



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE
ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI
FACULTATEA DE ENERGETICĂ



Școala Doctorală de Inginerie Energetică

TEZĂ DE DOCTORAT

CERCETĂRI PRIVIND SISTEMELE INTEGRATE
DE MANAGEMENT ENERGETIC ÎN CLĂDIRI

Autor: Drd. Ing. Ștefăniță PLUTEANU

Conducător de doctorat: Prof. Dr. Ing. Roxana PĂTRAȘCU

BUCUREȘTI 2025

UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI
FACULTATEA DE ENERGETICĂ



TEZĂ DE DOCTORAT

CERCETĂRI PRIVIND SISTEMELE INTEGRATE DE MANAGEMENT ENERGETIC ÎN CLĂDIRI

Autor: Drd. Ing. Ștefăniță PLUTEANU

Conducător de doctorat: Prof. Dr. Ing. Roxana PĂTRAȘCU

Președinte	Prof. Dr. Ing. Radu PORUMB	De la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, România.
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. Roxana PĂTRAȘCU	De la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, România.
Referent	Prof. Dr. Ing. Rodica FRUNZULICĂ	De la Universitatea Tehnică de Construcții București, România.
Referent	Prof. Dr. Ing. Dorin Romeo BICĂ	De la Universitatea de Medicină, Farmacie, Științe și Tehnologie „George Emil Palade” din Târgu Mureș, România.
Referent	Conf. Dr. Ing. Vladimir TANASIEV	De la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, România.

BUCUREȘTI 2025

Lista figurilor

Figura 2.1 Fluxul de date IoT bazat pe conceptul „edge”	4
Figura 3.1 Arhitectura IoT în comparație cu modelele OSI și TCP/IP	5
Figura 3.2 Diagramă de flux logic pentru o rețea IoT	6
Figura 3.3 Infrastructură de rețea virtualizată [4]	6
Figura 3.4 Agregarea datelor colectate folosind NodeRed	7
Figura 3.5 Vizualizarea datelor în platforma Grafana	7
Figura 5.1 Model de implementare DSM	11
Figura 6.1 Soluție de monitorizare detaliată a site-ului la distanță	14
Figura 6.2 Tabloul electric general al clădirii CAMPUS	14
Figura 6.3 Montajul transformatoarelor de curent	15
Figura 6.4 Arhitectura rețelei actuale de management energetic integrat	15
Figura 6.5 Diagramă flux logic – algoritmi de învățare automată	15
Figura 6.6 Vizualizarea datelor în timp real și prognozate	16

CUPRINS

Lista figurilor	i
1. Introducere.....	1
1.1. Contextul și relevanța lucrării	1
1.2. Metodologia de cercetare adoptată.....	2
1.3. Impactul rezultatelor.....	2
2. Stadiul actual al tehnologiei și tendințe în managementul energetic	3
2.1. Reglementările europene și naționale privind eficiența energetică în clădiri	3
2.2. Tehnologii actuale pentru monitorizarea și optimizarea consumurilor energetice	4
3. Arhitectura sistemelor integrate de management energetic bazate pe IoT	5
3.1. Arhitectura și topologiile rețelelor IoT pentru sisteme integrate	5
3.2. Monitorizarea și procesarea datelor în timp real	6
4. Algoritmi de predicție și optimizare consumurilor energetice	8
4.1. Ipoteze de calcul și metode de utilizare a algoritmilor de predicție	8
4.2. Tehnici de machine learning pentru optimizare predictivă	8
5. Programe de Demand-Side Management (DSM)	10
5.1. Considerații teoretice privind programele DSM	10
5.2. Efectele programelor DSM în managementul consumurilor energetice	10
6. Validarea rezultatelor cercetării în aplicații implementate din cadrul campusului POLITEHNICA București.....	12
6.1. Dezvoltarea și implementarea soluțiilor în campusul universitar – POLITEHNICA București.....	12
6.2. Arhitectura sistemului de management energetic integrat – POLITEHNICA București	13
7. Concluzii și perspective de dezvoltare a cercetării	17
7.1. Rezultate obținute.....	17
7.2. Contribuții originale	18
7.3. Publicații științifice.....	20
Bibliografie	22

1. Introducere

Avansul tehnologic din ultimele decenii a determinat schimbări semnificative în modul de gestionare a energiei, accentuând necesitatea utilizării unor soluții integrate pentru optimizarea consumului în clădirile rezidențiale și terțiare. Integrarea sistemelor de management energetic bazate pe tehnologii emergente, cum ar fi Internet of Things (IoT) și Internet of Energy (IoE), reprezintă o direcție esențială în creșterea eficienței energetice și reducerea impactului asupra mediului. În acest context, prezenta teză își propune să cerceteze și să dezvolte soluții inovatoare de integrare a sistemelor inteligente de monitorizare și optimizare a consumului energetic, având ca obiectiv fundamental creșterea sustenabilității și a eficienței operaționale în cadrul infrastructurilor moderne.

Unul dintre elementele de noutate ale acestei cercetări constă în dezvoltarea și implementarea unui sistem modular și scalabil, care poate fi adaptat la evoluțiile tehnologice și care asigură o granularitate ridicată a datelor colectate și monitorizate în timp real. Acest sistem permite o evaluare precisă a performanței energetice și contribuie la înțelegerea detaliată a tiparelor de consum, facilitând luarea unor decizii bazate pe date pentru optimizarea utilizării resurselor. Prin integrarea tehnologiilor de predicție a consumului energetic și a programelor de Demand-Side Management (DSM), soluția propusă oferă un cadru modern pentru îmbunătățirea relației dintre consumatori și furnizori.

1.1. Contextul și relevanța lucrării

Gestionarea eficientă a resurselor energetice reprezintă una dintre provocările majore ale societății moderne, având un impact direct asupra sustenabilității economice și de mediu. Clădirile sunt responsabile pentru un procent semnificativ din consumul global de energie, iar optimizarea acestora prin integrarea tehnologiilor inteligente devine o prioritate strategică. În acest sens, managementul energetic inteligent, bazat pe monitorizare avansată, predicție digitalizată și automatizare, reprezintă o soluție viabilă pentru reducerea pierderilor energetice și creșterea eficienței energetice.

Dezvoltarea tehnologiilor IoT și IoE a facilitat tranziția către sisteme inteligente de management energetic, care permit colectarea și analiza datelor în timp real, oferind o perspectivă detaliată asupra consumurilor și oportunităților de optimizare. În acest context, prezenta teză analizează beneficiile aduse de aceste tehnologii, precum și provocările asociate implementării lor în infrastructurile moderne.

În plus, această cercetare evidențiază necesitatea implementării programelor DSM, care facilitează o utilizare mai echilibrată a energiei, sprijinind atât consumatorii, cât și furnizorii de energie. Prin integrarea acestor abordări, se pot dezvolta soluții eficiente pentru gestionarea consumului energetic în clădirile rezidențiale și terțiare, contribuind la reducerea amprentei de carbon și optimizarea costurilor de exploatare.

1.2. Metodologia de cercetare adoptată

În cadrul acestei teze, a fost dezvoltată o metodologie structurată pentru implementarea și analiza sistemelor de management energetic integrat, având ca scop optimizarea consumurilor energetice și creșterea eficienței infrastructurilor existente. Această metodologie se bazează pe o abordare multidisciplinară, care combină tehnologiile IoT, analiza predictivă și automatizarea proceselor de monitorizare.

