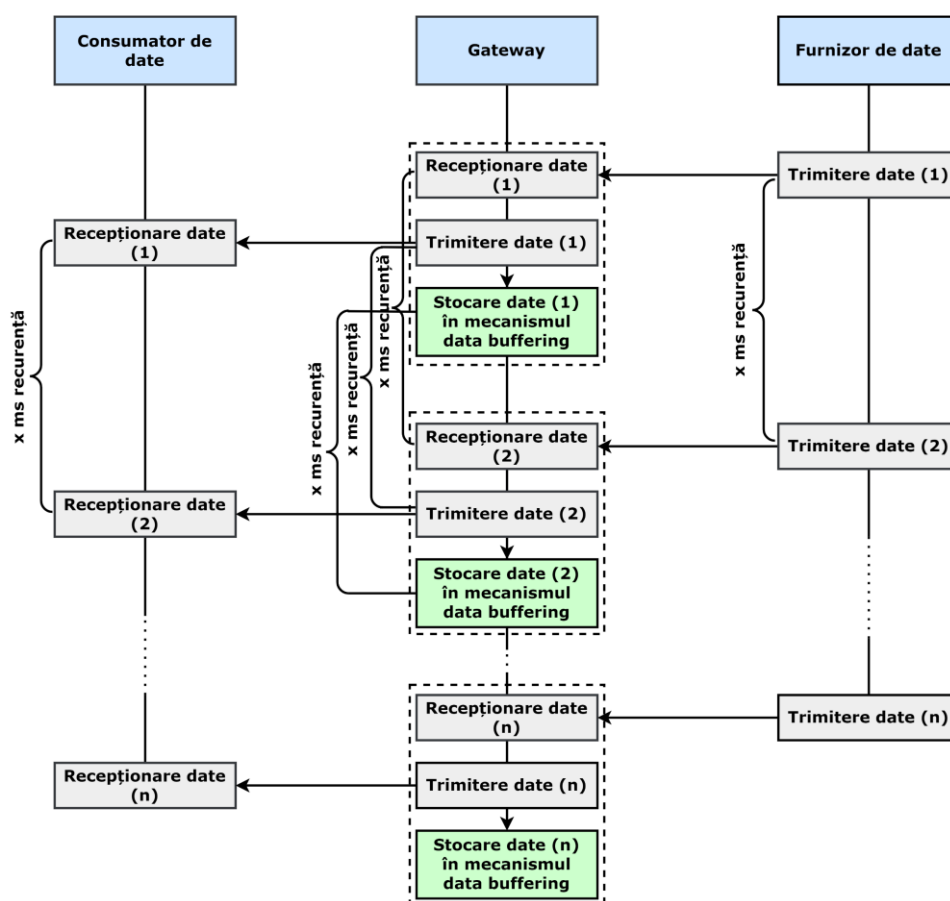


Figura 29. Secvența Data Buffering

6.3. Rezultate

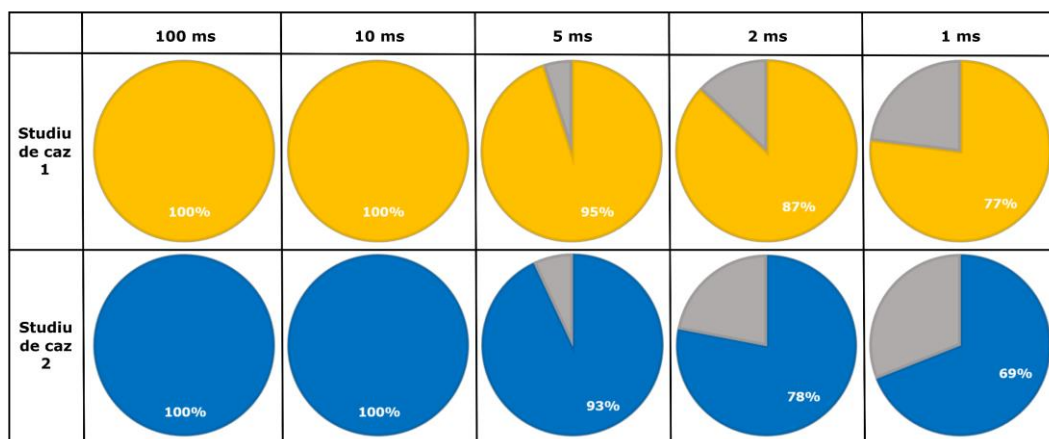


Figura 30. Rezultatele ratei de succes a mecanismului data buffering

Rezultatele obținute confirmă compatibilitatea conceptului cu versiuni diferite ale aplicației de gateway și cu roluri diferite atribuite nodurilor din cadrul arhitecturii. Subcomponenta data buffering și subcomponenta generatoare de semnal, au oferit o perspectivă clară asupra eficienței și fiabilității sistemului. Rezultatele se focalizează pe comportamentul infrastructurii de comunicare, ținând cont de cerințele de funcționare în timp real și de impactul pe care rețeaua îl poate avea asupra livrării mesajelor la recurențe rapide. Așa cum era de așteptat, eficiența procedurilor de recepție și de transmitere scade în cazul unor recurențe ridicate, o parte din mesaje fiind pierdute din cauza întârzierilor provocate de rețea. Intervalele de timp selectate pentru monitorizare au evidențiat regresul de la o transmisie aproape sigură a evenimentului, la cicluri de transmisie de 1 milisecundă, considerate o performanță rezonabilă pentru sistemul actual. Un alt factor care contribuie la transmisii mai puțin precise, este incapacitatea sistemelor de operare de uz general, de a gestiona operațiuni sub 10 milisecunde și de a asigura capabilitatea de reacție necesară pentru cerințele stricte de funcționare în timp real.

Atunci când se discută despre eficiența unui sistem de comunicații bazat pe Ethernet, în lipsa unor standarde și protocoale dedicate care să asigure că dispozitivele sunt sincronizate pe o bază de timp comună și că fiecare dintre ele poate furniza datele în conformitate cu cerințele stricte de funcționare în timp real, nu există garanții că transmisia va fi efectuată în mod constant în intervalul de timp dorit. Rezultatele curente dovedesc eficiența comunicării bazate pe Ethernet, între mai multe dispozitive de teren, evidențiază limitele unui sistem complex și validează compatibilitatea protocoalelor și a arhitecturii, prin aplicarea principiilor industriale din domeniile automotive și IoT. Interacțiunea dintre diverse tehnologii și arhitecturi, deja consacrate în sectoare industriale diferite, va fi inevitabilă, ceea ce înseamnă că multe provocări vor deriva din cauze de compatibilitate și eficiență. Identificarea protocoalelor de comunicare și arhitecturilor adecvate, împreună cu limitările și direcțiile de îmbunătățire în vederea extinderii aplicabilității conceptelor industriale actuale, va produce aplicații fiabile și scalabile pentru viitoarele cazuri de utilizare ce vizează interoperabilitatea industrială.

