



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI



Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și tehnologia informației

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Ing. Kanar Alaa AL-SAMMAK

ENERGY-EFFICIENT SMART METERING
USING NB-IoT AND LoRaWAN: ADAPTIVE
TRANSMISSION AND OPTIMIZED GATEWAY
DEPLOYMENT STRATEGIES

SOLUȚII DE CONTORIZARE INTELIGENTĂ
FOLOSIND TEHNOLOGIILE NB-IoT ȘI LoRaWAN:
TRANSMISIUNE ADAPTIVĂ ȘI STRATEGII
PENTRU PLASAREA OPTIMĂ A STAȚIILOR DE
BAZĂ (GATEWAY)

Prof. Dr. Ing. Ion MARGHESCU
POLITEHNICA București

Conducător de
doctorat

BUCUREȘTI 2025

Conținut

Conținut	1
Capitolul 1 Introducere	2
1.1 Problemă, obiective și contribuții de cercetare	2
1.2 Domeniile de cercetare	3
1.3 Conținutul tezei	3
Capitolul 2 O prezentare generală a contoarelor inteligente și a tehnologiilor de comunicații implicate	4
2.1 Contor inteligent	4
2.2 Tehnologii de comunicații implicate în SM	4
2.2.1 Tehnologii de comunicații fără fir	4
2.2.2 Tehnologii de comunicare prin cablu	5
2.3 Lucrări conexe	5
2.4 Concluziile capitolului	6
Capitolul 3 Evaluarea NB-IoT și LoRaWAN pentru contorizarea inteligentă folosind simulări și experimente din lumea reală	7
3.1 O evaluare a funcționalității NB-IoT pentru aplicațiile de contorizare inteligentă	7
3.2 O evaluare cuprinzătoare a valorilor de performanță LoRaWAN și NB-IoT în diferite dimensiuni de date de sarcină utilă	7
3.3 Analiza tehnologiilor LoRaWAN și NB-IoT pentru implementări IoT îmbunătățite: un studiu experimental	8
3.3.1 EXPERIMENTUL LoRaWAN	8
3.3.2 EXPERIMENTUL NB-IoT	8
3.4 Concluziile capitolului	9
Capitolul 4 Optimizarea performanței rețelei LoRaWAN prin algoritmul hibrid de plasare a gateway-ului PSO-DE și factorul de răspândire	10
4.1 Configurare experimentală și procesare a datelor	10
4.2 SF7 vs SF12: Analiza pierderilor de semnal și pachete	10
4.2.1 Pierderea pachetelor:	10
4.2.2 Analiza RSSI și SNR:	11
4.3 Metoda propusă pentru plasarea gateway-ului	12
4.4 Un studiu comparativ al mediilor reale și simulate	14
4.5 Concluziile capitolului	15
Capitolul 5 Optimizarea eficienței energetice IoT: algoritmi adaptivi în timp real pentru contoare inteligente cu LoRaWAN și NB-IoT	16
5.1 Prezentare generală și metodologie a sistemului	16
5.1.1 Arhitectura de rețea LoRaWAN:	16
5.1.2 Arhitectura rețelei NB-IoT:	17
5.2 Fluxul de lucru al sistemului și implementarea software-ului	17
5.2.1 Transmisie standard (fără algoritm):	18
5.2.2 Transmisie optimizată (cu algoritm)	18
5.3 Rezultate și analiză	20
5.4 Concluziile capitolului	21
Capitolul 6 Concluzii și lucrări viitoare	22
6.1 Rezultatele și contribuțiile cercetării	22
6.2 Publicații de autor	24
6.3 Lucrări viitoare	25

Capitolul 1 Introducere

Internet of Things (IoT) este o ramură a ingineriei care conectează dispozitive fizice sau miniaturi pentru a atinge obiective specifice [1]. A câștigat importanță datorită creșterii rapide a dispozitivelor inteligente în rețea cu detectare și comunicare wireless încorporate [2]. Ecosistemele IoT includ procesoare, senzori și module de comunicare care colectează, transmit și acționează asupra datelor, aceste dispozitive trimit date ale senzorilor prin gateway-uri sau dispozitive edge în cloud pentru analiză [3]. Tehnologiile LPWAN (Wide-Area Network) cu consum redus de energie (LPWAN) sunt esențiale pentru IoT, oferind conectivitate cu costuri reduse, pe distanțe lungi, cu un consum minim de energie, permițând aplicații în sectoare, de la agricultură la orașe inteligente. [4]

1.1 Problemă, obiective și contribuții de cercetare

Adoptarea IoT pentru contorizarea inteligentă promite eficiență energetică mai bună, dar apar provocări legate de cost, compactitate, fiabilitate și scalabilitate. NB-IoT și LoRaWAN pot avea performanțe variabile, iar plasarea gateway-ului și compromisurile de acoperire sunt critice. Creșterea numărului de dispozitive aduce riscuri de congestie și necesită eficiență energetică ridicată. Această teză își propune să abordeze aceste probleme.

1. Efectuați o revizuire cuprinzătoare și o analiză comparativă a NB-IoT și LoRaWAN pentru contorizarea inteligentă.
2. Evaluați riguros ambele tehnologii prin simulări și experimente, concentrându-vă pe eficiența energetică, acoperire și fiabilitate.
3. Propunerea și implementarea unei noi strategii de plasare a gateway-ului pentru LoRaWAN folosind algoritmi de optimizare hibridi.
4. Proiectați un algoritm de transmisie adaptiv pentru a îmbunătăți eficiența energetică a contoarelor inteligente prin minimizarea transmisiilor inutile. Tabelul 1.1 rezumă principalele contribuții la cercetare, aliniate la întrebările de bază ale cercetării:

***Masă 1.1** Principalele contribuții la cercetare*

Nu.	Întrebare de cercetare (RQ)	Tip de contribuție
RQ1	Care sunt aspectele critice de proiectare, cerințele de performanță și provocările emergente asociate tehnologiilor de comunicații în sistemele de contorizare inteligentă?	Analiză cuprinzătoare a tehnologiei și a designului
RQ2	Care sunt caracteristicile și limitările cheie de performanță ale NB-IoT și LoRaWAN pentru aplicațiile de contorizare inteligentă?	Evaluare comparativă
RQ3	Cum poate fi optimizată amplasarea gateway-ului pentru rețelele LoRaWAN pentru a îmbunătăți acoperirea, fiabilitatea și eficiența?	Algoritmi de optimizare
RQ4	Ce strategii pot fi utilizate pentru a îmbunătăți eficiența energetică a nodurilor de contorizare inteligentă prin transmisie adaptivă?	Proiectare algoritm în timp real

1.2 Domeniile de cercetare

Această cercetare se concentrează pe optimizarea NB-IoT și LoRaWAN pentru aplicațiile de contorizare inteligentă. Scopurile acestui studiu sunt următoarele:

1. Studiu bazat pe standardele 3GPP pentru arhitectura NB-IoT și LoRaWAN.
2. Implementează contoare inteligente, module NB-IoT (Quectel BG96), dispozitive finale LoRaWAN (Dragino LG308), microcontrolere (Arduino Uno) și senzori de putere (PZEM-004T) pentru achiziția de date.
3. Power Profiler Kit (PPK) utilizat pentru măsurarea energiei în timp real.
4. Evaluarea bazată pe MATLAB a eficienței rețelei în diferite condiții.
5. Indicatori cheie de performanță: latență, consum de energie, pierdere de pachete, rată de eroare de biți (BER), RSSI și SNR.
6. Analiza comparativă a factorilor de răspândire LoRaWAN (SF7 vs. SF12).
7. Simulare efectuată folosind software-ul HTZ Communications.
8. Algoritm hibrid PSO-DE pentru optimizarea plasării gateway-ului folosind python.
9. Implementarea algoritmilor de transmisie adaptivă în timp real pentru contoarele inteligente.