Un aspect esențial al metodologiei constă în elaborarea unei strategii structurate de implementare pentru un sistem de management energetic integrat. Aceasta presupune:

- Identificarea necesității și obiectivele sistemului,
- Stabilirea topologiei de rețea și a protocoalelor de comunicație,
- Definirea infrastructurii hardware și software,
- Configurarea și instalarea echipamentelor,
- Implementarea sistemului de gestionare, vizualizare și prelucrarea a datelor,
- Implementarea algoritmilor de predicție care să furnizeze prognoze pentru optimizarea consumului energetic,
- Implementarea soluțiilor de eficiență energetică.

În ceea ce privește analiza impactului economic, metodologia include o evaluare generală a beneficiilor financiare ale soluției propuse. Au fost realizate estimări privind eficiența implementării sistemului, inclusiv analiza costurilor inițiale și identificarea unor economii potențiale rezultate din optimizarea consumurilor energetice. Această evaluare a permis conturarea unei perspective asupra rentabilității sistemului.

În final, metodologia propusă a fost validată prin rezultatele și simulările cercetării realizate în campusul POLITEHNICA București. Aceste teste au demonstrat capacitatea soluției de a îmbunătăți gestionarea consumului de energie și de a oferi o mai mare granularitate în monitorizare. Validarea practică a soluției a confirmat aplicabilitatea metodologiei propuse în infrastructuri complexe.

1.3. Impactul rezultatelor

Rezultatele obținute în această cercetare demonstrează că integrarea unui sistem inteligent de management energetic conduce la o reducere semnificativă a consumului de energie și a emisiilor de CO₂. Monitorizarea granulară a consumurilor a permis identificarea punctelor de ineficiență, iar implementarea algoritmilor de predicție a contribuit la optimizarea utilizării resurselor.

Un alt beneficiu major al sistemului propus este crearea unei relații de bună colaborare între consumatori și furnizori, prin integrarea programelor DSM. Această abordare îmbunătățește modul de gestionare a cererii de energie, contribuind la reducerea congestiilor în rețelele electrice și la utilizarea inteligentă a energiei în perioadele de vârf. Mai mult, implementarea algoritmilor de predicție oferă capacitatea de anticipare a fluctuațiilor consumului, optimizând utilizarea de energie.

2. Stadiul actual al tehnologiei și tendințe în managementul energetic

Acest capitol prezintă o analiză a literaturii de specialitate cu privire la tehnologiile și tendințele actuale în managementul energetic integrat. Capitolul prezintă reglementările europene și naționale privind eficiența energetică în clădiri, punând accent pe provocările întâmpinate în integrarea sistemelor energetice moderne. Sunt abordate soluțiile tehnologice actuale pentru monitorizarea și eficiența energetică, precum și importanța integrării tehnologiilor IoT în managementul energetic eficient.

2.1. Reglementările europene și naționale privind eficiența energetică în clădiri

În cadrul acestui subcapitol, sunt abordate reglementările europene și naționale privind eficiența energetică în clădiri, care urmăresc reducerea consumurilor energetice și a emisiilor de carbon.

Legislația națională transpune reglementările impuse de Uniunea Europeană în contextul eficienței energetice la nivelul clădirilor. Reglementările sunt integrate în cadrul legislativ național prin strategii și programe care vizează îmbunătățirea eficienței energetice în clădiri existente și construcții noi. Implementarea acestor măsuri la nivel național este o provocare tehnico-economică, dar este esențială pentru a asigura conformitatea cu obiectivele europene de minimizarea consumurilor energetice și reducerea amprentei de carbon.

În 2022, consumul final de energie în UE a fost de 37,771 PJ, sectorul industrial reprezentând 25.1% din total, iar gospodăriile 26.9% [1]. Sectorul terțiar, cunoscut în mare parte ca sectorul serviciilor, joacă un rol semnificativ în sectorul clădirilor și a reprezentat 9.0% din consumul final de energie în UE [1].

În cadrul Uniunii Europene, clădirile reprezintă aproximativ 40% din consumul total de energie și sunt responsabile pentru 36% din emisiile de gaze cu efect de seră. Totodată, se estimează că trei sferturi dintre acestea nu sunt eficiente energetic. [2]

Legislația din România referitoare la implementarea sistemelor de contorizare inteligentă a fluxului de energie electrică impune integrarea punctelor de consum în rețelele de contorizare inteligentă, facilitând astfel transferul bidirecțional de date. [3]

Acest cadru legislativ subliniază importanța contorizării inteligente în îmbunătățirea managementului energiei și a eficienței.

2.2. Tehnologii actuale pentru monitorizarea și optimizarea consumurilor energetice

Integrarea dispozitivelor IoT și a soluțiilor BIM reprezintă o direcție de dezvoltare semnificativă în domeniul sistemelor de management energetic. Complementar BIM, tehnologiile IoT joacă un rol esențial în monitorizarea și gestionarea consumurilor energetice pe întreg ciclul de viață al clădirii.

Prin colectarea datelor de la dispozitivele IoT și integrarea lor cu modelele BIM, clădirile monitorizate și controlate. Acest tip de abordare permite o virtualizare eficientă a clădirilor, îmbunătățind performanța și adaptabilitatea la cerințele energetice dinamice și în contextul soluțiilor de eficiență energetică. IoT oferă capacitatea de a furniza date în timp real despre consumurile de energie și starea sistemelor, în timp ce BIM structurează aceste date într-un model 3D al clădirii monitorizate.

Un sistem BEMS poate fi construit pe baza integrării IoT și BIM, structurat pe mai multe niveluri, similar cu modelul TCP/IP. Acest model integrat permite optimizarea utilizării resurselor și adaptarea la schimbările din mediul construit, crescând eficiența energetică și reducând impactul asupra mediului.

Integrarea tehnologiilor IoT în sistemele de management al energiei deschide noi oportunități pentru o gestionare inteligentă și optimizată a resurselor energetice. Campusurile universitare, datorită dimensiunii și complexității lor, reprezintă un cadru ideal pentru implementarea și testarea acestor soluții, având potențialul de a evidenția avantajele pe termen lung ale acestor inovații. [6]

Un concept esențial pentru integrarea tehnologiilor IoT în sisteme de management cu cerințe complexe este reprezentat de „edge computing”. Prin acest model, datele generate la nivel local sunt prelucrate fie pe dispozitivele fizice, fie transmise către servere centrale pentru analiză și luarea deciziilor. În figura 2.1 este prezentat fluxul de date IoT bazat pe conceptul „edge”.

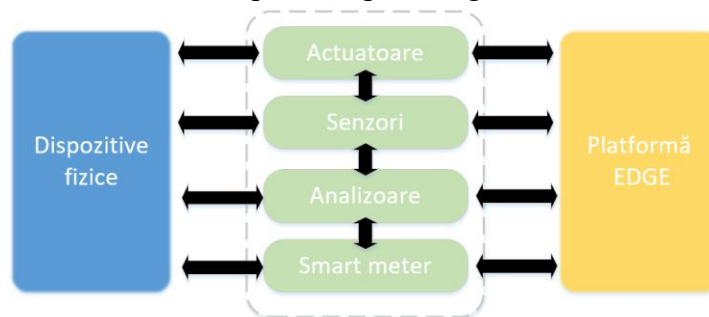


Figura 2.1 Fluxul de date IoT bazat pe conceptul „edge”

Platformele „edge” sunt cruciale în agregarea și prelucrarea datelor din rețelele locale, permițând gestionarea aplicațiilor și dispozitivelor conectate, oferind astfel soluții IoT complete și integrate. De asemenea, aceste platforme pot fi conectate la alte sisteme IoT externe pentru a extinde capabilitățile de management și analiza datelor la un nivel superior.