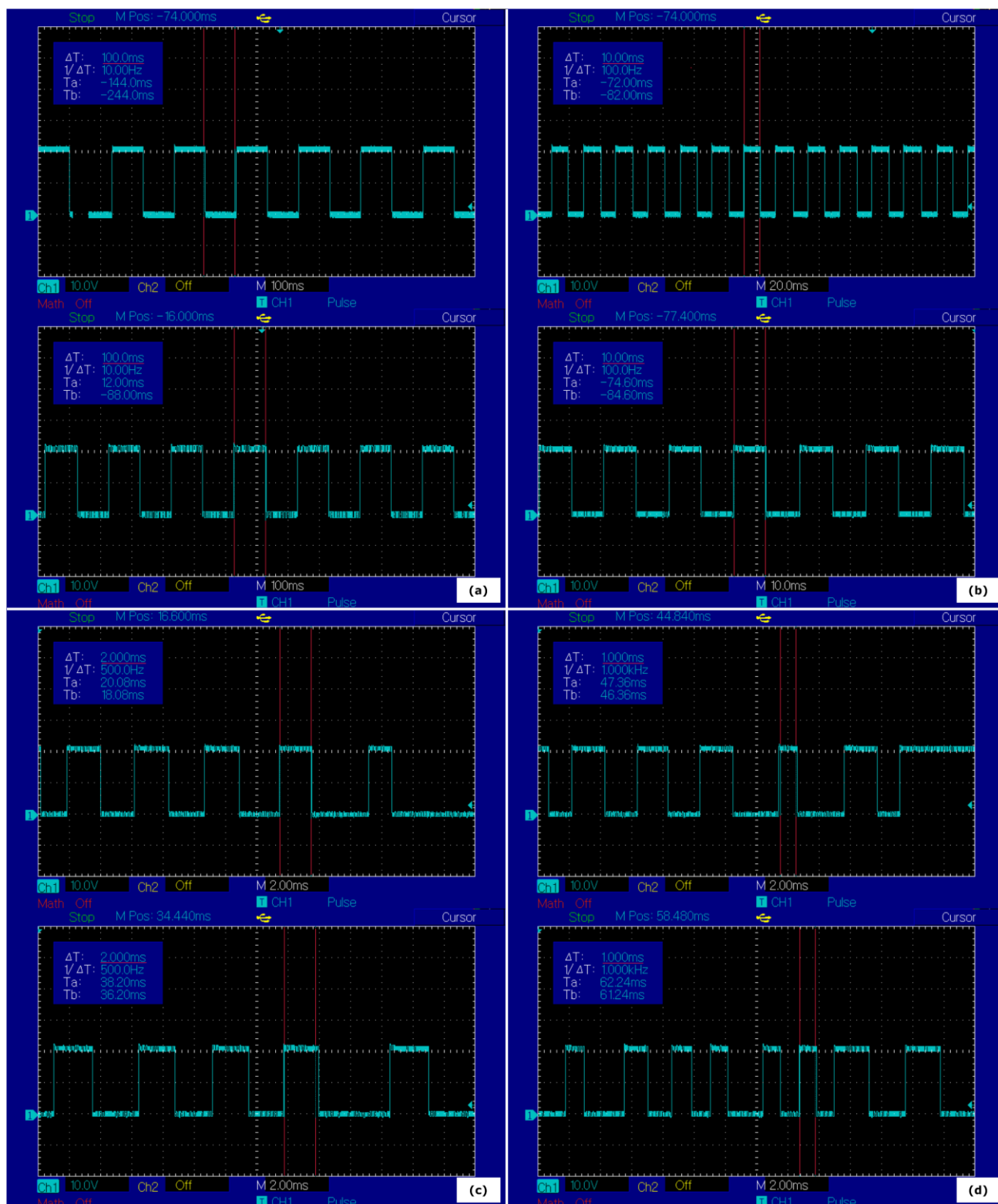


Figura 31. Semnalul digital generat pe baza evenimentului de tip heartbeat recepționat și transmis de Aplicația Gateway pentru studiul de caz 1 (deasupra) și studiul de caz 2 (sub) la recurențe de: a) 100 ms b) 10 ms c) 2 ms d) 1 ms

Cu toate obiectivele propuse, îndeplinite, este necesară o examinare mai atentă cu privire la cele mai importante concluzii, alături de o analiză a tehnologiilor implicate și a importanței conceptului pentru industrie. Aplicația gateway multi-protocol a reușit să interfațeze cu succes entitățile SOME/IP, DDS și eCAL, luând în considerare criteriile de eficiență și fiabilitate și adaptând conceptul la un scenariu de comunicație V2X. Arhitectura definită a fost adecvată, pentru interacțiunea dintre cele 3 tehnologii de comunicare diferite, în ambele studii de caz, fiecare dintre acestea fiind bazat pe o versiune diferită a aplicației gateway și având particularități majore. Rezultatele referitoare la comportamentul în timp real, au oferit o mai bună înțelegere asupra provocărilor privind comunicarea Ethernet în contextul IoT, iar metodele și strategiile utilizate pentru generarea rezultatelor pot fi aplicate la o scară mai largă, oferind soluții clare de îmbunătățire. A fost demonstrată compatibilitatea dintre SOME/IP, DDS și eCAL, oferind o imagine de ansamblu asupra perspectivelor, în diferite domenii industriale. S-au identificat anumite avantaje și dezavantaje aferente fiecărui protocol, după cum se arată în tabelul 10.