1.3 Conținutul tezei

Capitolul 2: Prezintă o revizuire a literaturii de specialitate privind contorizarea inteligentă bazată pe IoT, concentrându-se pe NB-IoT și LoRaWAN, evidențiind arhitecturile tehnice, provocările de comunicare și lacunele de cercetare.

Capitolul 3: Evaluează NB-IoT și LoRaWAN folosind simulări MATLAB/Simulink și Python, alături de teste din lumea reală cu noduri nRF9160 DK și Pycom. Valorile cheie includ timpul de transmisie, BER, consumul de energie și calitatea semnalului în condiții diferite.

Capitolul 4: Analizează performanța LoRaWAN folosind SF7 și SF12 în medii urbane. Un algoritm de optimizare PSO-DE este propus pentru plasarea gateway-ului, îmbunătățind acoperirea și reducând pierderea pachetelor.

Capitolul 5: Prototipează un sistem de contorizare inteligent cu Arduino Uno și PZEM-004T. Profilarea energiei se realizează cu PPK2, iar un algoritm personalizat de reducere a datelor reduce sarcina de transmisie și prelungește durata de viață a bateriei.

Capitolul 6: Rezumă constatările, contribuțiile și diseminarea și prezintă lucrările viitoare în comunicarea adaptivă și optimizarea LPWAN.

Capitolul 2 O prezentare generală a contoarelor inteligente și a tehnologiilor de comunicații implicate

Contoarele inteligente au devenit esențiale în sistemele energetice moderne, permițând schimbul de date în timp real, prețuri dinamice și stabilitate îmbunătățită a rețelei. Acest capitol trece în revistă tehnologiile contoarelor inteligente și sistemele de comunicații de sprijin, concentrându-se pe componentele MDMS și AMI. Acesta evaluează rețelele cu fir și fără fir pe baza acoperirii, debitului și eficienței energetice și explorează progresele recente, cum ar fi algoritmi adaptivi pentru reducerea consumului de energie și optimizarea transmisiilor. Capitolul sintetizează tendințele pieței, evoluțiile tehnice și cercetările pentru a evidenția provocările și oportunitățile actuale în construirea de sisteme inteligente de contorizare reziliente și eficiente din punct de vedere energetic.

2.1 Contor inteligent

IoT este o paradigmă modernă cu aplicații variate în industrie și tehnologie, facilitând comunicarea și luarea deciziilor în rețele inteligente. În sectorul energetic, IoT sprijină dezvoltarea micrețelelor și permite monitorizarea securizată de la distanță a resurselor distribuite [5][6][7,8]. Gestionarea volumului mare de date necesită tehnologii de comunicații sigure și eficiente pentru schimbul bidirecțional de informații. Infrastructura avansată de contorizare (AMI) combină AMR și AMM pentru măsurători tehnice și servicii pentru clienți [9][10,11].

2.2 Tehnologii de comunicații implicate în SM

Există diverse sisteme de telecomunicații utilizate în aplicațiile de contorizare inteligentă, fiind astfel clasificate ca cu fir și fără fir.

2.2.1 Tehnologii de comunicații fără fir

Comunicarea în rețea inteligentă este de obicei structurată în trei niveluri [12]; HAN (Home Area Network), NAN (Neighborhood Area Network) și WAN (Wide Area Network). Pentru HAN, am luat în considerare ZigBee, Bluetooth și Wi-Fi. ZigBee, bazat pe IEEE 802.15.4, oferă un consum redus de energie și o rază de acțiune de până la 100 m la 250 kbps, făcându-l ideal pentru aplicații de rețea inteligentă cu date reduse.

Wi-Fi, conform standardelor IEEE 802.11, acceptă rate de date mai mari (până la 1 Gbps) cu prețul consumului mai mare de energie și al unei scalabilități mai mici. Bluetooth, bazat pe IEEE 802.15.1, oferă până la 721 kbps pe distanțe scurte (0-100 m), ideal pentru comunicații la domiciliu, cu consum redus de energie. [13] [14] [15][16][17] Pentru NAN și WAN, am evaluat SigFox, LoRaWAN, Wi-SUN, NB-IoT și WiMAX, SigFox operează în banda ISM 868 MHz cu rază lungă de acțiune (până la 50 km rural, 10 km urban) și rată de date scăzută (100 bps), oferind un echilibru bun între acoperire și consumul de energie [13, 18, 19]. Wi-SUN, bazat pe IEEE 802.15.4g, oferă 300 kbps pe distanțe de până la 5 km, folosind benzi ISM sub-GHz [20]. WiMAX, bazat pe IEEE 802.16, suportă rate de date de până la 100 Mbps cu distanțe de până la 10 km, ceea ce îl face potrivit pentru rețelele de distribuție [17, 30]. Ne concentrăm pe LoRaWAN și NB-IoT: LoRaWAN, dezvoltat de LoRa Alliance, folosește spectrul răspândit chirp pentru comunicații cu rază lungă de acțiune, cu putere redusă, făcându-l potrivit pentru contorizarea inteligentă cu baterii în energie, apă sau gaz [21, 22, 23]. NB-IoT, bazat pe 3GPP LTE, operează în spectru licențiat și valorifică infrastructura LTE existentă [24, 25, 26].

2.2.2 Tehnologii de comunicare prin cablu

Comunicarea prin linie electrică (PLC) utilizează liniile electrice existente pentru a transmite date de înaltă frecvență (kHz la MHz). Costul redus de implementare, fiabilitatea și debitul ridicat îl fac potrivit pentru comunicațiile Smart Grid, în special în zonele urbane dense. PLC poate fi clasificat ca bandă îngustă sau bandă largă. O altă opțiune de telefonie fixă este Digital Subscriber Line (DSL), care transmite date digitale prin linii telefonice. În plus, comunicarea optică oferă transfer de date de mare viteză (Gbps) pe distanțe lungi, cu rezistență puternică la interferențe electromagnetice.[27, 28]