3. Arhitectura sistemelor integrate de management energetic bazate pe IoT

Acest capitol prezintă arhitectura sistemelor IoT – Internet of Things utilizate în cadrul sistemelor integrate de management energetic. Rolul IoT și IoE - Internet of Energy în optimizarea consumului energetic este analizat din punct de vedere al topologiilor și arhitecturilor de rețea. Aspectele principale tratate includ protocoalele de comunicație, soluțiile de securizare privind transmiterea datelor și tehnologiile folosite pentru monitorizarea și procesarea datelor. De asemenea, este prezentată structura hardware și software a sistemelor inteligente de management energetic, în contextul monitorizării și controlului fluxurilor de energie.

3.1. Arhitectura și topologiile rețelelor IoT pentru sisteme integrate

O arhitectură de rețea este alcătuită dintr-o topologie, un tip de cablu, o metodă de acces și un protocol de comunicație. Arhitectura IoT, comparativ cu modelele OSI și TCP/IP, demonstrează diferitele straturi implicate în comunicarea și procesarea datelor (figura 3.1).

Rețeaua IoT cuprinde senzori, contoare inteligente și actuatore conectate prin gateway-uri, PLC-uri și router-e pentru a asigura un flux de date și o comunicare fără întreruperi în întregul sistem. Senzorii desfășurați la fiecare site sunt responsabili pentru colectarea datelor în timp real despre consumul de energie și parametrii de mediu, care sunt apoi transmise la serverul central prin MQTT pentru procesare și analiză.

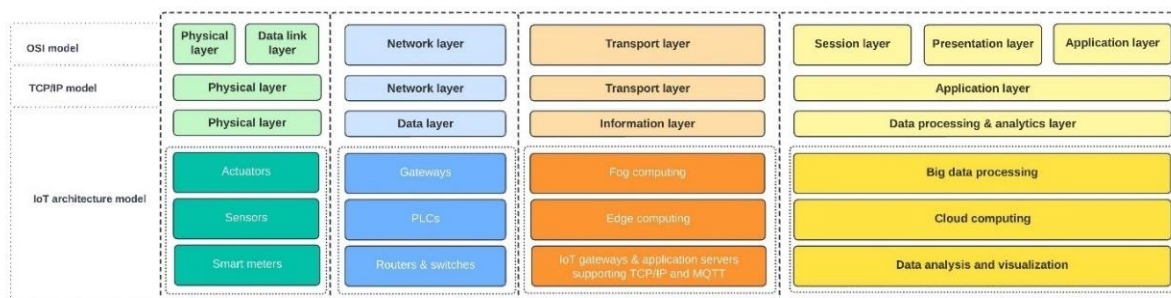


Figura 3.1 Arhitectura IoT în comparație cu modelele OSI și TCP/IP

Diagrama de flux logic propusă pentru arhitectura IoT (figura 3.2) conturează interacțiunea dintre diferitele componente ale sistemului. [7]

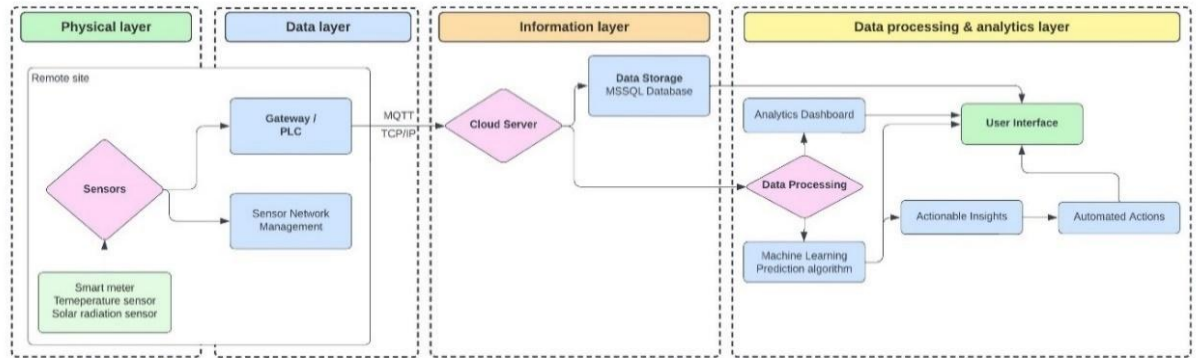


Figura 3.2 Diagramă de flux logic pentru o rețea IoT

În contextul modern al clădirilor inteligente și al eficienței energetice, arhitectura sistemelor de management energetic inteligent joacă un rol crucial în optimizarea resurselor și reducerea costurilor operaționale. În centrul acestor soluții se află tehnologii precum **VMware ESXi**, o platformă de virtualizare de tip bare-metal care oferă flexibilitate și redundanță în administrarea resurselor IT.

În figura 3.3 este prezentată o arhitectura de servere virtualizată.

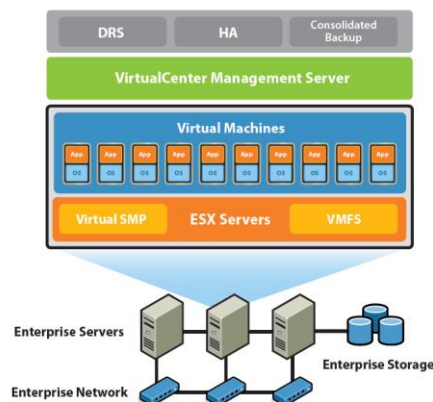


Figura 3.3 Infrastructură de rețea virtualizată [4]

3.2. Monitorizarea și procesarea datelor în timp real

În cadrul acestui subcapitol, este analizată metodologia implementată pentru colectarea, procesarea și interpretarea datelor dintr-un sistem integrat de management energetic bazat pe IoT. Se evidențiază arhitectura rețelei utilizate, protocoalele de comunicare și metodele de prelucrare a datelor pentru optimizarea consumului energetic. Integrarea tehnologiilor IoT permite obținerea unui nivel ridicat de granularitate a informațiilor, facilitând astfel identificarea anomaliilor și luarea deciziilor bazate pe date în timp real.

O soluție de control, monitorizare și procesare a datelor este bazată pe arhitectura IoT. Soluția este concepută pentru a comunica cu sistemul de monitorizare IoT, care schimbă date cu unitatea de control prin protocolul Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) și serviciile web RESTful API. Rețeaua IoT utilizează

un server central care agregă datele de la contoare inteligente și senzori prin protocoale de comunicare.

Arhitectura IoT este construită pe mai multe straturi, fiecare cu un rol specific în procesarea datelor. Stratul de comunicare utilizează protocoale precum Modbus pentru a transmite datele de la contoarele inteligente la unitățile de control, iar ulterior către serverul central prin MQTT și TCP/IP pentru analiză și monitorizare continuă. Sistemul permite o analiză predictivă și o monitorizare în timp real a consumului energetic.