tabelul 10. Avantaje și dezavantaje aferente protocoalelor SOME/IP, DDS și eCAL

Protocol	Avantaje	Dezavantaje
SOME/IP	- În conformitate cu standardul AUTOSAR - Validat în multiple cazuri de utilizare automotive - Prezent atât în platforma clasică cât și în cea adaptive - Sigur și eficient	Proces de configurare complex
DDS	- În conformitate cu standardul AUTOSAR - Oferă mecanisme multiple ce asigură flexibilitate și scalabilitate - Prezent în platforma adaptive - Validat în multiple aplicații și cazuri de utilizare IoT	Nu este răspândit în domeniul automotive în ciuda faptului că este conform cu AUTOSAR
eCAL	- Eficient, intuitiv și ușor de folosit în scenarii de comunicație Ethernet - Proces de configurare ușor - Potențial ridicat pentru cazuri de utilizare industriale	- Deocamdată nu este în conformitate cu standardul AUTOSAR - Nu este foarte cunoscut - Nu este aplicat la întregul potențial în zone tehnice explicite

Pe baza studiului curent și a contextului industrial, este indubitabil că SOME/IP reprezintă o soluție fiabilă și eficientă pentru comunicarea Ethernet, fiind susținut de standardul AUTOSAR și prezent pe scară largă în aplicațiile din domeniul automotive. Fiind complex și adecvat pentru mai multe scenarii, procesul de configurare necesită timp și efort, în special în cazul arhitecturilor complexe orientate pe servicii, în comparație cu un protocol IoT. DDS devine din ce în ce mai prezent în sistemele industriale IoT, iar mecanismele sale oferă flexibilitate și scalabilitate sporită. Conformitatea cu standardul AUTOSAR îl face potrivit și pentru aplicațiile din domeniul automotive și orice posibile interacțiuni cu middleware-ul SOME/IP, într-un context legat de sectorul automotive, reprezintă un subiect de cercetare de mare interes. Middleware-ul eCAL nu este foarte cunoscut, însă oferă o alternativă ușor de utilizat și intuitivă, pentru transmiterea mesajelor pe Ethernet. Potențialul său nu este pe deplin determinat, așadar interacțiunea cu alte soluții middleware va contribui la o mai bună înțelegere a modului în care poate fi aplicat.

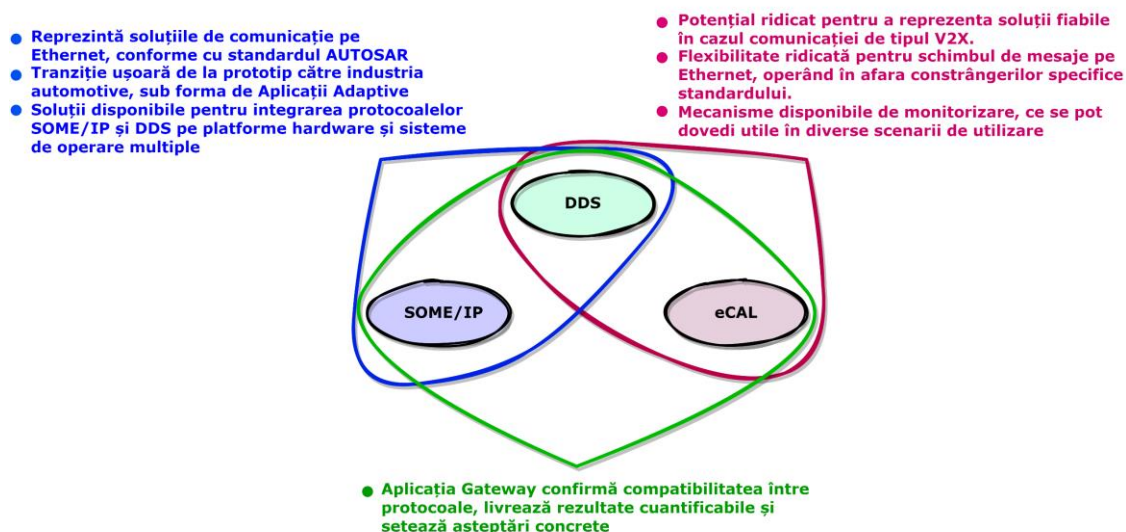


Figura 32. O imagine de ansamblu asupra tehnologiilor utilizate

Structurile de comunicație bazate pe Ethernet reprezintă fundamentul conceptului, eficiența și fiabilitatea în orice circumstanțe fiind obiective majore pentru orice soluție pe termen lung. Protocoalele de comunicare validate, oferă multiple mecanisme desemnate pentru a satisface nevoile industriei și sunt bine stabilite în anumite sectoare industriale. Progresele în desfășurare, din zonele IoT, oferă direcții clare de dezvoltare și provocări care trebuie abordate cât mai curând pentru a obține efectul scontat.

