

UNELTE ȘI STRATEGII IIoT PENTRU INTEROPERABILITATEA SISTEMELOR ȘI PENTRU CREȘTEREA INTELIGENȚEI SOLUȚIILOR DIN INDUSTRIA APEI

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la
Universitatea Politehnică Timișoara
în domeniul de doctorat Ingineria sistemelor

Autor: inf. Andrei Mihai NICOLAE

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

TIMIȘOARA, septembrie 2021

Teza este structurată în 9 capitole, primul dintre acestea având rol introductiv, pentru ca cel de-al doilea să descrie stadiul actual al cercetărilor în domeniul tezei. Capitolul al treilea prezintă cercetarea și dezvoltarea unei aplicații software elementare, de tip historian, destinată industriei apei. Apoi, în capitolul 4 se expune o arhitectură software de referință pentru elevarea aplicației software spre un nivel superior, proactiv, acesta implicând optimizarea în mod autonom, neasistat și neinvaziv a sistemului tehnic monitorizat. Următoarele 4 capitole conțin cercetări, implementări și teste efectuate pentru a obține o asemenea unealtă proactivă, în conformitate cu arhitectura anterior menționată. Ultimul capitol evidențiază contribuțiile autorului și direcțiile viitoare de cercetare și dezvoltare. Grafica tezei include peste 67 de elemente (figuri, grafice, scheme, tabele) care ilustrează complexitatea temei, a procesului destinat testelor, a soluțiilor și rezultatelor.

1. Introducere

Într-o sumară prefațare, conceptul de Cyber Physical Systems (CPS) referă un sistem computerizat, în interiorul căruia un mecanism fizic este controlat sau supravegheat de către algoritmi software. Caracteristica esențială a acestui concept este definită de o simbioză între componentele fizice și elementele cibernetice, digitale. Pe fondul unui cumul de dezvoltări recente, în direcții cum ar fi tehnologiile de comunicații, dar și a sistemelor și a senzorilor inteligenți, această orientare este tot mai pregnantă în lumea științifică și în cercetarea aplicată. În acest sens, ”doctrină” precum Industry 4.0 [1][2][3] sau Industrial Internet of Things (IIoT) [4][5][6] nu fac decât să implementeze ideile din jurul CPS în mediul economic, desigur, cu particularizări specifice diferitelor domenii. Consecvent, cercetarea desfășurată ca fundament pentru elaborarea tezei doctorale a fost orientată în proximitatea paradigmelor IIoT și Industry 4.0, vizând, în același timp, componente implementate practic, cu aplicabilitate directă în industria apei.

Cu privire la industria apei, se poate observa o dominare a sistemelor tehnice vechi, moștenite. Acestea au reprezentat soluții viabile la vremea introducerii lor, dar marea majoritate a celor care se găsesc astăzi în industria apei sunt neoptimizate și ineficiente după standardele moderne, transformând astfel această industrie în mediul perfect pentru a livra îmbunătățirile promise de tehnologiile Industry 4.0 și IIoT. Mai mult, întregul sector al apei se confruntă cu probleme ample de eficiență, una dintre cauzele principale datorându-se faptului că soluțiile funcționale curente, din ”decorul” industrial, constau într-o varietate largă de sisteme dispersate, atât ca nivel tehnic/tehnologic/cronologic, cât și din punct de vedere al locației. În plus, de multe ori integrabilitatea și interoperabilitatea structurilor locale este obstrucționată de

interfațarea de bază cu echipamentul fizic, care se realizează prin protocoale proprietar.

Grație unor progrese recente înregistrate în zona de conectivitate, în structura IIoT, se semnaleză apariția conceptului de acumulare de date, interpretat în sfera practică prin aplicații de tip historian, obiectivul acestora cristalizându-se în achiziția și stocarea parametrilor și datelor de funcționare ale sistemului tehnic supravegheat. Chiar dacă datele adunate de programele historian clasice rămân în mare parte nefolosite, acestea deschid totuși noi oportunități, neexplorate încă, în materie de software historian de tip proactiv, unde aprofundările dirijate spre algoritmi de analiză a datelor stocate și strategii de optimizare inaugurează perspective atât asupra distingării de tipare, cât și a capacităților de învățare sau a concluziilor solide cu privire la eficientizări aplicabile în lumea reală. *În realitate, cele mai noi tendințe se îndreaptă spre crearea de soluții care pot utiliza, într-un mod iscusit, datele deja colectate, pentru a rezolva anumite probleme punctuale.*

În contextul creionat, *tema de cercetare* o reprezintă dezvoltarea atât a unor *unelte*, cât și a unor *strategii*, care să poată fi administrate cu succes în industrie, *scopul urmărit* constituindu-l creșterea interoperabilității sistemelor, dar și a inteligenței soluțiilor din industria apei. În ceea ce privește uneltele, s-a avut în vedere dezvoltarea primordială de aplicații software care să etaleze posibilitatea funcționării într-o manieră neinvazivă, alături de soluțiile deja implementate în industrie. Privitor la strategii, tema de cercetare țintește dezvoltarea de noi algoritmi și procedee care să faciliteze crearea de soluții software mai inteligente, cu potențial de a optimiza diverse caracteristici ale sistemelor tehnice, în armonie cu ideologia IIoT și Industry 4.0.

În consecință, *obiectivele majore ale temei de cercetare* sunt: (i) investigarea domeniului și a stadiului actual al cercetării în tematica propusă a tezei; (ii) dezvoltarea unor algoritmi de optimizare a performanțelor sistemelor de monitorizare din industria apei; (iii) realizarea și testarea unei aplicații historian de tip proactiv autonom, capabilă să optimizeze sistemul tehnic supravegheat din industria apei. Cu toate acestea, complexitatea celui de-al treilea obiectiv principal impune realizarea în prealabil a unei serii de obiective subsecvente: (i) întocmirea unei analize a cerințelor și performanțelor sistemelor din sectorul industriei apei; (ii) identificarea și dezvoltarea unor modalități de stocare a valorilor parametrilor de funcționare ai sistemelor aferente domeniului; (iii) elaborarea sau îmbunătățirea unor metode de analiză și identificare a dependențelor între parametrii sistemului monitorizat; (iv) elaborarea sau adaptarea de algoritmi pentru predicția evoluției parametrilor, folosind istoricul valorilor stocate și alte informații; (v) dezvoltarea unor modalități de recunoaștere a unor rețete pentru optimizare, aplicabile sistemului supravegheat, pentru îndeplinirea anumitor obiective de optimizare stabilite; (vi) elaborarea unei arhitecturi software de referință și a cerințelor hardware minimale pentru un sistem de monitorizare proactiv, specific industriei apei; (vii) dezvoltarea și implementarea unui historian proactiv autonom experimental.

Evaluând *aplicabilitatea practică vizată de rezultatele cercetării*, aceasta este pronunțată, uneltele și strategiile emergente de sub umbrela acestei teze validându-se prin testarea lor pe sisteme reale. Concret, se urmărește construirea unei soluții software de tip historian proactiv autonom pentru industria apei, care să dețină, pe lângă capacitățile de stocare a valorilor parametrilor de funcționare ai sistemelor tehnice monitorizate, și capacități de a identifica și înțelege relațiile specifice dintre diferiți parametri. Aceste caracteristici facilitează aplicației punerea în practică a optimizării sistemului tehnic, într-o manieră neinvazivă. Mai exact, se dezvoltă un instrument software ușor de utilizat, instalat pe o platformă hardware accesibilă, amplasată fie în apropierea fizică a sistemului monitorizat, fie la distanță. În succesiune, după o scurtă perioadă inițială de configurare, ansamblul va putea funcționa autonom și automat, oferind suplimentar simplei scrieri într-o bază de date a valorilor citite pentru diferiți parametri ai sistemului și unele optimizări, nereclamând nici un fel de colaborare umană.

2. Stadiul actual al cercetării în domeniul tezei

În capitolul secund se prezintă stadiul actual al cercetării în domeniul de interes, se contabilizează principalele direcții de dezvoltare din Industry 4.0 și se înfățișează, pe scurt, o recenzie a literaturii de specialitate relevante în context.

Desigur, se constată faptul că Industry 4.0 și IIoT sunt strâns legate, ambele fiind preocupate de comunicarea inteligentă între diferite entități industriale, o parte a cercetătorilor considerându-le ca fiind același fenomen, însă manifestat în domenii ușor diferite de aplicabilitate.

În primul rând, *caracteristicile definitorii ale Industry 4.0* sunt: (i) dizolvarea conceptului precedent al piramidei automatizării, înlocuindu-l cu o structură în interiorul căreia entitățile pot fi conectate între ele în mod direct, permițând, pe această cale, unei entități să comunice cu oricare altă entitate prezentă; (ii) impactarea a multiple aspecte ale societății (condiții de muncă, noi tipuri de locuri de muncă, calificarea forței de muncă, educație, calitatea vieții), fiind catalogat deja ca o adevărată Revoluție Industrială la scară largă; (iii) produse mai personalizate; (iv) schimb de informații automat; (iv) procese de producție independente și autonome; (v) interoperabilitate crescută a sistemelor de producție; (vi) mentenanță predictivă.

În altă ordine de idei, se detaliază și *conceptele primare ale IIoT*, printre acestea regăsindu-se: (i) conectarea obiectelor fizice prin Internet; (ii) conectivitate mare între diferite entități industriale; (iii) monitorizare și control de la distanță folosind software inteligent; (iv) optimizarea sistemelor în mod autonom; (v) comunicații îmbunătățite.