2.3 Lucrări conexe

Progresul IoT în sistemele de contorizare inteligentă se bazează în mare măsură pe arhitecturi LPWAN și protocoale de comunicare eficiente. Multe studii au explorat tehnologiile LoRaWAN și NB-IoT, concentrându-se pe eficiența energetică, aplicațiile în timp real și performanța rețelei. Un studiu comparativ [29] a examinat cinci indicatori de performanță pentru ambele tehnologii, dezvăluind consistența NB-IoT cu sarcini utile mai mari și puterea LoRaWAN în scenarii cu latență scăzută. Alte lucrări [38-41], au evaluat performanța în condiții dure și medii urbane, inclusiv integrarea în 5G [30] și comparații cu NB-Fi [31]. Testele de teren [44, 45] au evidențiat provocările de implementare și interferențele în medii dense. Mai multe studii s-au concentrat pe aplicații de contorizare inteligentă folosind LoRaWAN: Asres et al. [32] au dezvoltat un contor de energie în zonă îndepărtată, Slaný et al. [33] au proiectat un sistem inteligent de gestionare a apei, iar Piechowiak et al. [34] au propus algoritmi de plasare a gateway-urilor. Hseiki et al. [35] au introdus un design de contor inteligent sigur. Alte

lucrări au explorat cazuri de utilizare în clădiri inteligente, campusuri și agricultură. În ceea ce privește tehnicile de optimizare, studiile au abordat plasarea gateway-ului și pierderea pachetelor, în timp ce unele cercetări au evaluat calitatea semnalului și localizarea folosind LoRaWAN. Svertoka et al. [36] și Cruz et al. [37] au optimizat acoperirea LoRaWAN folosind k-NN și, respectiv, EPSO. Metode de învățare automată și PSO au fost folosite pentru plasarea gateway-ului și alocarea factorilor de răspândire. Pentru NB-IoT, cercetările au vizat suportul EDT, codificarea eficientă, monitorizarea energiei în cloud și contorizarea inteligentă urbană/rurală. Tabelul 2.1 compară lucrările anterioare cu contribuția noastră, evidențiind că acest studiu este primul care abordează transmisia adaptivă în timp real pentru optimizarea eficienței energetice la nivel de nod.

Masă 2.1 Rezumatul unor lucrări conexe

Ref.	An	Rezumat	Utilizați un algoritm pentru a reduce transmisia pachetelor
[38]	2020	Propune o arhitectură de contorizare descentralizată pentru dispozitivele IoT pentru a-și măsura propriul consum de energie.	Nu
[39]	2021	Discută despre un contor de energie inteligent care utilizează LoRa-WAN și IoT pentru o rază extinsă și un consum redus de energie.	Nu
[40]	2022	Describe un contor de energie inteligent activat IoT care utilizează LoRaWAN pentru sisteme fotovoltaice, concentrându-se pe livrarea de date în timp real.	Nu
[41]	2023	Dezvoltă un contor inteligent de energie IoT pentru monitorizare în timp real și eficiență energetică în contorizare.	Nu
[42]	2023	Dezvoltă un sistem inteligent de monitorizare a energiei bazat pe IoT folosind NB-IoT și cloud pentru a automatiza citirea contoarelor și a reduce consumul de energie.	Nu
[43]	2024	Describe dezvoltarea unui gateway IoT bazat pe NB-IoT pentru contorizarea energiei, îmbunătățirea conectivității contoarelor inteligente și reducerea costurilor operaționale.	Nu
Al nostru	2024	A propus un algoritm eficient pentru optimizarea energiei nodului IoT conectat cu NB-IoT / LoRaWAN.	Da

2.4 Concluziile capitolului

Oferă o revizuire cuprinzătoare a arhitecturilor de contorizare inteligentă și a tehnologiilor de comunicare. Evidențiază punctele forte și limitările soluțiilor cu fir și fără fir, subliniind nevoia critică de eficiență energetică, interoperabilitate și comunicații sigure și scalabile în viitoarele implementări de rețele inteligente. Rezultatul acestui capitol a fost publicat ca:

K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, *Communications Systems in Smart metering: A Concise Systematic Literature Review*, in **Proceedings of the 2022 14th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, 16–18 June 2022, pp. 1–9, IEEE, DOI: 10.1109/COMM54429.2022.9817154.**

Capitolul 3 Evaluarea NB-IoT și LoRaWAN pentru contorizarea inteligentă folosind simulări și experimente din lumea reală

Acest capitol evaluează scalabilitatea contorizării inteligente bazate pe IoT prin compararea NB-IoT și LoRaWAN prin simulări și experimente hardware. Folosind MATLAB/Simulink, Python și teste de dispozitive, analizăm eficiența spectrului, utilizarea resurselor, consumul de energie și calitatea semnalului. Rezultatele oferă îndrumări practice pentru alegerea și optimizarea tehnologiilor de contorizare inteligentă fiabile și eficiente din punct de vedere energetic.

3.1 O evaluare a funcționalității NB-IoT pentru aplicațiile de contorizare inteligentă

Eficacitatea NB-IoT pentru aplicațiile de contoare inteligente este evaluată în ceea ce privește eficiența spectrală și utilizarea resurselor. Această secțiune a analizat contoarele inteligente bazate pe NB-IoT folosind setul de instrumente de flux de stare al Simulink (Rel.2016) descris în . Am evaluat performanța NB-IoT în diferite număruri de echipamente ale utilizatorilor (240-3.150) și dimensiuni ale sarcinii utile (100, 150, 250 octeți), concentrându-ne pe eficiența spectrală și utilizarea resurselor. Pe măsură ce numărul UE crește, partajarea resurselor crește din cauza lățimii de bandă limitate, ceea ce duce la o utilizare mai mare pe UE. Eficiența spectrală se îmbunătățește cu mai multe UE pentru sarcini utile de 100 și 150 de octeți, atingând un vârf de 3.150 UE. Pentru 250 de octeți, eficiența atinge un vârf de aproximativ 1.680 UE, apoi se plafonează, evidențiind impactul dimensiunii sarcinii utile asupra performanței rețelei.[44]

3.2 O evaluare cuprinzătoare a valorilor de performanță LoRaWAN și NB-IoT în diferite dimensiuni de date de sarcină utilă

Performanța LoRaWAN și NB-IoT a fost evaluată folosind o platformă de simulare. Platforma de simulare a fost dezvoltată folosind MATLAB și Simulink. Au fost evaluate următoarele valori de performanță, timpul de transmisie, consumul de energie, utilizarea resurselor și rata de eroare a biților (BER). Rezultatele noastre arată că atât

NB-IoT, cât și LoRaWAN prezintă o utilizare crescută a resurselor cu sarcini utile mai mari. NB-IoT folosește în mod constant mai puține resurse, făcându-l mai eficient pentru dimensiuni mai mari de date, în timp ce utilizarea resurselor LoRaWAN crește mai brusc. Ratele de eroare de biți cresc odată cu dimensiunea sarcinii utile pentru ambele. NB-IoT oferă o transmisie mai rapidă datorită ratei sale de date mai mari, dar consumă mai multă energie. În schimb, LoRaWAN, deși mai lent, este mai eficient din punct de vedere energetic per transmisie. În cele din urmă, alegerea între cele două depinde de nevoile specifice ale aplicației - viteză vs. eficiență energetică.

3.3 Analiza tehnologiilor LoRaWAN și NB-IoT pentru implementări IoT îmbunătățite: un studiu experimental

3.3.1 EXPERIMENTUL LoRaWAN

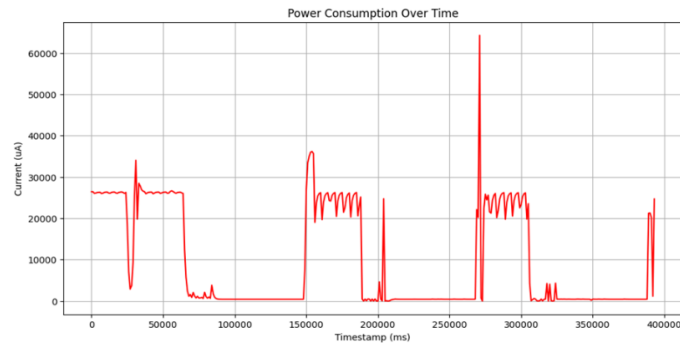
Acest experiment a investigat modul în care valorile wireless, cum ar fi RSSI și SNR, se raportează la locația geografică în implementările IoT. Folosind Pytrack și FiPy de la Pycom pentru geolocalizare precisă și un gateway Pygate LoRaWAN pentru conectivitate TTN, am demonstrat că localizarea bazată pe RSSI oferă o soluție rentabilă, fără hardware, pentru IoT bazat pe locație. Sarcinile utile de la TTN au fost decodate și procesate în Python, permițând o analiză robustă a calității semnalului. Rezultatele arată că RSSI scade în mod constant odată cu distanța față de gateway, așa cum era de așteptat, în timp ce valorile SNR prezintă mai multă variabilitate, sugerând influența atât a distanței, cât și a factorilor de mediu sau tehnici suplimentari. Acest lucru evidențiază rolurile complementare ale RSSI și SNR în asigurarea unei comunicații fiabile LoRaWAN IoT.