7. CONTRIBUȚII PERSONALE

Pe baza obiectivelor stabilite pentru actualul parcurs doctoral, în această secțiune se enumeră o serie de contribuții personale ale autorului, înregistrate pe parcursul tuturor etapelor de cercetare, după cum urmează :

- Efectuarea unei cercetări amănunțite în legătură cu domeniul și tema actualei teze, fiind identificate direcții clare de dezvoltare, relevante pentru multiple sectoare industriale.
- Implementarea practică a unei aplicații gateway structurată pe mai multe versiuni, între OPC UA și SOME/IP, în contextul unui scenariu de comunicație de tipul Car-to-Infrastructure.
- Analiza tehnologiei TSN, identificând avantajele și potențialul impact, în cazul implementărilor din cadrul fiecărei etape de cercetare.
- Îmbunătățirea mecanismului OPC UA Publish-Subscribe din punct de vedere arhitectural, în contextul funcționării în timp real, oferind o perspectivă amănunțită în legătură cu majoritatea implementărilor disponibile, bazate pe paradigma Publish-Subscribe.
- Extinderea aplicabilității protocolului OPC UA prin utilizarea mecanismului Publish-Subscribe pentru transmiterea de imagini, analizând capacitățile de gestionare a unui volum semnificativ de date.
- Implementarea unei aplicații DDS - OPC UA gateway, analizând coexistența celor două tehnologii în context comun și paralel, în cadrul unei arhitecturi definite conform principiilor industriale.
- Definirea unor criterii și metode elocvente și scalabile pentru identificarea limitelor de funcționare în timp real, pentru sistemele complexe de comunicație pe Ethernet
- Dezvoltarea unei soluții gateway multi-protocol, ce facilitează interoperabilitatea între SOME/IP, DDS și eCAL, în contextul unui scenariu de comunicare V2X, analizând și combinând tehnologii specifice domeniilor automotive și IoT.
- Definirea a numeroase arhitecturi complexe ce includ tehnologii și dispozitive diverse, în concordanță cu principiile și cerințele industriale.
- Obținerea unor rezultate cuantificabile ce prezintă capabilitățile actuale ale sistemelor de comunicare și interoperare, atât din punct de vedere al eficienței, cât și al stabilității, sporind astfel răspândirea utilizării tehnologiilor aferente către noi situații și procese industriale.

Bibliografie (selecție)

Inkoom, S.; Sobanjo, J.; Chicken, E. Competing risks models for the assessment of intelligent transportation systems devices: A case study for connected and autonomous vehicle applications. *Infrastructures* 2020, 5, 30. [CrossRef]

Chen, J.; Xue, Z.; Fan, D. Deep reinforcement learning based left-turn connected and automated vehicle control at signalized intersection in vehicle-to-infrastructure environment. *Information* 2020, 11, 77. [CrossRef]

Neumann, A.; Mytych, M.J.; Wesemann, D.; Wisniewski, L.; Jasperneite, J. Approaches for in-vehicle communication—An analysis and outlook. In *Communications in Computer and Information Science*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; Volume 718.

Shreejith, S.; Mundhenk, P.; Ettner, A.; Suhaib, A.; Steinhorst, S.; Lukasiewicz, M.; Chakraborty, S. VEGa: A high performance vehicular ethernet gateway on hybrid FPGA. *IEEE Trans. Comput.* 2017, 66, 1790–1803. [CrossRef]

Eckhardt, A.; Müller, S.; Leurs, L. An evaluation of the applicability of OPC UA Publish Subscribe on factory automation use cases. In *Proceedings of the IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Torino, Italy, 4–7 September 2018; pp. 1071–1074.

Gogolev, A.; Mendoza, F.; Braun, R. TSN-Enabled OPC UA in Field Devices. In *Proceedings of the IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Torino, Italy, 4–7 September 2018; pp. 297–303.

Ioana, A.; Korodi, A. VSOMEIP-OPC UA Gateway Solution for the Automotive Industry. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Valbonne Sophia-Antipolis, France, 17–19 June 2019; pp. 1–6. [CrossRef]

OPC 10000-14-UA Specification Part 14 PubSub; OPC Foundation: Scottsdale, AR, USA, 1 April 2018.