Mai departe, se identifică 5 linii de dezvoltare principale ale Industry 4.0, sub fiecare dintre acestea fiind evidențiate tendințele și contribuțiile semnificative recente din literatura de specialitate: (i) rețelistică și OPC UA; (ii) Plug & Produce, (iii) modele de informații și date, (iv) Big Data și Cloud Computing, (v) standardizare.

Astfel, zona de rețelistică păstrează deocamdată cel mai mare interes, bucurându-se probabil, în viitor, de cea mai rapidă dezvoltare de noi tehnologii, unde, prin intermediul unor inovații precum protocolul OPC UA [7][8] sau tehnologiile Time-Sensitive Networking (TSN) [9] ori Software-Defined Networking (SDN) [10], se tinde spre creșterea interoperabilității, scăderea latenței sau îmbunătățirea interfațării și a securității.

La rândul său, traiectoria Plug & Produce [11] se îndreaptă spre: (i) obținerea integrării automate a noilor dispozitive în sistemele de producție deja existente, fără a cere intervenție manuală; (ii) sisteme mai adaptabile și flexibile; (iii) autodescoperirea dispozitivelor și a capabilităților acestora în rețea; (iv) autoconfigurare.

În continuare, studiile din preajma modelelor de informații și date sunt direcționate spre: (i) variabilitatea sistemelor de producție automatizate [12]; (ii) transformarea diagramelor de clasă UML în modele de informații OPC UA [13]; (iii) model generic pentru configurarea dispozitivelor de control; (iv) nivel de agregare a datelor energetice [14]; (v) accesibilitate universală la funcționalitățile dispozitivelor.

Bineînțeles, pe axa Big Data și Cloud Computing au fost distinse inițiative de cercetare orientate spre: (i) Fog Computing [15]; (ii) Edge Computing [16]; (iii) platforme Cloud; (iv) migrarea sistemelor existente în Cloud [17]; (v) tehnici Big Data performante.

În cea de-a cincea filieră, și anume standardizarea, problemele accentuate de literatură, ale căror rezolvări constituie obiectivul demersurilor din această zonă sunt: (i) eterogenitatea domeniului standardizării; (ii) lacune în standardizare [18]; (iii) incapacitatea de a ține pasul cu progresul alert al tehnologiilor; (iv) dificultatea găsirii celor mai potrivite standarde; (v) multitudinea organizațiilor de standardizare participante.

În ultima parte a capitolului secund al tezei se trec în revistă cele mai importante studii de cercetare derulate sub paradigma Industry 4.0 care s-au concentrat pe industria apei, evocându-

se diverse lucrări de cercetare legate de tratarea și distribuția apei potabile [19], gestionarea surselor de apă [20] și tratarea apelor uzate [21]. Pe lângă aceasta, s-a analizat situația concretă, practică a aplicațiilor historian din industria apei, modurile și locurile de amplasare, modul de utilizare al acestor aplicații, precum și problemele tipice ale acestora, toate prin referire la industria apei.

Cu toate că industria apei desemnează o paletă largă și variată de operațiuni și sisteme tehnice ale căror element central este apa, pentru teza de față *prezintă interes doar două tipuri de asemenea sisteme*, dezvoltările ulterioare din această lucrare relaționând în mod direct cu stații de tratare a apei potabile (STAP) și stații de epurare (SE). Prin urmare, o STAP tipică (Figura 1) dispune de mai multe surse de apă, apa fiind filtrată, proces care produce nămol și are loc injectarea clorului în multiple puncte din stație, înainte ca apa tratată să fie depozitată, pentru a fi, în cele din urmă, distribuită spre consumatorii finali. De cealaltă parte, o SE (Figura 2) primește apă uzată, care trece printr-o filtrare mecanică, o sedimentare, un tratament biologic și apoi un tratament chimic pentru a putea fi eliberată în mediul natural, toate aceste etape dând naștere unor reziduuri, sub diverse forme. Printre problemele tipice, pentru o STAP se înregistrează consumul ridicat de energie și substanțe, schimbări ale calității surselor de apă în timp, defecțiuni mecanice și mentenanță, pe când pentru o SE există consum ridicat de energie și substanțe, avarii ale echipamentului, suprasolicitaarea unor SE subdimensionate.

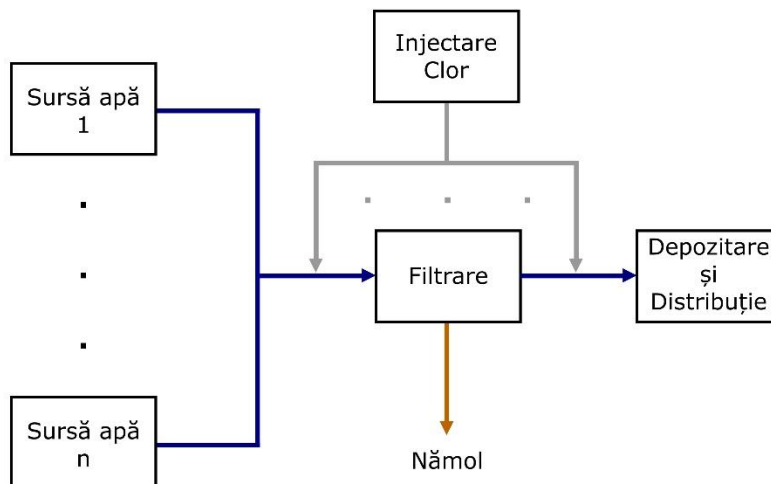


Figura 1. Procesele tipice din STAP

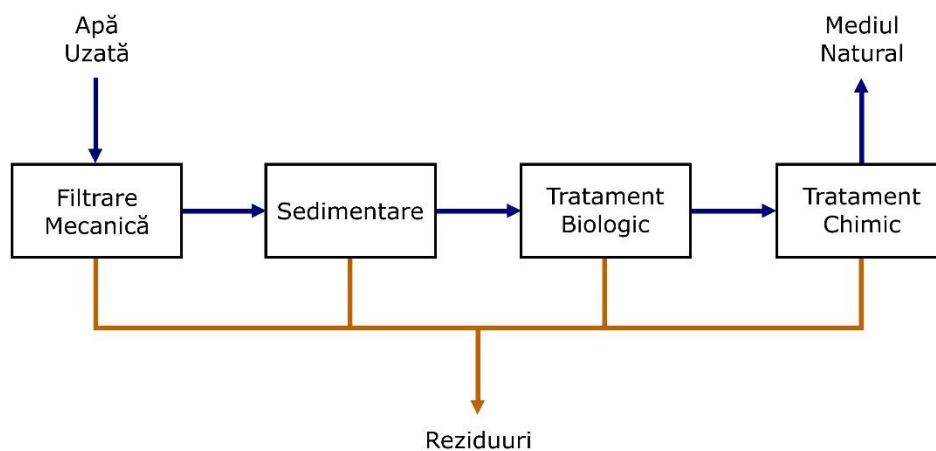


Figura 2. Procesele tipice din SE

3. Aplicație historian elementară pentru industria apei

Întrucât cel de-al treilea capitol al tezei aduce în prim-plan cercetarea, implementarea, dezvoltarea și testarea unei aplicații software de tip historian destinată industriei apei, inițial a fost detaliată o perspectivă practică asupra acestor aplicații în industria țintită (industria apei), fiind consemnată o serie de probleme actuale, dintre care: (i) software-ul SCADA provine de la companii producătoare binecunoscute, ceea ce implică restricționarea accesului la baza de date în sine, condiționări și limitări în manipularea datelor, exigența achiziționării de extensii ale licenței pentru utilizarea unui historian, comercializarea de software historian ca produs separat, la prețuri semnificative; (ii) în majoritatea covârșitoare a cazurilor, soluția historian este plasată doar la nivel înalt, în vârful piramidei și nu în camerele de control SCADA locale, unde este disponibilă cea mai mare cantitate de date; (iii) soluțiile historian curente sunt dependente de platformă; (iv) folosirea rară sau deloc a aplicațiilor historian de către operatorii locali ai stațiilor din cauza complexității acestor soluții software și a lipsei de cunoștințe; (v) lipsa aplicațiilor historian la nivelul echipamentelor HMI locale. În aceste circumstanțe, se discerne necesitatea unei componente software, cu costuri și cerințe reduse, adaptată pentru integrare rapidă la nivel local, cu/prin panoul de automatizare, respectiv ușor de utilizat de către operatorii locali beneficiari de competențe IT scăzute.

Ca urmare, se dezvoltă conceptul general pentru o aplicație historian elementară care să răspundă necesității remarcate, fiind enumerate funcționalitățile și caracteristicile esențiale pe care o asemenea soluție trebuie să le posede: (i) conectarea la un sistem local cu rol în controlarea unui proces sau chiar la dispozitive de la nivelul câmpului industrial care dețin interfațarea adecvată; (ii) costuri scăzute; (iii) nivel ridicat de pregătire/maturitate tehnologică; (iv) cerințe reduse; (v) independență de platformă; (vi) ușurință în folosirea de către operatori; (vii) interfațare cu structurile locale prin OPC UA, cu posibilitatea de a extinde capacitățile aplicației și la alte protocoale; (viii) configurarea și manipularea automate a unei baze de date; (ix) adaptabilitate la schimbări în setul de variabile monitorizate; (x) exportarea datelor din baza de date în formate standard (Microsoft Excel, PDF și CSV); (xi) asigurarea unei operări continue a aplicației în conexiune cu sistemul local, cu tratarea corespunzătoare a tuturor erorilor și excepțiilor; (xii) modularitate a aplicației, cu scopul de a asigura un cadru, o platformă pentru dezvoltări viitoare.