Datele colectate din rețeaua IoT sunt monitorizate și analizate prin utilizarea **Node-RED**, o platformă open-source care permite vizualizarea datelor și gestionarea acestora prin intermediul unui flux de noduri. **Node-RED** este folosit pentru a agrega, prelucra și transmite datele de la contoarele inteligente către un server central, unde sunt integrate în baza de date **Microsoft SQL** pentru o analiză detaliată.

Un exemplu de flux de date NodeRed este ilustrat în figura 3.4, unde fiecare contor de energie este conectat printr-un nod individual. Aceste noduri sunt configurate pentru a colecta datele de la contoarele inteligente și a le transmite către funcții de preprocesare sau agregarea datelor pe intervale de timp predefinite. După ce datele sunt prelucrate, acestea sunt trimise către nodul central, care le integrează într-un format adecvat pentru stocare în baza de date SQL.

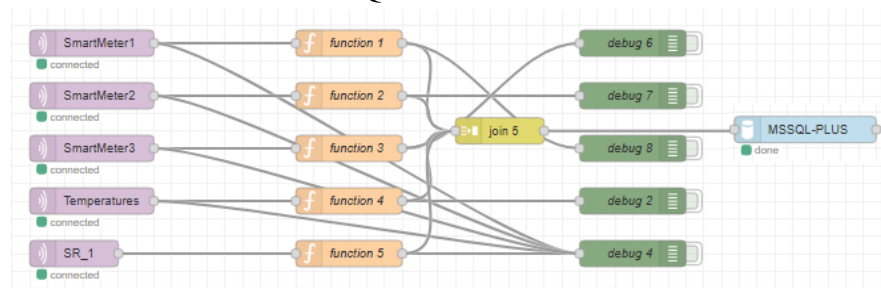


Figura 3.4 Agregarea datelor colectate folosind NodeRed

Un alt aspect esențial al procesului de monitorizare este utilizarea platformelor de vizualizare a datelor, cum ar fi soluția open-source **Grafana**, care oferă o interfață intuitivă pentru interpretarea și analiza evoluției consumului energetic (figura 3.5).

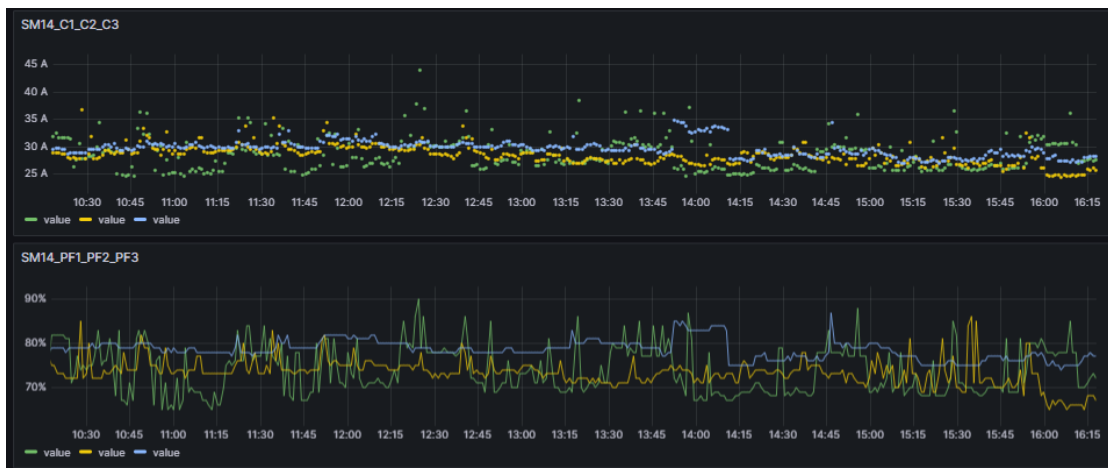


Figura 3.5 Vizualizarea datelor în platforma Grafana

4. Algoritmi de predicție și optimizare consumurilor energetice

Acest capitol abordează diverse metode și algoritmi de predicție și optimizare a consumurilor energetice. Au fost abordați algoritmi de machine learning al regresiei liniare, modelului ARIMA și modelul LSTM, toate folosite pentru a estima consumurile de energie.

4.1. Ipoteze de calcul și metode de utilizare a algoritmilor de predicție

În acest subcapitol sunt discutate trei modele predictive principale: regresia liniară, ARIMA și rețelele neuronale LSTM, fiecare având rolul de a prognoza evoluțiile viitoare pe baza datelor istorice de consum energetic.

Utilizarea acestor modele este esențială pentru optimizarea consumurilor de energie, fiind integrată în sistemele de management energetic inteligente din campus. Pe baza datelor colectate în timp real și a capacității algoritmilor de a învăța din datele anterioare, se pot realiza predicții mai precise și ajustări dinamice ale consumului. Fiecare model aduce avantaje și provocări distincte, iar alegerea optimă depinde de tipul și complexitatea datelor disponibile.

De asemenea, această secțiune va analiza limitele și aplicabilitatea fiecărui algoritm, contribuind astfel la dezvoltarea unui cadru teoretic solid pentru managementul eficient al energiei.

Pentru a compara acuratețea predicțiilor fiecărui algoritm, s-au luat în considerare următoarele ipoteze de calcul:

- aplicarea algoritmilor pe același set de date,
- monitorizarea unui singur circuit electric,
- utilizarea aceluiași interval orar pentru datele analizate.

4.2. Tehnici de machine learning pentru optimizare predictivă

Învățarea automată (ML) implică derivarea unei acțiuni sau a unui rezultat din observații sau intrări de date. Conceptual, ML funcționează ca o formulă matematică complexă care procesează intrările pentru a genera rezultate prin modele învățate. Antrenarea unui model ML implică identificarea formulei optime pentru perechile specifice de intrare-ieșire și eșantionul de date analizate.

Lista algoritmilor este prezentată în ordine crescătoare în funcție de gradul de complexitate și necesarul de putere de calcul. Fiecare descriere include metodologia algoritmului și relevanța acestuia pentru predicția valorilor măsurate în sistemele de management energetic integrat.

Regresia Liniară

Regresia liniară se bazează pe o corelație directă între o variabilă de ieșire și una sau mai multe variabile de intrare, ceea ce o face potrivită pentru estimarea unor parametri precum consumul de energie sau tensiunea, utilizând un set de factori predictivi.

Modele ARIMA

ARIMA integrează autoregresia (AR), diferențierea integrată (I) și media mobilă (MA) pentru a modela și analiza serii temporare. Este util pentru predicția datelor secvențiale în rețele electrice, cum ar fi predicția încărcării viitoare sau a cererii de energie.

Rețele Neuronale LSTM

Modelele LSTM sunt o extensie a rețelelor neuronale recurente (RNN), concepute pentru a atenua problema disipării gradientului și pentru a modela eficient relațiile dintre date pe perioade extinse de timp.

Prin valorificarea acestor algoritmi avansați de învățare automată, soluția propusă de monitorizare a energiei poate oferi o abordare cuprinzătoare și eficientă pentru managementul energiei clădirilor, îmbunătățind și optimizând utilizarea energiei în întregul campus POLITEHNICA București. Compararea va permite identificarea celei mai eficiente metode pentru predicția valorilor măsurate în rețelele electrice, asigurând o gestionare eficientă a resurselor energetice. Prelucrarea datelor pentru eliminarea anomaliilor și corectarea erorilor de măsurare este esențială pentru a asigura acuratețea și fiabilitatea predicțiilor.