3.3.2 EXPERIMENTUL NB-IoT

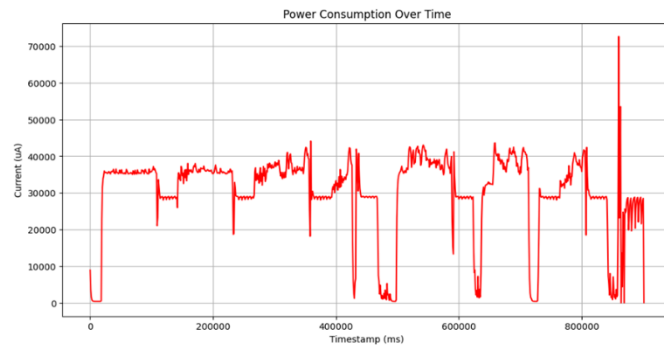
Acest studiu a evaluat eficiența energetică a nRF9160 în rețelele NB-IoT la diferite niveluri RSRP, clasificate ca bune până la moderate (-43 până la -74 dBm) și slabe (-78 până la -99 dBm). Consumul de energie a fost măsurat în modurile inactiv, transmisie și GPS, arătând o corelație clară cu calitatea semnalului - RSRP mai puternic a permis conexiuni stabile și consum mai mic de energie, în timp ce RSRP mai slab a crescut consumul din cauza provocărilor de transmisie. Impactul modurilor PSM și eDRX asupra duratei de viață a bateriei a fost, de asemenea, evidențiat. Rezultatele confirmă faptul că optimizarea calității semnalului este crucială pentru funcționarea NB-IoT eficientă din punct de vedere energetic. În studiul nostru, valorile RSRP au fost:

a) Pentru cazurile 1-3, 6 și 7: între -43 și -74 dBm, semnal bun până la moderat, conexiuni stabile și consum redus de energie.

b) Pentru cazurile 4-5, 8-10: între -78 și -99 dBm, semnal slab, consum mai mare de energie și dificultăți de conectivitate. Diferențele dintre cazuri sunt ilustrate în Figura 3.3.



Cifră 3.1 Rezultatele puterii pentru cazurile experimentale (7)



Cifră 3.2 Rezultatele Puterii pentru cazurile experimentale (10)

3.4 Concluziile capitolului

Prezintă prima comparație empirică aprofundată a NB-IoT și LoRaWAN pentru contorizarea inteligentă. NB-IoT oferă conectivitate robustă, dar cu un consum mai mare de energie, în timp ce LoRaWAN excelează în eficiență energetică, dar necesită o planificare atentă a rețelei. Rezultatul acestui capitol a fost publicat ca:

- **K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.M. Drăgulescu, C. Marghescu, N.A.H. Al-Sammak, *An Experimental Study of Power Consumption in Narrowband IoT Devices*, in Proceedings of the 2024 15th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, 03–04 October 2024, pp. 1–6, IEEE, DOI: 10.1109/COMM62355.2024.10741514.**
- **K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, N.A.H. Al-Sammak, G. Suci, *An Evaluation of the Functionality of NB-IoT for Smart metering Applications*, in Proceedings of the International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (INFUS 2025), Istanbul, Turkey, 29–31 July 2025.**
- **K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, C. Marghescu, A.M. Drăgulescu, G. Suci, A.G. Abdulqader, *A Comprehensive Assessment of LoRaWAN and NB-IoT Performance Metrics Under Varied Payload Data Sizes*, in Proceedings of the 2024 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Iași, Romania, 27–28 June 2024, pp. 1–5, IEEE, DOI: 10.1109/ECAI61503.2024.10607481.**

Capitolul 4 Optimizarea performanței rețelei LoRaWAN prin algoritmul hibrid de plasare a gateway-ului PSO-DE și factorul de răspândire

În zonele urbane dense, performanța LoRaWAN depinde de amplasarea gateway-ului și de setările factorului de răspândire (SF), în special în clădirile cu mai multe etaje. Acest capitol folosește un algoritm hibrid PSO-DE pentru a optimiza rețeaua și compară configurațiile SF7 și SF12. Experimentele cu dispozitive FTD Adeunis și gateway-uri Dragino la etajele clădirilor de la Universitatea Politehnica din București evidențiază aceste efecte.

4.1 Configurare experimentală și procesare a datelor

Experimentele într-o zonă cu arhitectură mixtă, temperatură ridicată și umiditate ridicată au implicat transmisii manuale de pachete și monitorizare TTN în timp real. Un decodor personalizat a extras temperatura, GPS, RSSI, SNR și numărul de pachete. Clustering-ul K-Means a fost utilizat pentru analiza detaliată a performanței semnalului.

4.2 SF7 vs SF12: Analiza pierderilor de semnal și pachete

4.2.1 Pierderea pachetelor:

Pentru a calcula procentul de pierdere a pachetelor pentru fiecare etaj și factor de împrăștiere, folosim formula:

$$\text{Packet Loss Percentage} = \left(\frac{\text{Number of packets lost}}{\text{Total packets sent}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Folosind datele furnizate din datele noastre colectate și aplicând ecuația (4.1) Am obținut rezultatele în Masă 4.1:

Masă 4.1 Pachetele pierdute în general nivelurile clădirilor în SF7 și SF12

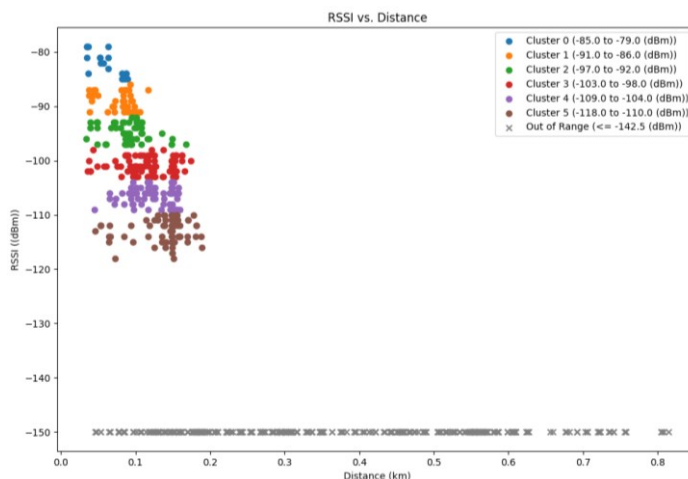
Podea	Pachete pierdute (SF7)	% pierdere pachete (SF7)	Pachete pierdute (SF12)	% pierdere pachete (SF12)
Parter	405	54.36%	372	51.67%
Etajul	417	55.97%	278	38.61%