Plecând de la aceste premise, s-a implementat practic o soluție software care bifează toate cerințele din paragraful anterior, *această aplicație fiind referită în continuare sub denumirea Historian* (Figura 3). Pentru aceasta, s-a folosit tehnologia SQLite pentru baza de date, aplicația propriu-zisă fiind implementată în Java, cu partea grafică sprijinită pe Java Swing. Pentru interfațarea cu sistemul local prin OPC UA s-a utilizat tehnologia Node-Red, procesul din sistemul de operare în care rulează aceasta fiind controlat și monitorizat de către aplicația principală Java prin tehnici de comunicare interproces și captare a ieșirii (output) din linia de comandă. De asemenea, a fost elaborată o mașină cu stări finite, pe care aplicația Historian o respectă și a fost acordată o atenție sporită tratării erorilor și excepțiilor, fiind implementat un sistem de monitorizare automată a stării tuturor componentelor Historian, un sistem de auto-diagnoză, un sistem de jurnale de execuție, pentru analiză ulterioară, precum și un mecanism automat de restabilire a conexiunii cu sistemul tehnic local, în cazul întreruperilor. În acest mod, s-a obținut o aplicație care îndeplinește toate cerințele antemenționate și se poate conecta la orice server OPC UA, punând la dispoziția utilizatorului lista de etichete (tags) OPC UA existente la respectivul server. Utilizatorul poate alege acele etichete ale căror valori dorește să fie stocate de către aplicația Historian, în funcție de alegerea făcută aceasta configurând automat baza de date. Adicional, datele deja stocate pot fi vizualizate în interiorul Historian, sub formă grafică a evoluției valorilor în timp și pot fi exportate în afara acestuia. Pentru suportul hardware

al soluției a fost aleasă placa Raspberry Pi 3.

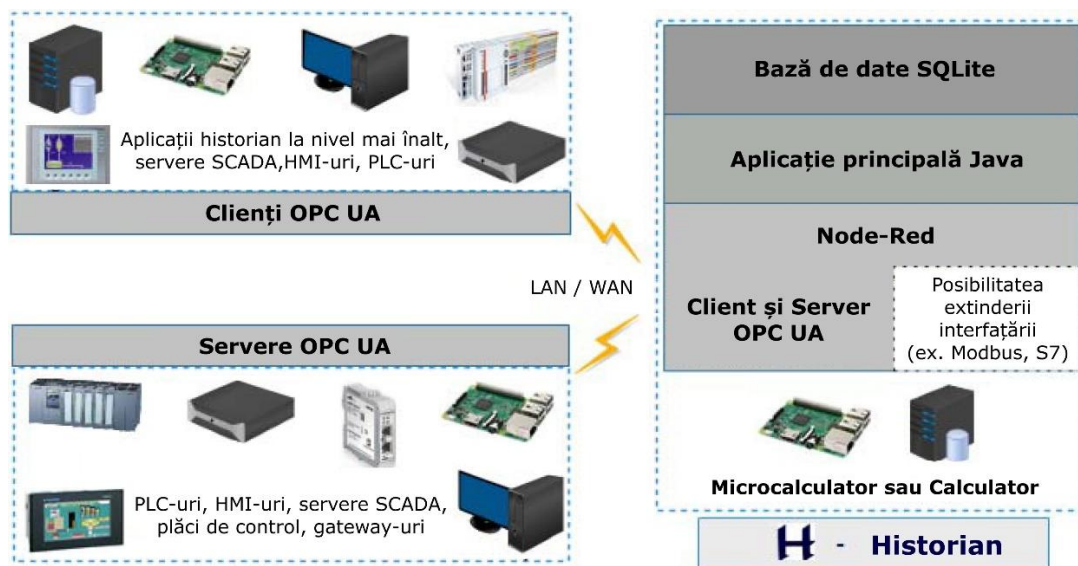


Figura 3. Arhitectura generală a aplicației Historian și relația cu structurile OPC UA

În vederea testării aplicației Historian elementare rezultate, s-a verificat funcționarea corespunzătoare atât pe sistemul de operare Raspbian (Linux), pe placa Raspberry Pi 3, cât și pe Microsoft Windows, pe un laptop cu specificații tehnice de nivel mediu. Ulterior, s-a apelat la un parteneriat preexistent, solid, între echipa de cercetare la care este afiliat și autorul tezei, pe de-o parte, și compania locală de distribuție a apei, pe de altă parte, ceea ce a facilitat testarea riguroasă a aplicației Historian, pe perioade mai lungi de timp, în conexiune cu o STAP reală, care deservește aproximativ 8000 de locuitori.

Deși testarea aplicației dezvoltate până la acest punct s-a realizat în industria apei, se precizează faptul că implementarea este una generică, fiind capabilă să își exercite în întregime caracteristicile funcționale pentru orice tip de server OPC UA, indiferent de natura procesului tehnic în care este prezent sistemul monitorizat.

4. Arhitectura software de referință pentru elevarea aplicației Historian spre nivelul proactiv

Cel de-al patrulea capitol marchează debutul elementelor de interes maxim și anume elevarea aplicației Historian spre un nivel superior, unde să poată contribui în mod proactiv, autonom, automat, neinvaziv și neasistat la optimizarea sistemului tehnic monitorizat, fructificând, în mod inteligent, datele istorice deja înregistrate de la acesta, prin metode conforme cu Industry 4.0 și IIoT.

Pentru materializarea transformării amintite a unei aplicații de tip historian elementare, care este înzestrată doar pentru citirea de la un sistem tehnic și stocarea într-o bază de date a unor valori numerice, categorie în care se încadrează și aplicația Historian de la finele capitolului 3, spre nivelul proactiv este imperativă nevoia raportării la o arhitectură software de referință. Deoarece căutarea unor soluții în literatura de specialitate a eșuat (în tentativa de a identifica un model deja existent potrivit pentru situația particulară), s-a decis elaborarea unei asemenea arhitecturi de referință proprii, care să poată fi aplicată pentru orice soluție elementară, nu doar pentru Historian.

Prin urmare, s-a propus o arhitectură software de referință independentă de industria în care va opera aplicația historian, arhitectură concentrată asupra elementelor software care trebuiesc adăugate unei aplicații historian elementare existente pentru a o converti într-una proactivă.

Concret, arhitectura cuprinde o structură de algoritmi software împărțiți în 3 niveluri distincte (Figura 4).

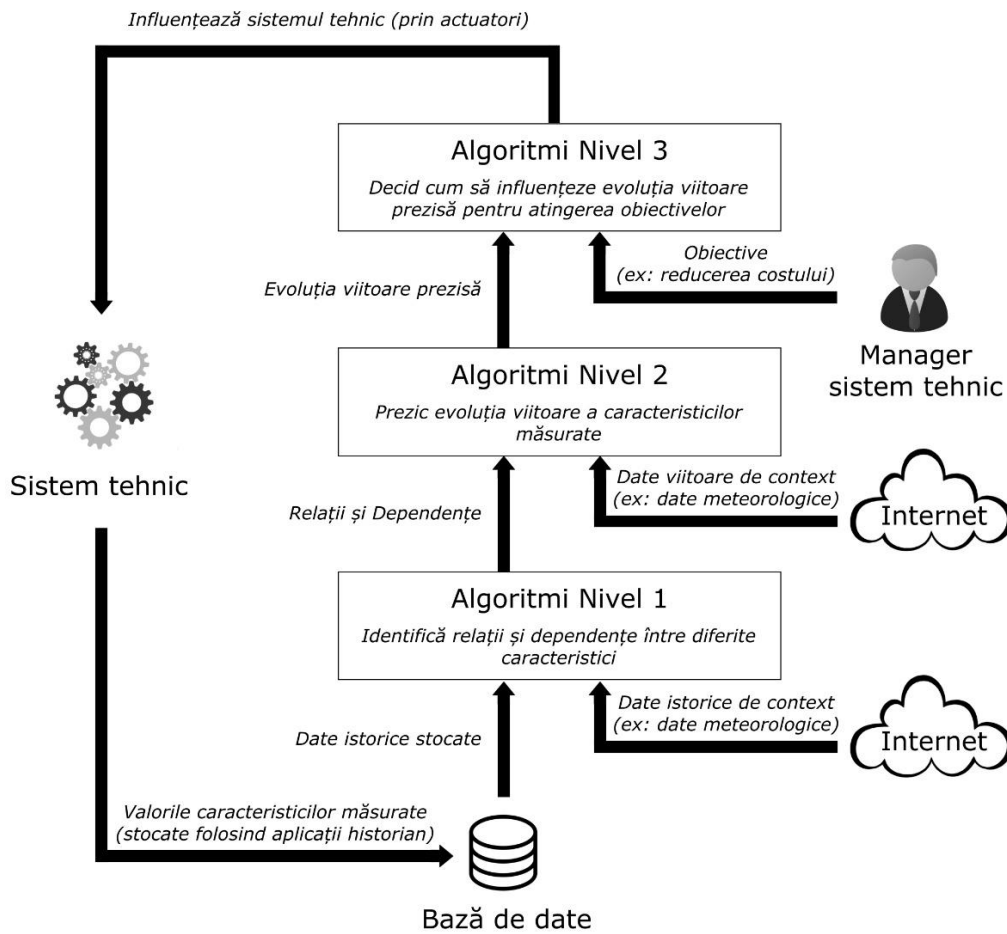


Figura 4. Arhitectură de referință pentru o aplicație historian proactivă

În primul rând, după ce valorile parametrilor sistemului tehnic sunt acumulate pentru o perioadă mai lungă de timp, cu ajutorul unei soluții historian elementare, într-o bază de date, datele istorice stocate în aceasta vor compune intrarea pentru algoritmi de nivel 1, alături de această intrare fiind opțională alăturarea, din exterior, a unor date istorice de context care ar putea fi relevante pentru anumite situații particulare (de exemplu: date istorice meteorologice). În acest fel, algoritmi de nivel 1 identifică relații și dependențe între diferite caracteristici, etichete, parametri ai sistemului, relațiile și dependențele determinate constituind ieșirea acestui prim nivel.