5. Programe de Demand-Side Management (DSM)

În acest capitol sunt introduse și prezentate conceptele teoretice și aplicative legate de programele de tip Demand-Side Management (DSM), care au ca scop optimizarea consumurilor energetice prin implicarea utilizatorilor finali și a furnizorilor de energie.

5.1. Considerații teoretice privind programele DSM

Acest subcapitol prezintă conceptele fundamentale ale programelor de management al cererii de energie (DSM), evidențiind rolul lor în influențarea consumurilor de energie. De asemenea, se discută impactul economic și energetic al implementării acestor programe, subliniind beneficiile lor pentru consumatori și furnizori.

Programele DSM pot reprezenta o soluție alternativă la extinderea infrastructurii energetice pentru generarea, transportul, distribuția și furnizarea energiei, oferind în același timp o oportunitate pentru afacerile din sectorul eficienței energetice. DSM se concentrează pe utilizarea mai eficientă a energiei, implicând costuri mult mai reduse decât extinderea capacităților de generare și distribuție.

Preocupările legate de eficiența energetică pot fi inițiate fie la nivel individual, de către consumatori, fie la nivel general, prin programe naționale sau inițiative guvernamentale.

DSM poate fi aplicat într-o varietate de moduri, printre care se numără:

- reducerea vârfurilor de sarcină prin managementul cererii de energie;
- optimizarea consumului prin umplerea golurilor de sarcină;
- modificarea cererii de energie în timpul vârfurilor de sarcină;
- conservarea strategică a energiei, în special la nivelul Sistemului Energetic Național (SEN);
- stimularea creșterii consumului de energie electrică în transport, în favoarea combustibililor fosili. [5]

5.2. Efectele programelor DSM în managementul consumurilor energetice

În acest subcapitol sunt analizate efectele implementării programelor DSM asupra managementului consumurilor energetice. Programele au ca obiectiv optimizarea utilizării energiei prin influențarea cererii, din partea consumatorilor și a furnizorilor.

Prin aplicarea unor strategii specifice de eficientizare, programele DSM contribuie la reducerea vârfurilor de sarcină, la redistribuirea consumului și la

conservarea resurselor energetice, toate acestea având un impact direct asupra performanței energetice și economice.

Programele DSM sunt orientate către segmente specifice de consumatori sau către eliminarea barierelor identificate în utilizarea finală eficientă a energiei. Un accent deosebit este pus pe inițiativele care promovează schimbările comportamentale la consumatorii rezidențiali, precum și pe parteneriate între furnizori, guverne și ESCO, pentru a derula programe ample de eficientizare a consumurilor energetice.

Controlul asupra costurilor și tarifelor devine posibil atunci când furnizorii pot ajusta cererea de energie în funcție de resursele disponibile. Prețurile pe piața de energie electrică (PZU) joacă un rol esențial în transmiterea semnalelor economice către consumatori, influențând cererea. **Scopul principal al programelor DSM este de a îmbunătăți relația furnizor-consumator, generând beneficii comune.**

Pentru furnizorii de energie, avantajele includ reducerea resurselor primare necesare în centralele electrice, amânarea investițiilor în noi capacități de generare, minimizarea pierderilor energetice din rețelele electrice de transport și distribuție, și amânarea extinderii infrastructurii energetice.

Pentru consumatori, DSM aduce o creștere a eficienței energetice și permite consumul unei cantități mai mici de energie pentru același scop final, alături de reducerea costurilor cu energia prin diminuarea cererii.

Implementarea programelor DSM în campusurile universitare

Programele de managementul utilizării energiei pentru a putea fi implementate, necesită reglementări și stimulente din partea autorităților. În figura 5.1 este prezentată schema unui model de implementare DSM. [5]

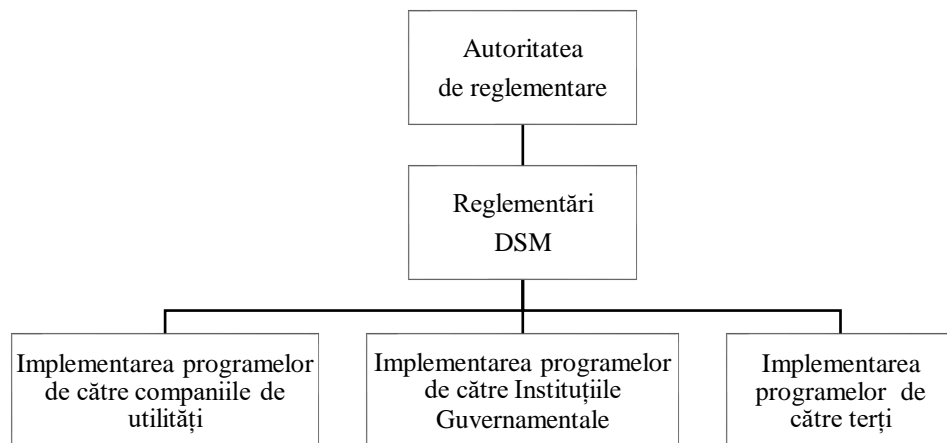


Figura 5.1 Model de implementare DSM

6. Validarea rezultatelor cercetării în aplicații implementate din cadrul campusului POLITEHNICA București

Capitolul prezintă validarea rezultatelor cercetării și simulările pentru soluțiile integrate de management energetic, axându-se pe implementările realizate în campusul universitar POLITEHNICA București. Capitolul prezintă procesele de dezvoltare și implementare a soluțiilor de monitorizare și control al fluxurilor de energie în timp real, incluzând validări ale soluției pentru Casa Pasivă, clădirile Campus și Precip din cadrul universității.

6.1. Dezvoltarea și implementarea soluțiilor în campusul universitar – POLITEHNICA București

În acest subcapitol, este prezentată implementarea sistemului de management energetic integrat în campusul POLITEHNICA București, împărțită în etapele principale ale metodologiei propuse.

Etapa 1: Identificarea consumatorilor și configurarea monitorizării

În prima etapă, au fost identificate clădirile și circuitele electrice care necesită monitorizare detaliată. Astfel, clădirile CAMPUS și PRECIS au fost selectate pentru implementarea inițială a soluției.

În cadrul acestor clădiri, au fost instalate analizoare de energie pe fiecare fază a circuitelor electrice, monitorizând:

- Tensiunea și intensitatea curentului electric;
- Factorul de putere;
- Armonicile de curent și tensiune.

Etapa 2: Stabilirea topologiei și arhitecturii sistemului

După instalarea analizoarelor de energie, a fost definită topologia de rețea, incluzând canalele de comunicație și protocoalele utilizate. Datele colectate sunt transmise inițial prin protocolul Modbus către PLC-urile de agregare, care le trimite mai departe către nodul central folosind protocoalele MQTT și TCP/IP. Această

arhitectură asigură o comunicare rapidă și securizată între echipamentele de măsurare și serverul central, facilitând integrarea și analiza datelor în timp real.

Etapa 3: Implementarea sistemului de gestionare și vizualizare a datelor

Un pas esențial în această etapă a fost instalarea și configurarea nodului central în Casa Pasivă, care susține întreaga infrastructură de stocare, monitorizare și prelucrare a datelor. Nodul central conține echipamentele de tip server care colectează datele de la echipamentele instalate în clădirile CAMPUS și PRECIS.