Pfrommer, J.; Ebner, A.; Ravikumar, S.; Karunakaran, B. Open Source OPC UA PubSub Over TSN for Realtime Industrial Communication. In *Proceedings of the IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Torino, Italy, 4–7 September 2018; pp. 1087–1090. [CrossRef]

Nicolae, A.; Korodi, A.; Silea, I. An Overview of Industry 4.0 Development Directions in the Industrial Internet of Things Context. *Rom. J. Inf. Sci. Technol.* 2019, 22, 183–201.

Korodi, A.; Radu, M.A.; Crisan, R. Non-Invasive Control Solution inside Higher-Level OPC UA based Wrapper for Optimizing Groups of Wastewater Systems. In *Proceedings of the IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Torino, Italy, 4–7 September 2018. [CrossRef]

Korodi, A.; Crisan, R.; Nicolae, A.; Silea, I. Industrial Internet of Things and Fog Computing to Reduce Energy Consumption in Drinking Water Facilities. *Processes* 2020, 8, 282. [CrossRef]

Gogolev, A.; Braun, R.; Bauer, P. TSN Traffic Shaping for OPC UA Field Devices. In *Proceedings of the 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Helsinki, Finland, 23–25 July 2019; pp. 951–956. [CrossRef]

Haskamp, H.; Orth, F.; Wermann, J.; Colombo, A.W. Implementing an OPC UA interface for legacy PLC-based automation systems using the Azure cloud: An ICPS-architecture with a retrofitted RFID

system. In Proceedings of the 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), St. Petersburg, Russia, 15–18 May 2018; pp. 115–121. [CrossRef]

Ioana, A.; Korodi, A. OPC UA Publish-Subscribe and VSOME/IP Notify-Subscribe Based Gateway Application in the Context of Car to Infrastructure Communication. *Sensors* 2020, 20, 4624. [CrossRef] [PubMed]

Korodi, A.; Anitei, D.; Boitor, A.; Silea, I. Image-Processing-Based Low-Cost Fault Detection Solution for End-of-Line ECUs in Automotive Manufacturing. *Sensors* 2020, 20, 3520. [CrossRef] [PubMed]

Toc, S.I.; Korodi, A. Modbus-OPC UA Wrapper using Node-RED and IoT-2040 with application in the water industry. In Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY), Subotica, Serbia, 13–15 September 2018

Korodi, A.; Silea, I. Achieving Interoperability Using Low-Cost Middleware OPC UA Wrapping Structure. Case Study in the Water Industry. In Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24–26 July 2017; pp. 1223–1228.

Nicolae, A.; Korodi, A.; Silea, I. Identifying Data Dependencies as First Step to Obtain a Proactive Historian: Test Scenario in the Water Industry 4.0. *Water* 2019, 11, 1144. [CrossRef]

Ioana, A.; Korodi, A. Improving OPC UA Publish-Subscribe Mechanism over UDP with Synchronization Algorithm and Multithreading Broker Application. *Sensors* 2020, 20, 5591. [CrossRef] [PubMed]

Tidrea, A.; Korodi, A.; Silea, I. Cryptographic Considerations for Automation and SCADA Systems Using Trusted Platform Modules. *Sensors* 2019, 19, 4191. [CrossRef] [PubMed]

Arestova, A.; Martin, M.; Hielscher, K.-S.J.; German, R. A Service-Oriented Real-Time Communication Scheme for AUTOSAR Adaptive Using OPC UA and Time-Sensitive Networking. *Sensors* 2021, 21, 2337. [CrossRef] [PubMed]

Ioana, A.; Burlacu, C.; Korodi, A. Approaching OPC UA Publish-Subscribe in the Context of UDP-Based Multi-Channel Communication and Image Transmission. *Sensors* 2021, 21, 1296. [CrossRef] [PubMed]

A. Nicolae, A. Korodi, I. Silea, “Complete Automation of an Energy Consumption Reduction Strategy from a Water Treatment and Distribution Facility, Inside an Industrial Internet of Things-Compliant Proactive Historian Application”, *Sensors* 2021, 21, 2569.

A. Ioana, A. Korodi, “DDS and OPC UA Protocol Coexistence Solution in Real-Time and Industry 4.0 Context Using Non-Ideal Infrastructure”. *Sensors* 2021, 21, 7760.