Relațiile și dependențele de la primul nivel reprezintă una dintre intrările algoritmilor de nivel 2, facultativă fiind o altă intrare, alcătuită din date viitoare de context (de exemplu: prognoza meteorologică), provenite din exterior. Fără îndoială, scopul algoritmilor de la nivelul 2 este prezicerea evoluției viitoare a valorilor parametrilor monitorizați ai sistemului, această predicție fiind ieșirea nivelului secund.

Intrarea nivelului 3 preia evoluția viitoare prezisă, furnizată de nivelul inferior și, în mod obligatoriu, cealaltă intrare este obiectivul de optimizare (de exemplu: reducerea costului), acesta fiind ales de către un manager al sistemului tehnic. Desigur, acest ultim nivel este responsabil să decidă cum să influențeze sistemul pentru atingerea obiectivelor, ieșirea fiind chiar influența, modificarea concretă, care trebuie aplicată sistemului tehnic.

În altă ordine de idei, se sesizează faptul că arhitectura propusă constă într-o buclă repetitivă prin care evoluția sistemului tehnic este înregistrată, analizată, prezisă și, mai apoi, alterată față

de predicție pentru a atinge obiective predefinite, după care iterația se reia. În mod cert, obiectivele fixate se pot schimba pe parcurs, ceea ce susține organizarea sub formă de buclă continuă. Dintr-un punct de vedere divergent, algoritmi care transpun o aplicație historian simplă, elementară, într-o soluție de tip proactiv, lucrează într-o arhitectură de tip *pipeline*, unde fiecare nivel de algoritmi folosește ieșirile algoritmilor de nivel inferior ca și intrări ale sale.

Următoarele 4 capitole avansează, pe rând, cercetări și implementări ale componentelor anterior menționatei arhitecturi software, care au constituit obiectul de studiu primordial pe durata intervalului doctoral. Astfel, împreună cu fragmentul de față, toate cele 5 capitole fac parte din "parcursul" de elevare al proiectului Historian de la nivelul elementar spre cel proactiv.

5. Identificarea dependențelor dintre datele stocate

Cel de-al cincilea capitol se preocupă de primul nivel din arhitectura de referință prezentată în capitolul premergător, vizând cercetarea și dezvoltarea unui algoritm capabil să ofere funcționalitatea revendicată la acest nivel al arhitecturii, pentru ca, în partea finală, algoritmul în cauză să fie integrat în aplicația Historian și testat în industria apei, pe o STAP reală.

În dezvoltarea algoritmului din acest capitol s-a păstrat o abordare generică, conceptul și implementarea fiind detașate de particularitățile unui anumit proces sau industrie. Din pricina locului de testare (STAP), dar și a perseverării în același mediu în capitolul următor, s-au detaliat procesele tipice care se desfășoară în interiorul unei STAP, precum și problemele definitorii asociate. În mod concis, apa care intră într-o STAP provine de la mai multe surse de apă, pentru început fiind posibil, în unele stații, să treacă printr-un bazin de aerare (în care se introduce oxigen, cu ajutorul unei suflante) pentru controlul nivelurilor de nitriți și nitrați. Dincolo de acesta, o stație de pompare trimite apa printr-un filtru de nisip și printr-un filtru de cărbune, timp în care are loc și injectarea și măsurarea clorului, în mai multe puncte, înainte ca apa să fie depozitată în bazine, rezervoare sau turnuri de apă. Ulterior, o altă stație de pompare expediază această apă, prin rețeaua de apă potabilă, spre consumatorii finali, în funcție de necesar. Drept proces secundar, filtrele de cărbune și nisip trec periodic prin cicluri de curățare a filtrelor, operațiune care se realizează fie cu apă, fie cu aer, întrebuițând pompe de apă sau suflante de aer, înlăturându-se noroi, care poate fi, în unele cazuri, tratat aprioric debarasării. În privința problemelor tipice, se reamintesc: (i) consum mare de energie datorat suflantelor și pompelor, mari consumatori, dar care asigură reglarea acidității, alcalinității și a conductivității; (ii) consum mare de clor; (iii) costuri crescute cauzate de mentenanța echipamentului și a filtrelor; (iv) colmatări prilejuite de un nivel ridicat de turbiditate; (v) pierderi de apă prin curățarea filtrelor; (vi) uzură prematură datorată pornirii și opririi dese a stației, mai ales pe timpul nopții, unul din motive fiind pierderile de apă din rețeaua de distribuție; (vii) perturbarea proceselor de filtrare și clorinare din cauza pornirii și opririi dese a stației; (viii) calitatea surselor de apă variază de-a lungul timpului; (ix) deși calitatea apei nu este aceeași la toate sursele, aceasta nu este luată în considerare atunci când se aleg sursele utilizate cu precădere.

Așadar, algoritmul de analiză a datelor stocate dezvoltat identifică dependențele dintre o etichetă OPC UA și alta, luată ca referință, stabilește măsura, gradul de dependență și expune tipare funcționale, fiind fundamental pentru obținerea proactivității. Mai exact, algoritmul sugerat folosește o caracteristică pe post de referință și, demarând de la evoluția valorilor măsurate ale referinței, determină dacă celelalte caracteristici sunt conectate în vreun fel de referință. În eventualitatea în care algoritmul hotărăște că valorile măsurate ale unei caracteristici sunt legate, în ceea ce privește evoluția în timp, de valorile măsurate ale referinței, acesta calculează, de asemenea, și gradul de impact în privința dependenței, cele două caracteristici putând fi foarte strâns legate sau, din contră, ar putea avea o influență foarte scăzută una asupra celeilalte. Examinând intrarea algoritmului, acesta primește un set de date

alcătuit din valori numerice măsurate, înmagazinate de aplicația historian, corespunzătoare diverselor caracteristici ale sistemului tehnic (de exemplu: presiunea apei, debite de apă, niveluri ale apei în bazine, energii, etc.). Pe lângă acest set de date, se impune și furnizarea indicației referitoare la caracteristica, dintre cele prezente în datele de intrare, care va fi folosită ca referință. De cealaltă parte, ieșirea algoritmului returnează două „bucăți” de informație pentru fiecare caracteristică analizată în relație cu referința, denumite în continuare *Proportionalitatea* și *Cantitatea*. Prima dintre acestea arată dacă eticheta analizată evoluează proporțional cu referința, având ca valori posibile: direct proporțional, invers proporțional sau nu sunt proporționale. Cea de-a doua informație, *Cantitatea*, este oferită de către algoritm sub forma unui procent, care indică în ce măsură evoluția valorilor măsurate ale caracteristicii este afectată de evoluția valorilor de referință. Firește, această relatare de natură cantitativă este relevantă doar când valorile primei informații, *Proportionalitatea*, sunt fie direct proporțional, fie invers proporțional. În acest sens, exemple edificatoare sunt: (i) informația de *Cantitate* este 100% - indică un raport 1:1 între caracteristica analizată și referință, astfel încât, dacă valoarea de referință se schimbă cu 20%, atunci valoarea caracteristicii analizate se modifică, la rândul ei, tot cu 20%; (ii) informația de *Cantitate* este 50% / 150% - dacă valoarea de referință se schimbă cu 20%, atunci valoarea caracteristicii analizate se modifică, după caz, cu 10% / 30%. Oricum, *se observă faptul că algoritmul din acest capitol este orientat spre un proces de analiză de tip numeric, independent față de semnificația valorilor primite la intrare, ceea ce îi conferă o aplicabilitate generală, nelimitată la particularitățile unei industrii sau proces tehnic.*

În mod previzibil, implementarea practică a dezvoltării conceptuale a algoritmului în cauză a fost integrată în aplicația Historian construită în capitolul 3, prin alipirea unui modul software de analiză a datelor.

În vederea testării rezultatelor, s-a apelat la același parteneriat implicând compania locală de apă, care a pus la dispoziție o STAP reală, de la care s-au colectat și analizat diferite seturi de date prin intermediul aplicației Historian. Rezultatele testării algoritmului au fost promițătoare, acesta identificând cu succes relații și dependențe între datele stocate. Stabilirea cu exactitate a corectitudinii și a preciziei algoritmului constituie o sarcină dificilă în lipsa unor date etalon, lacună generată de lipsa unui algoritm sau modul software cu funcționalități și capabilități similare cu cel prezentat, care să poată facilita o comparare directă. Totuși, dependențele obținute sunt catalogate drept plauzibile, prin prisma vastei experiențe a specialiștilor din industria apei și a echipei de cercetare.

În concluzie, capitolul curent a lansat o variantă de concretizare a primului nivel din arhitectura de referință, descriind o soluție software înzestrată cu competențe de analiză a datelor, testată într-un mediu industrial, etapa actuală fiind exponentul unui pas esențial în efortul concentrat pe dobândirea unei aplicații historian de tip proactiv.