Etapa 4: Implementarea algoritmilor de predicție pentru optimizarea consumului energetic

Pentru creșterea eficienței energetice, au fost testați și implementați algoritmi de predicție, bazându-se pe datele colectate în timp real.

S-au analizat mai multe modele, dintre care ARIMA și LSTM s-au dovedit a fi cele mai eficiente în prognoza consumului energetic. Prin integrarea acestor algoritmi, sistemul oferă prognoze fiabile, permițând ajustarea consumului energetic pe baza tendințelor identificate.

Etapa 5: Implementarea soluțiilor de eficiență energetică

În ultima etapă, au fost studiate soluții pentru optimizarea consumului și îmbunătățirea eficienței energetice în campusul POLITEHNICA București. Aceste soluții includ: programe DSM, automatizări, echilibrarea consumurilor, măsuri de îmbunătățire a calității energiei.

6.2. Arhitectura sistemului de management energetic integrat – POLITEHNICA București

Rețeaua propusă pentru include o integrare de elemente de rețea de tip stea. Datele sunt colectate de la senzori și analizoarele de energie folosind protocoale de comunicație specifice (Modbus pentru analizoare și MQTT pentru senzori de radiație solară și temperatură, precum și transmiterea datelor între site-uri prin MQTT – TCP/IP).

Toate datele sunt transmise către un server central, care gestionează stocarea și procesarea datelor prin intermediul unui hipervizor ESXi care rulează mai multe mașini virtuale configurate cu rolurile necesare.

Această configurație oferă atât redundanță, cât și scalabilitate, asigurând că datele colectate de la diverse dispozitive IoT sunt transmise și procesate eficient și în siguranță. Redundanța în această rețea se referă la multiplele căi de comunicație și backup pentru fiecare nod din rețea, ceea ce minimizează riscul de pierdere a datelor în cazul unei defecțiuni. Scalabilitatea permite extinderea rețelei prin adăugarea de noi dispozitive sau senzori fără a afecta performanța generală a sistemului.

Pe măsură ce noi dispozitive IoT sunt adăugate, rețeaua poate gestiona creșterea volumului de date prin utilizarea unor protocoale de comunicație eficiente și a unor servere centrale puternice, care pot distribui sarcinile de procesare și stocare a datelor. În plus, configurarea modulară a rețelei permite integrarea facilă a unor tehnologii și echipamente noi, asigurând compatibilitatea și interoperabilitatea acestora cu infrastructura existentă.

Figura 6.1 oferă o vedere detaliată a conexiunilor și fluxului de date în soluția de monitorizare a site-ului la distanță.

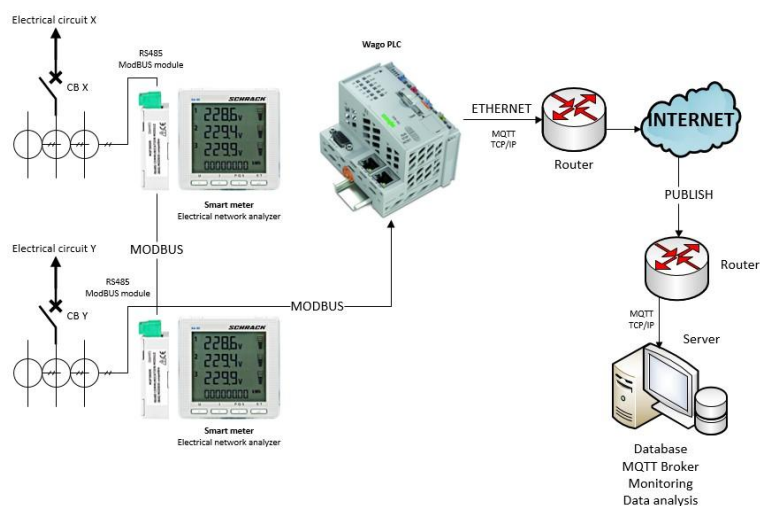


Figura 6.1 Soluție de monitorizare detaliată a site-ului la distanță

Soluția propusă se concentrează pe implementarea unui sistem integrat de monitorizare a circuitelor electrice din campusul universitar, care include atât consumatorii majori de energie, cum ar fi sistemele de climatizare (HVAC), cât și consumatorii mai mici distribuiți pe întreaga rețea.

În cadrul implementării soluției de management energetic integrat, s-au montat analizatoare de rețea, transformatoare de curent\tensiune și un PLC de agregare în tabloul electric general al clădirii CAMPUS și PRECIS.

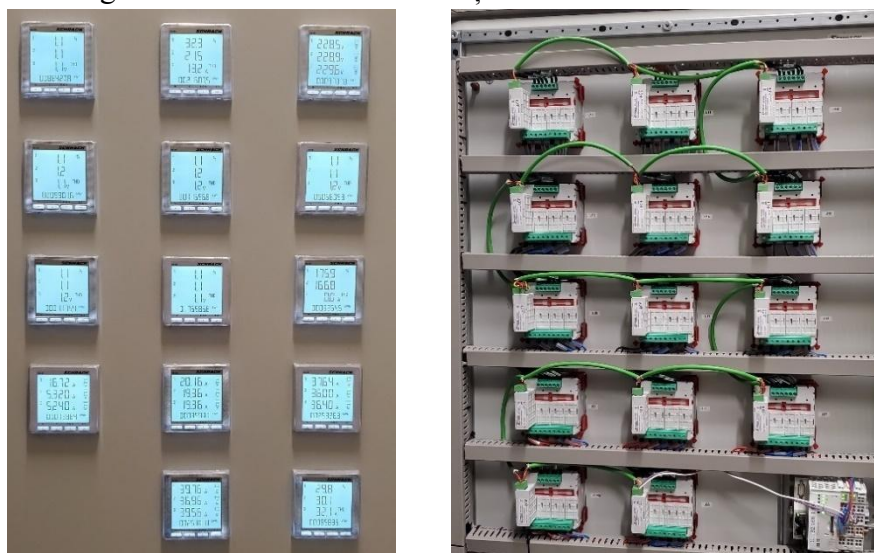


Figura 6.2 Tabloul electric general al clădirii CAMPUS



Figura 6.3 Montajul transformatoarelor de curent

Arhitectura rețelei sistemului integrat de monitorizare a energiei este concepută pentru a asigura un mediu scalabil și eficient de stocare și procesare a datelor. Aceasta facilitează comunicarea dintre diferitele componente ale sistemului, incluzând contoare inteligente, controlere programabile (PLC), server și platformă de analiză avansată.

Figura 6.4 ilustrează arhitectura propusă pentru soluția tehnică de virtualizare a infrastructurii IT.

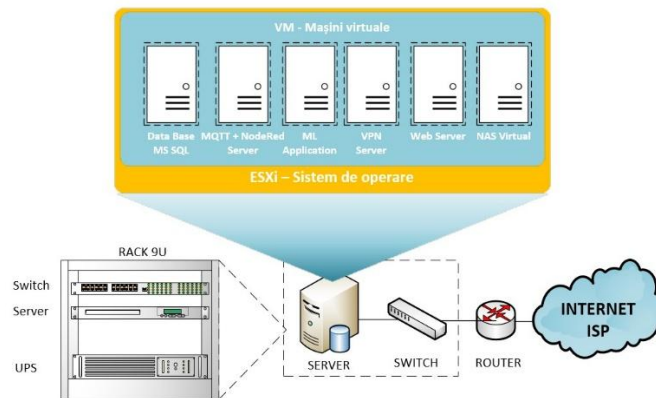


Figura 6.4 Arhitectura rețelei actuale de management energetic integrat

În completarea arhitecturii rețelei, figura 6.5 prezintă fluxul logic al implementării algoritmilor de învățare automată în sistemul de monitorizare. Această diagramă oferă o imagine clară asupra proceselor de colectare, prelucrare și analiză a datelor, subliniind modul în care modelele predictive sunt utilizate pentru predicția consumului energetic.