Etajul	247	33.15%	91	12.64%
Etajul	623	83.62%	504	70.00%
Partea superioară a clădirii	102	13.69%	60	8.33%

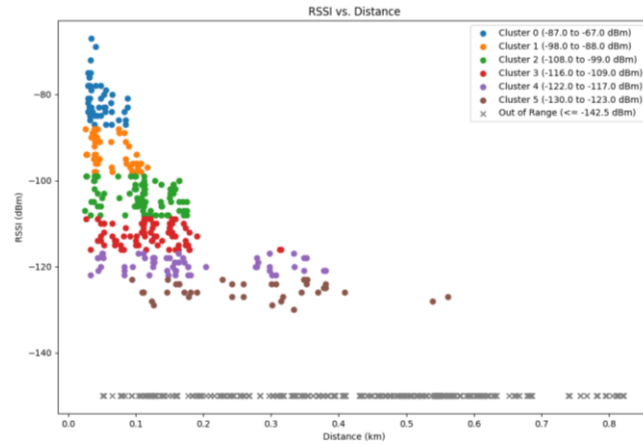
4.2.2 Analiza RSSI și SNR:

Măsurătorile RSSI și SNR pentru SF7 și SF12 au fost comparate pe mai multe etaje (figurile 4.1 și 4.2). La parter (Cifră 4.1.a), SF7 a furnizat inițial RSSI puternic, dar a suferit o degradare rapidă și pierderi mari de pachete (54,4%), în timp ce SF12 (Cifră 4.1.b), a arătat o scădere RSSI mai lentă și o pierdere mai mică (51,7%), făcându-l mai fiabil pentru distanțe mai lungi. Pe măsură ce nivelurile de etaj au crescut, SF12 a depășit în mod constant SF7 - menținând RSSI și SNR mai puternice și rezultând pierderi de pachete semnificativ mai mici, în special în medii obstrucționate (de exemplu, 38,6% la primul etaj, 12,6% la al treilea și 8,3% la ultimul etaj). Ambele SF s-au luptat la etajul cinci, dar SF12 a rămas mai robust în general.

Tendințe SNR (Cifră 4.2) a oglindit rezultatele RSSI: SF12 a menținut o gamă SNR mai largă și mai stabilă pe toate etajele, rezultând mai puține defecțiuni de transmisie în comparație cu SF7, al cărui SNR a scăzut brusc odată cu distanța și obstacolele. În general, SF12 s-a dovedit mai fiabil pentru implementări LoRaWAN în interior, cu mai multe etaje, în special acolo unde obstacolele sau raza de acțiune sunt preocupări.

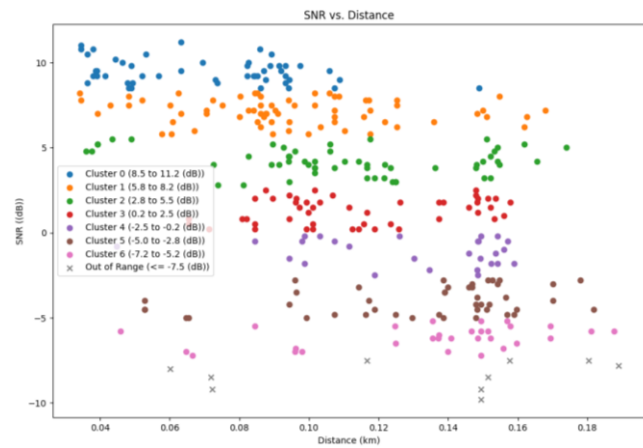


(a)

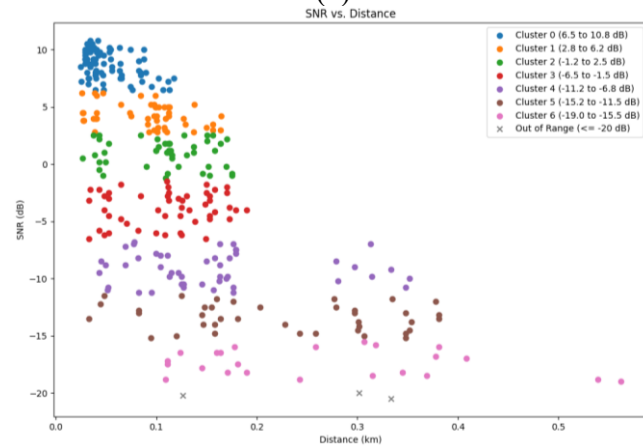


(b)

Cifră 4.1 RSSI VS. Distanța gateway-ului de la parter, (a) SF 7, (b) SF 12



(a)



(b)

Cifră 4.2 SNR vs. Distance parter , (a) SF 7, (b) SF 12

4.3 Metoda propusă pentru plasarea gateway-ului

Abordarea hibridă a folosit algoritmul de optimizare a roiului de particule (PSO) și algoritmul de evoluție diferențială (DE), metoda propusă folosește o abordare metaeuristică avansată pentru a optimiza mai multe obiective conflictuale în

LoRaWAN, maximizând RSSI și SNR, minimizând în același timp pierderea pachetelor. Acest lucru asigură performanțe optime ale rețelei pentru gateway-uri la diferite niveluri ale clădirii. Funcția obiectiv este evaluată folosind ecuația [45][46](4.2)

$$cost(weights) = \alpha \cdot norm_{rssi} + \beta \cdot norm_{snr} + \gamma \cdot norm_{packet_{loss}} \quad (4.2)$$

Mai jos arată algoritmul utilizat:

Algoritmul 1: Optimizarea roiului de particule hibride + evoluția diferențială (PSO + DE)

1. Intrare:
2. RSSI: Matrice de valori RSSI pentru fiecare etaj
3. SNR: Matrice de valori SNR pentru fiecare etaj
4. Packet_loss: Matrice de valori de pierdere a pachetelor pentru fiecare etaj
5. Etichetă: Descriptor (de exemplu, "SF12", "SF7")
6. Ieșire:
7. Greutăți optimizate (alfa, beta, gamma)
8. Scoruri optimizate pentru fiecare etaj
9. Începeți
10. // Normalizați datele de intrare
11. $norm_{rssi} = (rssi - \min(rssi)) / (\max(rssi) - \min(rssi))$
12. $norm_{snr} = (snr - \min(snr)) / (\max(snr) - \min(snr))$
13. $norm_{packet_{loss}} = 1 - (packet_{loss} - \min(packet_{loss})) / (\max(packet_{loss}) - \min(packet_{loss}))$
14. //Optimizați folosind PSO
15. $best_weights_pso = optimize_with_pso(n, norm_{rssi}, norm_{snr}, norm_{packet_{loss}})$
16. Funcția $optimize_with_pso(norm_{rssi}, norm_{snr}, norm_{packet_{loss}})$
17. Inițializați PSO cu parametri specifici
18. Pentru fiecare iterație:
19. Actualizați pozițiile și vitezele particulelor
20. Evaluați funcția de cost:
21. $cost(weights) = -1 \cdot (\alpha \cdot norm_{rssi} + \beta \cdot norm_{snr} + \gamma \cdot norm_{packet_{loss}})$
22. Actualizați vitezele și pozițiile particulelor pe baza celor mai bune rezultate personale și globale
23. Returnați cele mai bune greutăți () de la PSO α, β, γ
24. //Reglare fină folosind DE
25. $best_weights_de = optimize_with_de(best_weights_pso, n, norm_{rssi}, norm_{snr}, norm_{packet_{loss}})$
26. Funcția $optimize_with_de(best_weights_pso, n, norm_{rssi}, norm_{snr}, norm_{packet_{loss}})$
27. Stabiliți limite pentru alfa, beta și gamma
28. Inițializați populația în jurul $best_weights_pso$
29. Pentru fiecare generație:
30. Efectuați mutația, încrucișarea și selecția pe baza funcției de cost DE
31. Returnați cele mai bune ponderi găsite de DE
32. //Calculați și normalizați scorurile finale:
33. $final_scores = calculate_scores(etaje, rssi, snr, best_weights_de, packet_{loss})$
34. Funcție $calculate_scores(etaje, rssi, snr, best_weights): packet_{loss}$
35. $total_{weights} = \alpha + \beta + \gamma$
36. $normalized_{alpha} = \alpha / total_{weights}$
37. $normalized_{beta} = \beta / total_{weights}$
38. $normalized_{gamma} = \gamma / total_{weights}$
39. Pentru fiecare etaj:

40.
$$optimized_{score} = (normalized_{alpha} \cdot norm_{rssi}) + (normalized_{beta} \cdot norm_{snr}) + (normalized_{gamma} \cdot norm_{packet_{loss}})$$
41. Depozitați pentru podea $optimized_{score}$
42. Returnați dicționarul sau cadrul de date care conține etajele și scorurile optimizate corespunzătoare
43. //Afișează rezultatele:
44. Scoateți $best_weights_de$ și $final_scores$
45. Vizualizați scorurile pe o diagramă cu bare cu o hartă de culori care reflectă intensitatea scorului
46. Algoritmul de sfârșit

Algoritmul hibrid PSO + DE a arătat că amplasarea gateway-ului la ultimul etaj oferă cea mai bună performanță a rețelei. Pentru un singur gateway, ultimul etaj este optim pentru SF7 și SF12, iar al treilea etaj este o alternativă bună pentru SF12. Etajul cinci trebuie evitat din cauza interferențelor, iar parterul poate fi rezervă pentru SF7. În scenarii cu mai multe gateway-uri, includerea ultimului etaj minimizează pierderea de pachete (până la 0,83% pentru SF12) și maximizează performanța, cele mai bune rezultate fiind obținute cu combinații de tip Ground + Top sau Top + 1st + 3rd. Combinarea cu etajul cinci dă rezultate slabe, iar excluderea ultimului etaj duce la pierderi mari de pachete. Prioritizarea etajului superior este esențială pentru o rețea eficientă.

4.4 Un studiu comparativ al mediilor reale și simulate

Această secțiune compară performanța LoRaWAN folosind SF7 și SF12 prin experimente din lumea reală și simulări HTZ în condiții de vară. Mai jos, în tabel 4.2, rezumăm configurațiile pentru fiecare gateway împreună cu setările corespunzătoare pentru a ilustra configurarea în mod cuprinzător:

Masă 4.3 Configurarea parametrilor de simulare

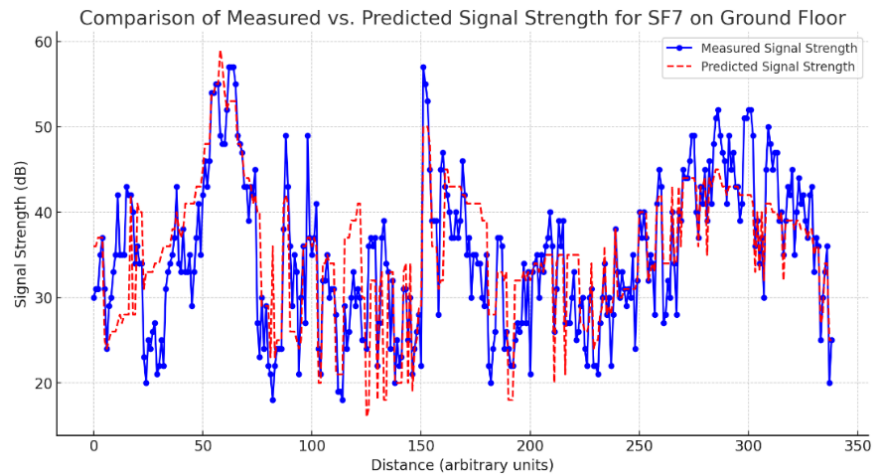
Parametru	Parter	Etajul	Partea superioară a clădirii
Frecvență (MHz)	868.100	868.100	868.100
Înălțimea antenei (m)	2.00	15.00	45.00
Câștig Tx/Rx (dB)	5.00	5.00	5.00
Lățime de bandă (kHz)	125.00	125.00	125.00
Putere nominală (W)	0.02511886	0.02511886	0.02511886
E.I.R.P (W)	0.07943282	0.07943282	0.07943282
Dimensiunea antenei (m)	0.17	0.17	0.17
Lățimea fasciculului (°)	360.00	360.00	360.00
Model de propagare	Determinist	Determinist	Determinist
Caracteristici suplimentare	Reflexii, conducte	Reflexii, conducte	Reflexii, conducte

Matricele de simulare oferă informații despre stabilitatea semnalului, acuratețea transmisiei și consistența semnalului primit. În Masă 4.4, am rezumat valorile de ieșire ale acestor trei matrice la diferite niveluri de clădire.

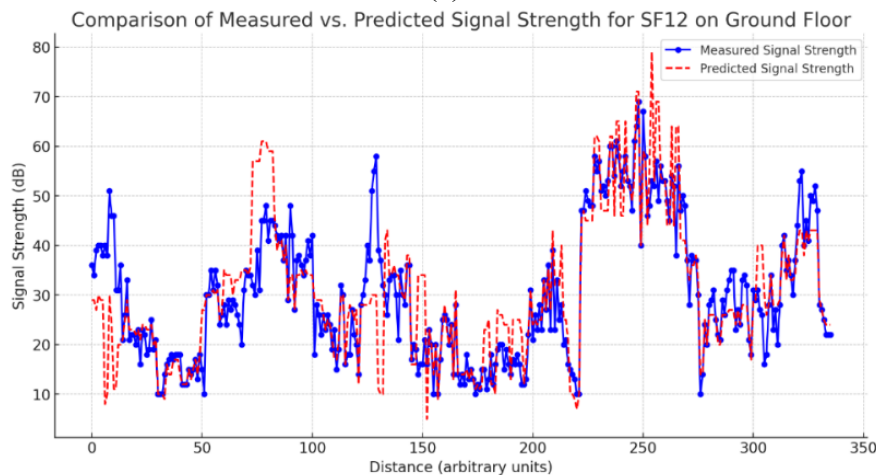
Masă 4.4 Valori simulate ale puterii semnalului pe toate etajele

Nivelul podelei	Factor de răspândire	Abatere standard	Eroare medie	Factor de corelație
Sol	SF7	5,76 dB	0,51 dB	0.77
	SF12	8,39 dB	0,33 dB	0.82
Treilea	SF7	6,48 dB	0,12 dB	0.90
	SF12	8,23 dB	1,83 dB	0.84
Culme	SF7	6,90 dB	0,45 dB	0.73
	SF12	11,01 dB	0,77 dB	0.58

O comparație a valorilor măsurate față de cele preconizate pentru SF7 și SF12 la gateway-ul de la parter dezvăluie diferențe cheie, așa cum se arată în (Cifră 4.3) SF12 prezintă modificări mai pronunțate, în timp ce SF7 rămâne relativ stabil.