6. Reducerea consumului de energie în STAP

Odată avută la îndemână aplicația Historian cu capacități de analiză a datelor, se percepe oportunitatea utilizării acesteia la procurarea de rezultate care să permită, mai târziu, cercetarea și rafinarea unei strategii de optimizare. Capitolul 6 propune o soluție de decizie și control (SDC), plasată în zona de Fog Computing (Figura 5), care reduce consumul de energie într-un proces de tratare și distribuție a apei potabile, recurgând la concepte fondate pe IIoT, cum ar fi interoperabilitatea sau modificarea neinvazivă a sistemelor de control locale, în urma identificării de rețete, după o analiză a dependențelor dintre date, desfășurată pe termen lung. În această accepțiune, se constată că în STAP eficiența energetică este puternic legată de alocarea și folosirea potrivită a surselor de apă. Bineînțeles, interesul companiilor pentru o asemenea diminuare a costurilor este limpede, putând fi evidențiate inclusiv beneficii în zona ecologică, de reducere a poluării.

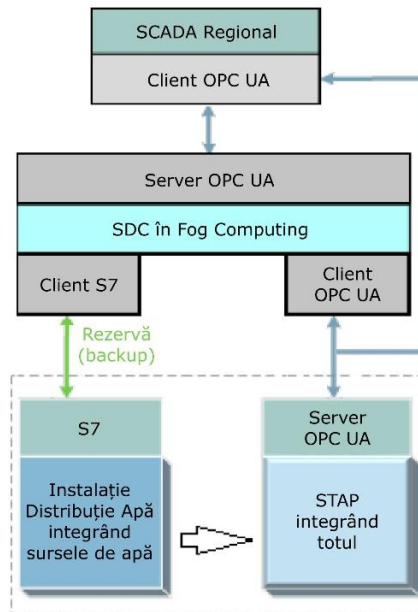


Figura 5. Plasarea SDC relativ la instalația țintită

În prima parte a capitolului, se detaliază instalația de apă țintită, care este alcătuită atât din STAP, cât și dintr-o instalație de distribuție a apei, având la dispoziție 4 foraje (drept surse de apă), fiecare dintre acestea cu două bucle de control automate, cea primară bazată pe debit, iar cea secundară pe bază de nivel. Suplimentar, punctele de referință (setpoints) ale surselor de apă au valori fixe, setate de către operatori. În plus, stația de pompare a instalației de distribuție dispune de 3 rezervoare și 3 pompe, având implementate: (i) o buclă de control bazată pe presiune pentru distribuția apei și rotirea pompelor, dependent de orele de funcționare; (ii) o buclă de control primară, bazată pe nivel, care menține nivelul din rezervoare în interiorul limitelor prin solicitarea de apă de la surse; (iii) o buclă de control secundară, bazată pe debit, pentru anticiparea cererilor mari de apă în rețeaua de distribuție, la ore critice. Sursele de apă sunt echipate/comandate cu PLC-uri, în timp ce STAP este automatizată prin alte două PLC-uri redundante, cu software SCADA de tip WinCC 7.2, cu Connectivity Pack.

Strategia SDC prezentată în acest capitol din teză are ca punct de plecare asocierea unor indicatori de calitate pentru sursele de apă ale instalației țintite, acești indicatori fiind determinați și prin utilizarea aplicației Historian. De asemenea, se definesc o serie de formule, cu ajutorul cărora SDC stabilește câte un indicator de prioritate general pentru fiecare sursă (acesta fiind calculat după determinarea a câte unui indicator de prioritate pe baza calității apei sursei și a câte unui indicator de prioritate pe baza orelor de funcționare ale sursei – gradul de uzură). Ulterior, SDC calculează un debit optim de apă pentru fiecare sursă, în funcție de indicatorul de prioritate pe baza calității respectivei surse și de debitele minim și maxim ale sursei. La final, se dezvoltă un algoritm de distribuție a debitului extensibil și adaptabil la posibilitatea de adăugare de noi surse de apă. De fapt, acest algoritm decide cum împarte debitul total solicitat de către automatizarea existentă a stației (debitul de apă la intrarea în STAP) în debite specifice pentru fiecare sursă, operațiune în care se ține seama de prioritatea generală a surselor și de debitele optime calculate de SDC. În mod simplificat, acest algoritm alege debitul minim posibil la sursa cu cea mai mică prioritate dintre cele necesare a fi pornite, debitul optim calculat de SDC la sursele cu cea mai mare prioritate și diferența de debit la sursa cu penultima prioritate dintre cele pornite, în așa fel încât să fie acoperit totalul de debit solicitat, restul de surse fiind oprite.

Intenționându-se testarea fezabilității SDC, a fost elaborat, de către membrii echipei de cercetare, un model, în Matlab-Simulink, al STAP țintite, neprezentat în teză, și s-au folosit în

aceste date reale, achiziționate cu instrumentul Historian de la instalația reală. În mod evident, în modelul din Matlab s-a utilizat SDC completă, fără constrângeri, fiind setate ca referințe de debit (setpoint) pentru sursele de apă valorile calculate de SDC. Prin aceste mijloace, s-a obținut o îmbunătățire de 9% a consumului energetic în STAP atunci când a fost folosită SDC, prin comparație cu funcționarea fără SDC. Profitând de această primă dovadă a eficienței SDC, a fost permisă autorizarea unor teste pe STAP reală de către compania de apă proprietară, însă cu impunerea unor constrângeri asupra SDC, nefiind acceptată modificarea punctelor de referință (setpoints) ale debitului surselor de apă de la valorile lor individuale fixe și nici activarea unor surse de apă adiționale, în afara celor 4 selectate din cele 6 disponibile. Cu toate acestea, soluția SDC constrânsă a fost aplicată STAP reale pentru o perioadă de 2 săptămâni și a fost executată o comparație a consumului total de energie cu o perioadă posterioară de 4 săptămâni în care nu s-a rulat SDC, rezultând o impresionantă reducere a consumului energetic, de 30%, de la o medie săptămânală de 3,5 MWh fără SDC la 2,7 MWh cu SDC.

Deși eficiența SDC a fost dovedită, membrii echipei de cercetare estimează că utilizarea unei soluții SDC neîngrădite, la potențialul său maxim, pe o stație reală, ar aduce îmbunătățiri și mai mari, argumentând că: (i) accesul a fost limitat pe instalația reală de apă potabilă, nefiind posibilă testarea pe termen lung, de câteva luni de zile; (ii) în timpul testelor s-a înregistrat o cerere mare de apă de la rețea și s-a folosit un număr mic de foraje, conjunctură care a diminuat gradele de libertate în operare; (iii) SDC a fost constrânsă, neatingându-și întregul potențial, punctele de referință (setpoints) ale debitelor surselor rămânând fixe, la valori decise arbitrar de operatori, nu de către SDC.

7. Strategie predictivă bazată pe meteorologie în SE

Capitolul cu numărul 7 revine la dezvoltarea aplicației Historian, plecând de la stadiul evolutiv al acesteia atins la finele capitolului 5. Ciclul de cercetare se focalizează asupra nivelului secund din arhitectura software de referință discutată în capitolul 4. De asemenea, au fost avute în vedere extinderi, completări și îmbunătățiri pentru implementarea practică din Historian a primului nivel din arhitectura de referință, importantă în acest sens fiind direcția integrării unor date de context în implementare, cu scopul creșterii performanței soluției. Mulțumită raportării la industria apei, cele mai potrivite astfel de date pentru domeniul în discuție sunt cele legate de condițiile meteorologice, iar influența cea mai mare a acestora, în industria apei, se resimte asupra stațiilor de epurare (SE).

Consecvent, studiile din această fază au fost îndrumate spre o SE, o caracterizare minuțioasă a proceselor care au loc într-o SE tipică fiind prezentată în teză. Succint, apa care intră în SE din rețeaua de apă uzată începe faza de pretratament, în care are loc tratarea mirosurilor, iar apoi apa trece printr-un filtru de screening, pentru îndepărtarea obiectelor mari (ramuri de copaci, pietriș, sticle, obiecte sanitare, etc.), aceste obiecte ajungând la incineratoare sau în gropi de gunoi. Mai târziu, în faza de tratament primar, apa pătrunde într-un bazin de sedimentare, unde nămolul se depune în partea de jos a bazinului, în timp ce grăsimea și uleiul se ridică la suprafață, acestea fiind extrase (nămolul pentru procesul de tratare a nămolului, pe când grăsimea și uleiul pot fi utilizate la fabricarea săpunului). Aprioric tratamentului secundar, există o ocolire opțională (bypass), care, atunci când este utilizată, trimite apa tratată direct în mediul natural, fără să mai intre în etapele următoare, protejându-se în acest fel stația de supraîncărcare hidraulică în timpul primirii unor cantități foarte mari de apă (de exemplu: ploaie abundentă). Etapa secundară de tratament face uz, în serie, atât de un bazin bioreactor, unde se introduce oxigen și un amestec biologic, cât și de un bazin de clarificare, țelul fiind eliminarea materiei organice rămase. Tratamentul terțiar neutralizează fosforul, prin aditii chimice. În aval, apa trece printr-un filtru de nisip și un filtru de cărbune, înaintea ajungerii într-un bazin de dezinfectare, unde se adaugă un alt amestec chimic, la capăt fiind un alt bazin pentru

decolorarea apei, în încercarea evitării toxicității pentru speciile acvatice. La final, apa tratată este eliberată în mediul natural. În același timp, unele stații pot fi dotate și cu un proces de tratare a nămolului derivat din curățarea apei și spălarea filtrelor.

Relativ la *problemele definitorii în SE* care rezervă preocupare și prin prisma temei acestui ciclu de cercetare, se remarcă: (i) suprasolicitarea SE, care poate să reducă eficiența tratamentului secundar sau să provoace scurgeri de nămol; (ii) consum ridicat de substanțe; (iii) costuri energetice ridicate; (iv) defecțiuni costisitoare ale echipamentelor sau ale algoritmilor de control; (v) SE subdimensionate datorită neactualizării capacității, în timp.