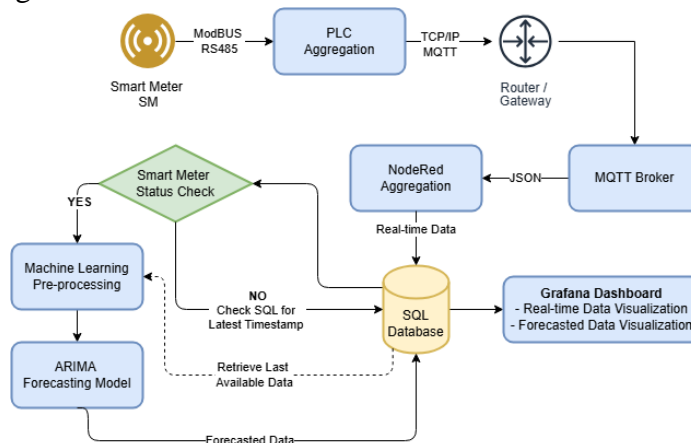


Figura 6.5 Diagramă flux logic – algoritmi de învățare automată

Pentru o mai bună înțelegere a aplicației practice a sistemului, figura 6.6 ilustrează implementarea rețelei de senzori și dispozitive IoT în campusul POLITEHNICA București.

Această soluție permite optimizarea utilizării energiei printr-un sistem centralizat, scalabil și flexibil. Integrarea tehnologiilor IoT și a infrastructurii virtualizate asigură o platformă eficientă pentru gestionarea resurselor energetice, facilitând implementarea unor strategii avansate de reducere a consumului și optimizare a eficienței sistemului energetic integrat.



Figura 6.6 Vizualizarea datelor în timp real și prognozate

7. Concluzii și perspective de dezvoltare a cercetării

Capitolul de concluzii oferă o sinteză a întregii lucrări, subliniind rezultatele obținute, contribuțiile originale aduse în domeniul managementului energetic, și analizând impactul cercetării realizate.

7.1. Rezultate obținute

În cadrul subcapitolului sunt prezentate concluziile fundamentale și analizele tehnice și economice efectuate pe parcursul validării și implementării soluției de management energetic integrat în cadrul campusului POLITEHNICA București.

Optimizarea relației furnizor – utilizator prin DSM

Integrarea programelor **DSM** a permis o mai bună gestionare a consumului, fără a fi necesară ajustarea în timp real în funcție de prețurile pieței de energie. Implementarea soluției a îmbunătățit **vizibilitatea consumurilor**, a permis **adaptarea strategiilor de utilizare a energiei** și a sprijinit **deciziile operaționale bazate pe date**.

Viabilitatea economică

Analiza tehnico-economică a demonstrat că sistemul implementat este **viabil și rentabil**. **Valoarea Netă Actualizată (VNA) a fost pozitivă**, confirmând faptul că beneficiile financiare rezultate din economiile de energie depășesc costurile investiției. **Rata Internă de Rentabilitate (RIR) a depășit rata de actualizare**, indicând o soluție profitabilă, iar **timpul de recuperare a investiției (TR) s-a situat sub limita acceptabilă**, ceea ce arată că implementarea va fi amortizată într-un termen relativ scurt.

Impactul asupra mediului

Soluția de automatizare și optimizare a consumului energetic a contribuit la reducerea emisiilor de **CO₂ cu 23,3 tone pe an**, echivalent cu o economie de **8,9 tone echivalent petrol (tep)**. Acest rezultat subliniază impactul pozitiv asupra sustenabilității campusului și sprijinirea obiectivelor de eficiență energetică.

Metodologie clară și scalabilitate

Soluția a oferit o **metodologie clară** pentru dezvoltarea unui **sistem de management energetic integrat**, consolidând un model scalabil, pregătit pentru extindere. Granularitatea ridicată a măsurătorilor și **acuratețea datelor colectate** permit **identificarea rapidă a dezechilibrelor** și **optimizarea resurselor** în timp real.

Performanța algoritmilor de predicție

Compararea modelelor de predicție a consumului energetic a demonstrat că **ARIMA** reprezintă soluția optimă din perspectiva raportului **precizie – resurse hardware**, menținând o eroare medie sub **5%** în condiții normale de consum. Deși

modelul **LSTM** are o capacitate ridicată de captare a tiparelor complexe și a sezonalițărilor, cerințele sale computaționale au făcut ca implementarea acestuia să fie mai puțin eficientă în infrastructura actuală. **Regresia liniară** a fost analizată ca model de referință, însă limitele sale în modelarea variațiilor complexe și sezonalițării au condus la erori semnificative, depășind în unele cazuri **10-15%**.

Arhitectura tehnică a sistemului

Soluția a fost implementată utilizând o **infrastructură virtualizată**, bazată pe un **server central ESXi**, care permite segmentarea serviciilor și administrarea eficientă a resurselor. Această abordare a oferit **scalabilitate, reducerea costurilor hardware și o administrare mai flexibilă** a fluxurilor de date. Sistemul permite integrarea ușoară a unor noi puncte de măsurare și extinderea capacităților de procesare fără modificări structurale majore.

În concluzie, implementarea sistemului a demonstrat fezabilitatea utilizării tehnologiilor avansate pentru optimizarea consumului energetic, având **beneficii directe asupra eficienței operaționale, economice și de mediu**. Rezultatele obținute susțin **extinderea sistemului** prin adăugarea unor **noi module de analiză predictivă**, precum și integrarea unor **mecanisme avansate de automatizare și control**, consolidând astfel eficiența și sustenabilitatea infrastructurii energetice.

7.2. Contribuții originale

Implementarea și dezvoltarea unui sistem de management energetic integrat a adus contribuții originale semnificative, atât din perspectiva metodologiei propuse, cât și a soluțiilor tehnice aplicate. Aceste contribuții vizează crearea unui cadru scalabil și replicabil pentru eficientizarea consumului energetic prin utilizarea tehnologiilor IoT, a infrastructurii virtualizate și a algoritmilor de predicție.

Implementarea unei metodologii pentru sisteme de management energetic integrat

O contribuție fundamentală a acestei lucrări constă în dezvoltarea unei metodologii structurate pentru implementarea unui sistem de management energetic integrat. Metodologia propusă include identificarea necesităților de optimizare a consumului, definirea topologiei sistemului, stabilirea arhitecturii rețelei și integrarea unui nod central pentru procesarea datelor. Acest proces se finalizează cu monitorizarea, analiza și vizualizarea datelor, asigurând securitate avansată și protecția infrastructurii împotriva atacurilor cibernetice. O componentă inovatoare a metodologiei este integrarea algoritmilor de predicție, care permit optimizarea consumului prin anticiparea necesităților energetice și ajustarea utilizării resurselor.