(a)



(b)

Cifră 4.3 Comparația măsurată VS. puterea semnalului preconizată pe gateway-ul de la parter, (a) pentru SF7, (b) pentru SF12

4.5 Concluziile capitolului

Introduce și validează un algoritm hibrid PSO-DE pentru plasarea optimă a gateway-ului LoRaWAN. Demonstrează că implementarea strategică a gateway-urilor, în special la etajele superioare, îmbunătățește dramatic acoperirea și reduce pierderile de pachete, confirmând că performanța rețelei depinde mai mult de optimizarea poziționării decât de numărul de gateway-uri. Rezultatul acestui capitol a fost publicat ca:

K. A. Al-Sammak, S. H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.-M. C. Drăgulescu, C. Marghescu, A. Martian, N. A. M. Alduais, and N. A. H. Al-Sammak, *Optimizing LoRaWAN Gateway Placement in Urban Environments: A Hybrid PSO-DE Algorithm Validated via HTZ Simulations*, in **Technologies**, vol. 13, no. 6, p. 256, 17 June 2025, DOI: 10.3390/technologies13060256, ISI Q1 (2025). WOS:001514625000001.

Capitolul 5 Optimizarea eficienței energetice IoT: algoritmi adaptivi în timp real pentru contoare inteligente cu LoRaWAN și NB-IoT

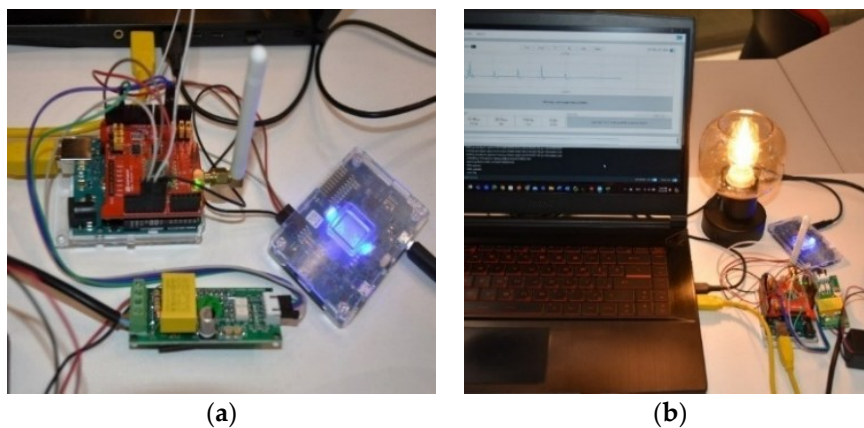
Rețelele inteligente bazate pe IoT acceptă monitorizarea energiei în timp real, dar contoarele alimentate cu baterii se luptă cu transmisii frecvente și congestie a rețelei. În timp ce LPWAN-urile precum LoRaWAN și NB-IoT ajută, eficiența este limitată de datele redundante. Acest capitol prezintă un algoritm adaptiv care trimite date numai atunci când apar modificări electrice semnificative, reducând transmisiile inutile. Testat pe o configurație reală, algoritmul a redus transmisiile cu peste 76% și a redus vârfurile de energie cu până la 88,5%.

5.1 Prezentare generală și metodologie a sistemului

Această lucrare folosește o abordare structurată pentru a evalua eficiența transmisiei de date și optimizarea energiei în contorizarea inteligentă IoT cu LoRaWAN și NB-IoT, comparând performanța cu și fără algoritmul adaptiv. Studiul acoperă proiectarea, implementarea și analiza performanței sistemului în mai multe faze.

5.1.1 Arhitectura de rețea LoRaWAN:

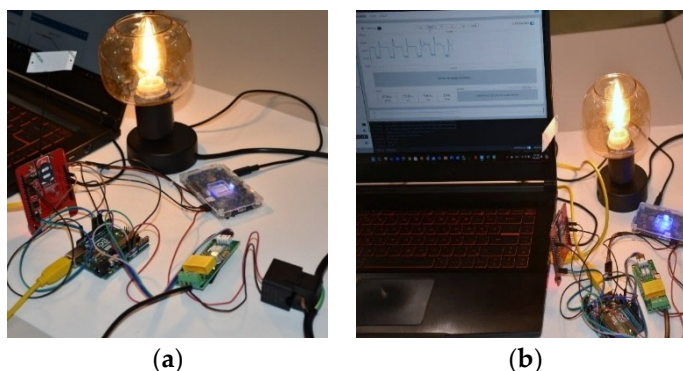
Sistemul de contorizare inteligentă folosește un Arduino Uno cu un Dragino LoRa Shield pentru a colecta și transmite date energetice către un gateway LG308. Gateway-ul trimite aceste date către TTN, care gestionează rutarea, securitatea și integrarea în cloud. Cifra 5.1 prezintă o prezentare generală a sistemului de arhitectură implementat folosind LoRaWAN.



Cifra 5.1 Configurarea unui sistem de contoare inteligente utilizând LoRaWAN

5.1.2 Arhitectura rețelei NB-IoT:

Dispozitivul final folosește un Arduino Uno cu un modul BG96 NB-IoT pentru a transmite date prin rețeaua celulară către ThingSpeak, o platformă cloud pentru stocarea și vizualizarea parametrilor contorului inteligent. Această configurație permite analiza în timp real a datelor energetice de la nodul IoT. Cifra 5.2 ilustrează arhitectura sistemului implementată folosind tehnologia NB-IoT.



Cifra 5.2 Configurarea unui sistem de contoare inteligente utilizând NB-IoT

5.2 Fluxul de lucru al sistemului și implementarea software-ului

Configurația experimentală a folosit dispozitive Arduino Uno cu un modul Dragino LoRa Shield (LoRaWAN) sau BG96 (NB-IoT), transmițând date către TTN sau ThingSpeak. Ambele sisteme au ajustat adaptiv intervalele de transmisie pe baza modificărilor datelor. Testele au rulat timp de 6 ore în condiții identice, comparând transmisiile standard cu interval fix cu o metodă optimizată care a redus consumul de energie prin trimiterea datelor numai atunci când au avut loc modificări semnificative.

5.2.1 Transmisie standard (fără algoritm):

În sistemele standard LoRaWAN și NB-IoT, Arduino Uno colectează date de la contorul PZEM004T și le transmite la intervale fixe, indiferent de modificările parametrilor. Toate datele sunt trimise către rețeaua respectivă (TTN pentru LoRaWAN, ThingSpeak pentru NB-IoT).