Pe de altă parte, funcționarea unei SE este alterată de condițiile meteorologice din aria acoperită de rețeaua de apă uzată care furnizează apă în SE, cea mai proeminentă interferență fiind cauzată de cantitatea de precipitații, care dictează folosirea canalului de bypass, dar se subliniază și temperatura, din perspectivele tratării mirosurilor, tratamentului biologic și a deshidratării nămolului, sau furtuni în timpul toamnei, care pot genera cantități mari de frunze și ramuri, cu potențial de a înfunda filtrul pentru screening.

În aceste împrejurări, implementarea soluției a debutat cu aducerea unei serii de îmbunătățiri și schimbări aplicației Historian deja formulată în capitolul 5. Pe lângă o mărire a acurateții algoritmului de la primul nivel, în loc de alegerea unei etichete (tag) de referință, s-a modificat algoritmul în așa fel încât să nu mai fie solicitată această informație și fiecare dintre caracteristicile analizate să joace, pe rând, rolul referinței, într-o succesiune de execuții multiple ale algoritmului. Cu această ajustare, rezultatele execuției algoritmului, în speță relațiile și dependențele dintre date, se stochează acum într-un graf orientat și ponderat, materializându-se o înțelegere mai largă a tuturor relațiilor, conexiunilor și dependențelor care există în interiorul sistemului supravegheat. Mai mult, s-a adăugat posibilitatea utilizării datelor meteorologice istorice (7 caracteristici diferite), procurate de la un serviciu online, drept date de intrare pentru algoritmul de nivel 1, astfel fiind calculate și dependențele etichetelor sistemului tehnic de aceste caracteristici meteorologice, rezultatele fiind adăugate aceluiași graf de dependențe. Pentru preluarea datelor meteorologice corespunzătoare, se cere utilizatorului includerea adresei stației, pe baza căreia, prin apelarea la un serviciu online, soluția Historian determină coordonatele geografice exacte pentru care se solicită datele meteorologice.

Alături de îmbunătățirile amintite, în continuare s-a studiat și implementat, prin alipirea la aplicația Historian, un algoritm de predicție a valorilor etichetelor monitorizate ale SE bazat pe o parcurgere în lățime (breadth-first search) a grafului de dependențe și unele prelucrări numerice specifice care pornesc de la prognoza meteorologică, obținută tot de la serviciul online, și folosesc relațiile identificate la primul nivel, execuția algoritmului de predicție succedând unei execuții reușite a algoritmului de la nivelul inferior. În acest mod, la ieșirea noului algoritm sunt oferite valori numerice prezise, pentru o perioadă de 7 zile de la data predicției, pentru fiecare caracteristică analizată inițial de către algoritmul de la primul nivel.

Ca ultimă parte a soluției implementate în Historian în acest capitol, o aplicație software proactivă autonomă trebuie să înțeleagă, de la un anumit stadiu al dezvoltării înainte, semnificațiile din spatele etichetelor unui sistem tehnic, conceptul de *aplicație historian conștientă de proces* (process-aware) fiind esențial pentru predicții corecte, rețete, analize relevante ale dependențelor dintre date, cât și pentru interpretarea funcțiilor obiectiv și a constrângerilor. Pe această latură, pentru implementarea practică a acestei ipoteze avangardiste, *neregăsite încă în literatură sau industrie*, a fost adăugat un nou modul soluției Historian, care permite ca utilizatorul să definească, în interfața grafică, un model al procesului desfășurat în sistemul tehnic monitorizat, model alcătuit din obiecte predefinite (Figura 6), cu proprietăți predefinite (de exemplu: pompă de apă cu consum energie, timp funcționare, status, etc.). Pentru fiecare proprietate a fiecărui obiect se poate asocia o etichetă monitorizată de către Historian, astfel încât aplicația software va putea înțelege semnificația exactă a acestor etichete, informații deosebit de prețioase pentru viitoarele manifestări în direcția optimizării. În plus, se

admite salvarea a multiple modele, facilitându-se o tranziție ușoară între monitorizarea a diferite sisteme de către aplicația Historian, fiecare model îngăduind și atașarea de constrângeri specifice, alipind o valoare numerică, o etichetă și o relație (mai mic, mai mare, egal).

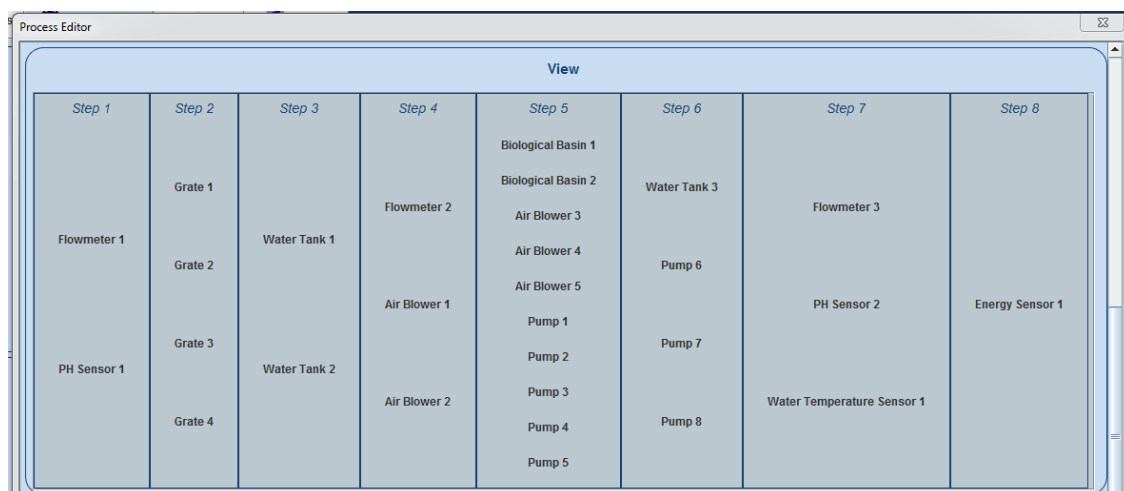


Figura 6. Proces al unei SE definit în Historian

Pentru testarea rezultatelor, soluția Historian a adunat date de la o SE reală pentru o perioadă lungă de timp, după care a fost executat algoritmul de predicție în 7 scenarii diferite de test. Pe întinderea perioadei de timp prezisă, aplicația Historian a stocat și datele reale de la SE, pentru ca, ulterior, să poată fi comparată predicția cu datele reale. Totuși, s-a observat că acuratețea generală exactă a algoritmului de predicție este foarte greu de evaluat deoarece aceasta este direct impactată de către precizia prognozei meteorologice, însă au fost identificate câteva rezultate promițătoare în perspectiva studierii unor strategii și tehnici viitoare de optimizare în SE. De exemplu, algoritmul de predicție a prezis foarte precis utilizarea unei pompe folosite la canalul de bypass din SE, care are o amprentă masivă atât asupra consumului general de electricitate al SE, cât și asupra cheltuielilor totale cu substanțele ale SE. La fel, turbiditatea apei la ieșirea din SE a fost prezisă destul de bine, anticiparea acestei caracteristici reper pentru calitatea apei favorizând estimări mai bune ale consumurilor viitoare de substanțe. Din nou, s-au evidențiat rezultate bune și la prezicerea consumului electric al suflantei bazinului biologic și a volumului de apă la admisia în SE.

Privind dintr-un alt unghi, s-a reușit conservarea unei mentalități generice în augmentarea aplicației Historian, chiar și la acest nivel, în așa fel încât aceasta nu a devenit circumscrisă industriei apei, fiind convenabilă o eventuală metamorfozare ușoară spre altă industrie, cu toate caracteristicile implementate până la acest punct.

Contribuțiile prezentate în această etapă de cercetare oferă atât îmbunătățiri primului nivel din arhitectura de referință, cât și un aport stratului secund al aceleiași arhitecturi, concomitent, pregătind și drumul pentru viitoare prospecții inovatoare.

Așadar, fiind testată pe o SE reală, transpunerea algoritmului de predicție în soluția Historian încuviințează întrederea a diverse posibile căi de optimizare de urmat în SE, într-o viitoare implementare de nivel 3 a arhitecturii de referință sprijinită pe aceste predicții.

8. Automatizarea completă a strategiei de reducere a consumului de energie din STAP

Al optulea capitol mărginește ultima etapă de cercetare, vizându-se o consonanță cu nivelul 3 din arhitectura de referință, prin integrarea strategiei de optimizare din capitolul 6 în aplicația Historian, scopul fiind dobândirea capacității de a influența funcționarea surselor de apă ale

unei STAP pentru reducerea consumului de energie, într-o operare neinvazivă, autonomă și neasistată de om. Concret, s-a abordat dificultatea identificării și adaptării automate a indicatorilor de calitate ai surselor de apă, fiind proiectată o soluționare prin intermediul analizei continue, automate, pe termen lung, în interiorul aplicației Historian. Desigur, se insistă asupra faptului că nu s-a studiat o nouă automatizare a buclei de control centrale a unei STAP, ci o automatizare globală în aplicarea unei strategii de optimizare asupra sistemului deja existent, soluția implementată în acest capitol fiind complementară soluției principale, centralizate, de control automat al unei STAP, aceasta din urmă având prioritate în operare. Deci, contribuțiile acestui capitol sunt ghidate spre umplerea golurilor care împiedică funcționarea deplin automată, pe termen lung, a strategiei dezvoltate în capitolul 6.