Aplicații practice de management energetic integrat în campusul POLITEHNICA București

Un element de noutate este aplicarea practică a sistemului de monitorizare energetică în cadrul campusului POLITEHNICA București, un mediu real cu cerințe

complexe. Implementarea acestui sistem permite colectarea și analiza granulară a consumurilor și optimizarea resurselor prin identificarea și corectarea ineficiențelor. POLITEHNICA București devine astfel un exemplu de transformare digitală a infrastructurii energetice, cu beneficii economice și de sustenabilitate.

Integrarea unui nod central bazat pe virtualizare pentru segmentarea serviciilor

O altă contribuție majoră este utilizarea tehnologiilor de virtualizare pentru dezvoltarea unui nod central capabil să segmenteze eficient serviciile sistemului. Virtualizarea cu hypervisor de tip 1 permite alocarea dinamică a resurselor hardware și izolarea serviciilor critice (monitorizare, analiză, securitate), optimizând astfel fiabilitatea, flexibilitatea și performanța sistemului. Această soluție oferă scalabilitate ridicată, facilitând extinderea infrastructurii fără investiții suplimentare semnificative.

Testarea și optimizarea algoritmilor de predicție pentru consumul energetic

Această lucrare contribuie prin analiza comparativă a unor algoritmi avansați de predicție energetică, precum ARIMA, LSTM și regresia liniară. Au fost testate și ajustate diverse seturi de parametri pentru fiecare algoritm, iar concluziile obținute au condus la validarea modelului ARIMA ca fiind optim pentru infrastructura actuală, datorită raportului favorabil între precizie și cerințele hardware. Această contribuție este esențială pentru dezvoltarea unor strategii predictive eficiente, capabile să îmbunătățească gestionarea energiei în timp real.

Implementarea în aplicațiile realizate precum și evaluarea impactului măsurilor de securitate cibernetică în rețelele de management energetic

Un aspect inovator al cercetării este integrarea și evaluarea măsurilor avansate de securitate cibernetică în sistemele de management energetic. Implementarea criptării datelor, utilizarea protocoalelor sigure și adoptarea politicilor de acces restricționat asigură protecția infrastructurii împotriva atacurilor. Această contribuție este esențială în contextul creșterii riscurilor de securitate asociate dispozitivelor IoT și rețelelor inteligente.

Dezvoltarea unui model replicabil pentru alte aplicații

Un rezultat semnificativ al soluției este crearea unui model standardizat de implementare a unui sistem de management energetic integrat, bazat pe experiența POLITEHNICA București. Acest model poate fi replicat și particularizat în alte instituții publice și private, oferind o soluție scalabilă și sustenabilă pentru optimizarea consumului energetic. Astfel, contribuția originală a acestei teze nu se limitează doar la implementarea locală, ci oferă un cadru extensibil care poate sprijini tranziția către clădiri inteligente la nivel național și internațional.

Aceste contribuții originale subliniază caracterul inovator al tezei, demonstrând aplicabilitatea reală a soluțiilor propuse și impactul pozitiv al tehnologiilor moderne asupra gestionării eficiente a energiei la nivelul diferitelor tipologii de clădiri.

7.3. Publicații științifice

Acest subcapitol prezintă lucrările științifice publicate și cele aflate în curs de publicare sau întocmire, rezultate din activitatea de cercetare desfășurată în cadrul studiilor doctorale. Aceste lucrări se axează pe implementarea și dezvoltarea unui sistem integrat de monitorizare și management energetic utilizând tehnologii IoT și IoE.

Lista articolelor publicate:

- **Enhancing Monitoring and Control of an HVAC System through IoT**, Vladimir Tanasiev, Stefanita Pluteanu, Horia Necula, Roxana Patrascu, January 2022, *Energies* 15(3):924, DOI:10.3390/en15030924, WOS:000760148100001.
- **Renewable Energy Production in Decommissioned Power Plant Sites for Sustainable Cities-The Case Study of Romania**, Adrian Ciocănea, Mircea Scripcariu, Ștefăniță Pluteanu, Bogdan Tofan, Conference paper 20 September 2020, Part of the Springer Proceedings in Energy book series (SPE), DOI:10.1007/978-3-030-55757-7_19.
- **Integration of BIM Solutions and IoT in Smart Houses**, Gabriela Nicoleta Sava, Stefanita Pluteanu, Vladimir Tanasiev, Roxana Patrascu, Horia Necula, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), DOI:10.1109/EEEIC.2018.8494628, WOS:000450163703058.
- **Demand-side Management Programs – A joint environmental protection action. Case study: The lighting system in the Campus of the University POLITEHNICA of Bucharest**, Mircea Scripcariu, Ioan Sevastian Bitir-Istrate, Cristian Gheorghiu, Ștefăniță Pluteanu, Aida Maria Neniu, E3S Web of Conferences 112, 04006 (2019), 8th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development (TE-RE-RD 2019), DOI:10.1051/e3sconf/201911204006, WOS:000619989000073.
- **Offshore Wind Power Plant and Electrical Network Development: Romanian Case Study**, Mircea Scripcariu, Gabriela Nicoleta SAVA, Stefanita Pluteanu, Oana Udrea, *JOURNAL OF ENERGY ENGINEERING*, Volume: 144, Issue: 2, APR 2018, (IF 1,632), ISI Web of Science, DOI:10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000511, WOS:000425610500003.

Listă articole în curs de publicare și întocmire:

- **Regulatory and Economic Impacts of BIM Implementation in the Construction Industry**, Ștefăniță PLUTEANU, Gabriela Nicoleta TANASIEV,

Roxana PĂTRAȘCU, Vladimir TANASIEV – Buletin Științific Universitatea Politehnica București, Submission ID: 15514

- **Enhancing environmental preservation of the Danube Delta Biosphere Reserve through IoT custom-built monitoring station and Artificial Intelligence**, Vladimir TANASIEV, Tudor PRISECARU, Vasilica STEFAN, Emil TUDOR, Stefanita PLUTEANU, Roxana PATRASCU, Remote Sensing of Environment, 2023 – în curs de evaluare

Bibliografie

- [1] Eurostat, *Energy statistics - an overview 1990 - 2022*. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption (accessed on 20 June 2024).
- [2] European Parliament and of the Council, *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955*. Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:JOL_2023_231_R_0001 (accessed on 20 June 2024).
- [3] ANRE, *Smart Metering*. Available online: <https://arhiva.anre.ro/ro/energie-electrica/legislatie/smart-metering> (accessed on 20 June 2024).
- [4] *** *Vmware Infrastrucure Architecture Overview*, Vmware White Paper, https://www.vmware.com/docs/vi_architecture_wp
- [5] *** Electric Power Research Institute - EPRI, <https://www.epri.com/>.
- [6] Wu Peng; *Control Strategy of Intelligent Energy Management in Vocational Colleges and Universities Based on Internet of Things*, 2024 IEEE 6th Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS), DOI:10.1109/ECBIOS61468.2024.10885421, IEEE.
- [7] S. Balaji; S. Prasanna Bharathi; T.S. Balaji; R. Hariharan; P. Glaret Subin; *Enhancing Predictive Accuracy with Machine Learning and IoT Integration in Energy Management*, 2024 Second International Conference Computational and Characterization Techniques in Engineering & Sciences (IC3TES), DOI:10.1109/IC3TES62412.2024.10877551, IEEE.