Mai departe, se aduc în atenție câteva aspecte specifice STAP relevante în context. Consecvent, *deoarece intervenții invazive la nivelul PLC sau SCADA al unui sistem local sunt evitate cu orice preț, din motive justificate, mai ales în infrastructura critică, precum cea de apă, singura soluție fezabilă practic de a aplica optimizări este într-un mod neinvaziv, cum ar fi substituirea referințelor într-o buclă de control locală.* Pe de altă parte, debitul total, amestecat, direcționat la intrarea STAP, în care toate sursele aflate în funcțiune introduc apă, este cel solicitat de către automatizarea STAP, ceea ce propulsează spre constatarea potrivit căreia atât modalitatea în care acest debit total este împărțit între surse, cât și alegerea acelor surse care vor fi utilizate, din ansamblul disponibil, sunt hotărâte, în practică, ținând cont numai de orele de funcționare ale surselor de apă. Pe lângă aceasta, cu cât este mai bună calitatea apei la intrarea în STAP, cu atât mai puțin tratament va fi necesar, ceea ce înseamnă un consum de energie mai mic. În termeni de calitate a apei, există diferențe sesizabile între sursele de apă, la inaugurarea unei noi surse întocmindu-se o fișă tehnică, unde sunt trecuți mai mulți parametri ai apei, după prelevarea de mostre și efectuarea unor analize de laborator. Chiar dacă, în timp, calitatea apei unei surse se modifică, analizele nu sunt repetate din motive de costuri și dificultate a prelevării probei. Oricum, analiza returnează valori pentru o multitudine de parametri, neexistând un singur parametru indicator al calității apei și nici o metodă consacrată de stabilire a acestuia din alți parametri. În aceste circumstanțe, calitatea apei nu intră în calcul în decizia de selectare a surselor de apă în operarea curentă, în nici o STAP, realitatea fiind că toate acestea funcționează peste consumul lor de energie optim.

Având la dispoziție, din cercetările precedente întreprinse în cadrul doctoral, o aplicație de tip historian pentru stocarea parametrilor de funcționare ai unui sistem tehnic (capitolul 3), un modul de identificare a dependențelor dintre date (început în capitolul 5 și îmbunătățit în capitolul 7), posibilități de cunoaștere a semnificației etichetelor monitorizate (capitolul 7) și, cel mai important, o strategie pentru scăderea consumului energetic al unei STAP prin ierarhizarea surselor sale de apă și fixarea referinței de debit pentru fiecare buclă de control locală (capitolul 6), automatizarea completă a strategiei de optimizare din capitolul 6 este blocată de: (i) inexistența unei metode automatizate în totalitate de a determina indicatorul de calitate al apei pentru fiecare sursă de apă din STAP; (ii) lipsa unei implementări software robuste atât a succesiunii de formule a SDC, cât și a algoritmului pentru repartizarea debitului total necesar între surse. Prin urmare, discontinuitățile evocate mai sus întemeiază interesul primordial al acestei ultime faze de cercetare, iar rezolvările acestor probleme monopolizează principalele contribuții științifice și practice ale etapei în cauză.

Pentru a fi posibilă folosirea unelei automate de reducere a consumului energetic, orice STAP trebuie să îndeplinească următoarele condiții: (i) să dispună de cel puțin 2 surse de apă; (ii) anumite date, precum debite sau consumuri de energie, să fie furnizate pentru o perioadă de timp înainte de aplicarea optimizării; (iii) datelor anterioare să le fie anexate înțelesurile particulare, prin modulul de rigoare din Historian; (iv) automatizarea deja prezentă în STAP este obligatoriu să aibă bucle de control implementate într-un asemenea mod încât acestea să folosească, pe post de referință (setpoint) pentru debitul de apă pe care fiecare sursă îl livrează,

valorile numerice atribuite unei etichete OPC UA.

În acest sens, s-a decis că abordarea cea mai bună pentru obținerea dezirabilei automatizări complete a strategiei de diminuare a consumului de energie ar fi integrarea acesteia în aplicația Historian, ținându-se o concordanță cu nivelul 3 din arhitectura software de referință.

În primul rând, s-a dezvoltat o metodă de a calcula indicatorul de calitate al apei pentru fiecare sursă, fără a necesita vreun fel de asistență umană sau analize și prelevări complicate de probe, prin studierea debitelor și a consumurilor de energie înregistrate în timp ce STAP a funcționat în trecut. Apoi, s-au implementat în aplicația Historian calculele conforme formulelor din SDC, pentru ca, în final, să fie implementată logica pentru divizarea debitului total solicitat în debite individuale pentru sursele de apă. Știind care dintre etichete corespund referințelor de debit ale surselor din STAP, aplicația Historian poate să scrie valorile de debit optime, calculate de strategia de reducere a consumului energetic, drept valori pentru respectivele etichete, optimizând astfel, neinvaziv, sistemul monitorizat.

În acest fel, *pentru prima dată, soluția Historian proactivă închide bucla* caracterizată în arhitectura de referință instituită în capitolul 4, devenind capabilă de monitorizarea unui sistem tehnic, analizarea datelor stocate și utilizarea concluziilor pentru a plănui o micșorare a consumului de energie în STAP, operațiile necesare fiind administrate direct sistemului, a cărui funcționare este influențată de către aplicația Historian proactivă.

În vederea testării, s-au folosit date de la o STAP reală și, prin modificări succesive în baza de date a aplicației Historian a debitului total solicitat la intrarea în stație, s-a verificat corectitudinea calculelor, precum și respectarea exactă a algoritmului de divizare a debitului propus de SDC în această automatizare completă, asimilată în soluția Historian. De fapt, eficiența SDC în reducerea consumului a fost deja demonstrată în capitolul 6, la nivelul acestui capitol fiind testată doar conformitatea automatizării din interiorul Historian cu SDC.

În concludere, această etapă de cercetare trebuie să fie interpretată drept dobândirea unei unelte integrate în interiorul unei soluții software de tip historian proactiv, care poate aplica, într-o manieră deplin automatizată, fără a necesita cooperare umană, o strategie de scădere a consumului de energie înăuntrul unei STAP, într-un mod neinvaziv în ceea ce privește automatizarea locală a stației.

9. Concluziile tezei

Pe fondul apariției și rafinării continue a principiilor IIoT și Industry 4.0 din ultimii ani, se întâlnește o creștere a cantităților de date vehiculate prin decorul automatizărilor industriale, care, împreună cu utilizarea unor aplicații software de tip historian, au generat apariția fenomenului de acumulare a datelor. În acest cadru, demersul tezei în discuție a investigat *o serie de metode și strategii prin care se poate folosi, în mod util, multitudinea de date stocate*, prin procedee înțelepte și inovative, în scopul optimizării a diverse aspecte ale sistemelor tehnice supravegheate. În plan practic, s-a detaliat *dezvoltarea unei aplicații software complexe, de tip historian proactiv*, complet funcțională, testată și validată pe sisteme reale din industria apei, capabilă de optimizări într-o manieră autonomă, automată și neasistată de om, *această aplicație fiind fără echivalent în literatură sau industrie la momentul implementării*. De asemenea, eforturile sintetizate în teză au pus umărul la înnoirea și avansul în contextul acestei Revoluții Industriale întreținute de noțiunile de Industry 4.0 și IIoT, cotizând cu *un mic pas înainte în zona sporirii inteligenței soluțiilor software industriale*.

Relativ la *contribuțiile personale*, autorul tezei revendică, în nume propriu, următoarele: (i) realizarea unui studiu amănunțit referitor la stadiul actual al cercetării în domeniul tezei [22]; (ii) deosebirea și catalogarea unor direcții de dezvoltare principale în ramura de competență a lucrării, alături de efectuarea unei analize de tip recenzie a lucrărilor științifice existente [22]; (iii) implementarea practică și testarea pe sisteme reale din industria apei a unei aplicații

software de tip historian elementare [23]; (iv) conceptualizarea și elaborarea unei arhitecturi software de referință pentru elevarea unei soluții historian elementare spre nivelul proactiv [24]; (v) efectuarea unei cercetări pentru recunoașterea proceselor și a problemelor tipice regăsite într-o STAP [24]; (vi) conceptualizarea, dezvoltarea, implementarea, integrarea în Historian și testarea practică a unui algoritm pentru identificarea dependențelor dintre datele stocate [24]; (vii) instalarea pe platforma hardware, configurarea și lansarea în exploatare, în climatul industrial, a aplicației Historian, în versiunea disponibilă în respectiva fază a evoluției sale, ale cărei rezultate au fost, ulterior, fructificate de către restul echipei în optimizarea din capitolul 6 [25]; (viii) derularea unui studiu pentru descoperirea și conspectarea proceselor particulare, problemelor definiției și a influenței meteorologice uzuale într-o SE obișnuită [26]; (ix) conceptualizarea, dezvoltarea, implementarea, integrarea în Historian și testarea practică a unui algoritm de predicție, bazat pe influența caracteristicilor meteorologice asupra unui sistem tehnic industrial [26]; (x) dezvoltarea, implementarea și integrarea în Historian a unui modul software pentru inserarea și asocierea, în aplicația Historian, a câte unui înțeles specific precis fiecărei etichete a sistemului monitorizat [26]; (xi) dezvoltarea și integrarea în Historian a unei automatizări complete a procesului de aplicare a strategiei de optimizare a consumului de energie într-o STAP [27]; (xii) colectarea unui volum mare de date, cu aplicația în cauză, provenite de la structuri tehnice reale, din industria apei, care au servit la testarea, în diverse momente, a celor mai noi completări ale formulării Historian [23][24][25][26][27]; (xiii) căutarea și inspectarea, pe de o parte, a alternativelor software care includ potențial de refolosire, și, pe de altă parte, a uneltelor și serviciilor disponibile care ar fi putut fi utilizate pentru împlinirea scopurilor din fiecare fază de cercetare [23][24][25][26][27].

În privința diseminării informațiilor, în decursul studiilor doctorale curente au fost publicate 7 articole științifice de specialitate, dintre care 2 la conferințe și 5 în jurnale, toate fiind indexate în bazele de date Web of Science Core Collection.

Direcțiile viitoare de cercetare și dezvoltare sunt numeroase, cele mai importante dintre acestea fiind: (i) evaluarea unor abordări bazate pe tehnologiile de Machine Learning și inteligență artificială la primul nivel al arhitecturii de referință, pentru identificarea de dependențe între date; (ii) adăugarea altor date de context, în afara celor meteorologice, atât la primul nivel al arhitecturii, cât și la nivelul secund, urmărind o îmbunătățire a exactității algoritmului de predicție; (iii) studierea și adăugarea în aplicația Historian a unor noi obiective de optimizare, pe lângă reducerea costurilor în STAP prin prioritizarea surselor de apă; (iv) studierea unor tactici și metode pentru a menține întotdeauna apa de la ieșirile din stații în proximitatea extremității inferioare acceptate legal a calității, însă fără depășirea acestei granițe, cu scopul optimizării costurilor operaționale; (v) investigarea de mijloace de avertizare, cu autodeclanșare, a personalului calificat, în legătură cu suprasarcini sau suprasolicitări care vor apărea în viitor la echipamente, folosind predicția existentă a evoluției viitoare din SE pentru protejarea predictivă a aparaturii industriale; (vi) implementarea unui server OPC UA în interiorul soluției Historian pentru a pune la dispoziție datele stocate către alți agenți externi, inclusiv calculatoare, scripturi, automatizări; (vii) dezvoltarea aplicației Historian astfel încât să stăpânească o gamă largă de alte protocoale, pe lângă OPC UA, prin interpunerea cărora să poată decurge comunicarea cu sistemul tehnic monitorizat; (viii) determinarea unei strategii automate de rulare periodică a algoritmilor necesari, fiind indispensabilă stabilirea intervalelor de timp ideale dintre aceste rulări și dintre intervențiile, prin noi ajustări, asupra sistemului supravegheat; (ix) evaluarea alternativelor existente pentru substituirea utilizării Node-Red cu o alcătuire care să citească valorile etichetelor monitorizate direct în aplicația principală Java, preferabil cu o singură livrare complexă, în calup, a tuturor valorilor cerute, în locul manierei secvențiale curente din Node-Red, obținându-se în acest mod o îmbunătățire a performanței aplicației Historian prin eliminarea gestionării unui alt proces al sistemului de operare; (x) implementarea stabilirii obiectelor predefinite și a caracteristicilor acestora în afara aplicației

Historian, într-un fișier XML, verificat în aplicație prin tehnologia DTD, în așa fel încât să fie ușurată adaptarea soluției pentru alte industrii prin înlăturarea, în acest caz, a imperativității efectuării de modificări în codul sursă; (xi) actualizarea și reimaginarea părții artistice, coloristice, a înfățișării generale a interfeței grafice cu utilizatorul a aplicației Historian, care lasă puțin de dorit, față de standardele de astăzi, pentru a se putea profita de un eventual potențial de valorificare comercială a aplicației; (xii) cercetarea modurilor în care funcționalitățile aplicației Historian ar putea aduce beneficii în alte industrii, prin aprofundarea proceselor particulare din respectivele industrii și o eventuală adaptare a soluției pentru notele distinctive de rigoare, alături de urmărirea unor obiective de optimizare proprii pentru acel sector de activitate.

Bibliografie selectivă

- [1] M. Pinzone, P. Fantini, S. Perini, S. Garavaglia, M. Taisch, G. Miragliotta, “Jobs and Skills in Industry 4.0: An Exploratory Research”, IFIP Advances in Information and Communication Technology: Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing, vol. 513, pp. 282–288, 2017.
- [2] A. Ustundag, E. Cevikcan, “Industry 4.0: Managing The Digital Transformation”, Springer International Publishing, Elveția, 2018.
- [3] Y. Liao, F. Deschamps, E. Loures, L. Ramos, “Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal”, International Journal of Production Research, pp. 1–21, 2017.
- [4] S. Jeschke, C. Brecher, T. Meisen, D. Ozdemir, “Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems”, Springer International Publishing, Elveția, 2016.
- [5] H. Xu, W. Yu, D. Griffith, N. Golmie, “A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective”, IEEE Access, vol. 6, pp. 78238–78259, 2018.
- [6] A. Gilchrist, “Industry 4.0: The Industrial Internet of Things”, Apress, New York, SUA, 2016.
- [7] I. Gonzalez, A. J. Calderon, J. Figueiredo, J. M. C. Sousa, “A Literature Survey on Open Platform Communications (OPC) Applied to Advanced Industrial Environments”, Electronics Journal, vol. 8 (issue 5), 2019.
- [8] H. Haskamp, M. Meyer, R. Mollmann, F. Orth, A. Colombo, “Benchmarking of existing OPC UA implementations for Industrie 4.0-compliant digitalization solutions”, IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germania, pp. 589–594, 2017.
- [9] A. Gogolev, F. Mendoza, R. Braun, “TSN-Enabled OPC UA in Field Devices”, IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Torino, Italia, pp. 297–303, 2018.
- [10] M. Ehrlich, D. Krummacker, C. Fischer, R. Guillaume, S. S. P. Olaya, A. Frimpongk, H. de Meer, M. Wollschlaeger, H. D. Schotten, J. Jasperneite, “Software-Defined Networking as an Enabler for Future Industrial Network Management”, IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Torino, Italia, pp. 1109–1112, 2018.
- [11] T. J. Schoepf, “White paper: The road to plug-and-produce”, Lumberg Automation, Tech. Rep., 2016.
- [12] B. Vogel-Heuser, J. Mund, M. Kowal, C. Legat, J. Folmer, S. Teufl, I. Schaefer, “Towards interdisciplinary variability modeling for automated production systems: Opportunities and challenges when applying delta modeling: A case study”, IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Cambridge, Marea Britanie, pp. 322–328, 2015.

- [13] F. Pauker, S. Wolny, S. M. Fallah, M. Wimmer, “UML2OPC-UA — transforming UML class diagrams to OPC UA information models”, 11th Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME), Napoli, Italia, 2017.
- [14] A. Wurger, K. H. Niemann, A. Fay, “Concept for an Energy Data Aggregation Layer for Production Sites: A combination of AutomationML and OPC UA”, IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Torino, Italia, pp.1051–1055, 2018.
- [15] M. Aazam, S. Zeadally, K. A. Harras, “Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14 (issue 10), pp. 4674–4682, 2018.
- [16] J. H. Huh, Y. S. Seo, “Understanding Edge Computing: Engineering Evolution With Artificial Intelligence”, IEEE Access, vol. 7, pp. 164229-164245, 2019.
- [17] R. Khan, K. McLaughlin, B. Kang, D. Laverty, S. Sezer, “A Secure Cloud Migration, Monitoring and Analytics Framework for Industrial Internet of Things”, IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), New Orleans, SUA, 2020.
- [18] O. Meyer, G. Rauhoeft, D. Schel, D. Stock, “Industrial Internet of Things: covering standardization gaps for the next generation of reconfigurable production systems”, IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Porto, Portugalia, pp. 1039–1044, 2018.
- [19] H. Mala-Jetmarova, N. Sultanova, D. Savic, “Lost in Optimisation of Water Distribution Systems? A literature Review of System Design”, Water Journal, vol. 10 (issue 3), 2018.
- [20] S. Chowdhury, “Water quality degradation in the sources of drinking water: an assessment based on 18 years of data from 441 water supply systems”, Environmental Monitoring and Assessment, vol. 190, 2018.
- [21] A. Durán-Sánchez, J. Álvarez-García, E. González-Vázquez, M. C. Del Río-Rama, “Wastewater Management: Bibliometric Analysis of Scientific Literature”, Water Journal, vol. 12 (issue 11), 2020.
- [22] A. Nicolae, A. Korodi, I. Silea, “An Overview of Industry 4.0 Development Directions in the Industrial Internet of Things Context”, Romanian Journal of Information Science and Technology (ROMJIST), vol. 22 (issue 3-4), pp. 183-201, 2019.
- [23] A. Nicolae, A. Korodi, “Node-Red and OPC UA Based Lightweight and Low-Cost Historian with Application in the Water Industry”, IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Porto, Portugalia, pp. 1012–1017, 2018.
- [24] A. Nicolae, A. Korodi, I. Silea, “Identifying Data Dependencies as First Step to Obtain a Proactive Historian: Test Scenario in the Water Industry 4.0”, Water Journal, vol. 11 (issue 6), 2019.
- [25] A. Korodi, R. Crişan, A. Nicolae, I. Silea, “Industrial Internet of Things and Fog Computing to Reduce Energy Consumption in Drinking Water Facilities”, Processes Journal, vol. 8 (issue 3), 2020.
- [26] A. Nicolae, A. Korodi, I. Silea, “Weather-Based Prediction Strategy inside the Proactive Historian with Application in Wastewater Treatment Plants”, Applied Sciences Journal, vol. 10 (issue 9), 2020.
- [27] 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 Journal, vol. 21 (issue 7), 2021.