5.2.2 Transmisie optimizată (cu algoritm)

Algoritmul de gestionare a energiei propus folosește perioadele de transmisie adaptivă, gestionarea eficientă a sesiunilor și transmiterea selectivă a datelor pentru a optimiza consumul de energie în sistemele bazate pe IoT, în special cele care utilizează protocoalele LoRaWAN și NB-IoT. Această propunere se concentrează pe o durată de viață extinsă și un consum redus de energie fără a pierde credibilitatea datelor. Următorii sunt algoritmi de optimizare pe care i-am folosit în sistemele noastre de lucru în fiecare scenariu:

Algoritmul 1: Managementul optimizat al energiei LoRaWAN

1. Intrare :
2. TX_INTERVAL : Intervalul inițial de transmisie
3. LMIC : Biblioteca de comunicații LoRaWAN
4. PZEM-004T : Senzor pentru colectarea parametrilor electrici (contor inteligent)
5. Ieșire :
6. Optimizat consum de energie pentru IoT-Node (contor inteligent)
7. Transmisie stare
8. Începe
9. //Sistem Inițializare
10. Inițializați comunicare serială
11. Stabilit Parametrii ferestrei RX pentru o toleranță de sincronizare crescută
12. Încercare pentru a restabili sesiunea de rețea din EEPROM sau pentru a iniția procesul de asociere
13. Inițializați Senzor PZEM-004T pentru colectarea datelor
14. //Principal Fluxul de lucru al sistemului
15. Setați TX_INTERVAL pentru transmiterea datelor
16. Măner evenimente de rețea (EV_JOINING, EV_JOINED, EV_TXCOMPLETE, EV_JOIN_FAILED)
17. - Gestionați înscrierea
18. - Salvați sesiunea
19. - Implementați acțiuni de economisire a energiei
20. //Date Citire și transmisie
21. Funcție do_send():
22. Dacă Transmiterea este în curs de desfășurare:
23. Imprimare "Transmitere în curs"
24. Întoarcere
25. Altfel :
26. Citiți Date senzor
27. Validați și calculează rata de schimbare
28. Dacă Modificări semnificative detectate:

29. Pregătește-te și trimite sarcina utilă
30. Resetare TX_INTERVAL
31. Altfel :
32. Crește TX_INTERVAL
33. Intrați Mod de repaus
34. //Intrarea Modul de repaus
35. Intră modul de repaus profund după transmiterea datelor sau dacă nu este detectată nicio modificare semnificativă
36. //Eveniment Manipulare pentru operațiuni de rețea
37. Utilizare onEvent() la:
38. Măner Evenimente de rețea
39. Magazin detalii sesiune în EEPROM
40. //Bucă pentru rularea continuă a sistemului
41. Continuu rulați bucla de evenimente LMIC folosind os_runloop_once()
42. Sfârșit Algoritm

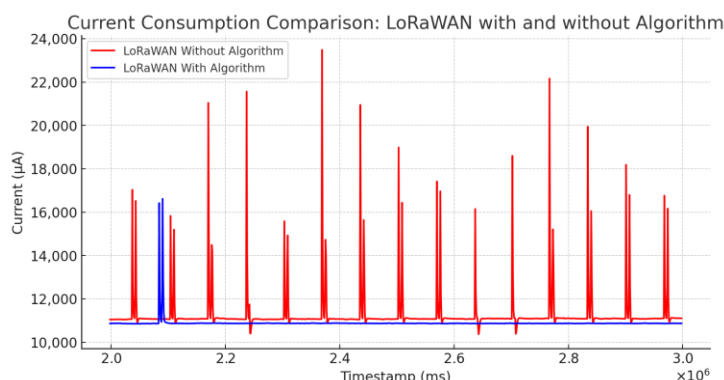
Algoritm 2: Managementul optimizat al energiei NB-IoT

1. Intrare s:
2. TX_INTERVAL : Intervalul inițial de transmisie.
3. PZEM-004T : Senzor pentru colectarea parametrilor electrici (contor inteligent).
4. Ieșiri :
5. Optimizat consum de energie pentru IoT-Node (contor inteligent).
6. Transmisie stare.
7. Începe
8. //Sistem Inițializare//
9. comunicare serială pentru BG96 și PZEM-004T. Configurat
10. Configurați Setări de rețea BG96 (de exemplu, APN, mod de rețea pentru NB-IoT și setări de bandă).
11. Încercare pentru a restabili sesiunea de rețea anterioară din EEPROM; Dacă nu este disponibil, inițiază înregistrarea în rețea.
12. Inițializați senzorul PZEM-004T pentru colectarea datelor.
13. //Principal Fluxul de lucru al sistemului//
14. Setăți TX_INTERVAL pentru transmiterea datelor.
15. Măner Evenimente de rețea de gestionat:
16. Înregistrare și conectarea la rețeaua NB-IoT.
17. Date starea transmisiei (de exemplu, succes sau eșec).
18. Sesiune pentru a salva detaliile pentru reconectare și pentru a gestiona acțiunile de economisire a energiei.
19. //Date Citire și transmisie//
20. Utilizare do_send() pentru a gestiona transmiterea datelor:
21. Dacă transmisia este în curs, afișați starea și ieșiți din funcție.
22. Altfel , continuați cu următorii pași:
23. Citiți Date senzor: Colectați tensiunea, curentul, puterea, energia, frecvența și factorul de putere de la PZEM-004T și stocați-le în matricea St.
24. Validați Date: Asigurați-vă că fiecare citire este validă; dacă vreo citire este nevalidă (de exemplu, valori NaN), afișați un mesaj de eroare și omiteți procesarea ulterioară.
25. Calculați Rata de modificare: Comparați citirile curente (St) cu citirile anterioare (St_1) și calculați rata de modificare pentru fiecare măsurătoare.
26. Semnificativ Verificare schimbare:
27. Dacă Modificări semnificative detectate:

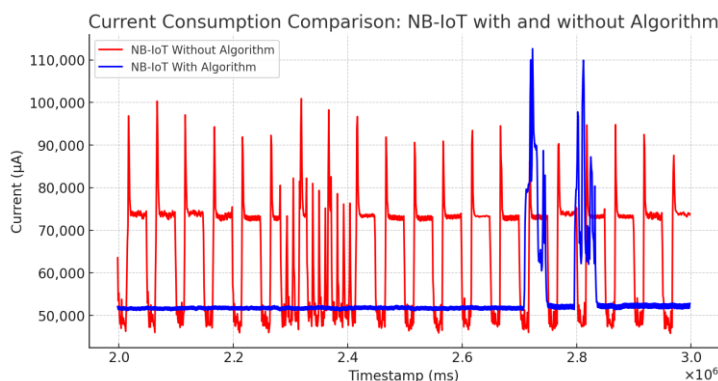
28. Pregătește-te o sarcină utilă cu valori ale senzorilor.
 29. Trimite sarcina utilă către serverul cloud (ThingSpeak) folosind solicitarea HTTP GET prin BG96.
 30. Imprimați "Datele ar trebui trimise în cloud".
 31. Resetare TX_INTERVAL la valoarea sa inițială.
 32. Actualizare St_1 cu citirile actuale pentru comparații viitoare.
 33. Dacă nicio modificare semnificativă:
 34. Imprimare "Nu este nevoie să trimiteți date".
 35. Crește TX_INTERVAL pentru o frecvență redusă de transmisie.
 36. Intră modul de repaus pentru a economisi energie.
 37. //Continuu Funcționarea sistemului//
 38. Fugi bucla de evenimente NB-IoT în mod continuu.
 39. Sfârșit Algoritm
-

5.3 Rezultate și analiză

Această secțiune prezintă rezultatele experimentale pentru contorizarea inteligentă LoRaWAN și NB-IoT, comparând transmisia de date standard și optimizată folosind algoritmul adaptiv propus. Fără optimizare, LoRaWAN și NB-IoT au prezentat un consum ridicat de curent ($>23.000 \mu A$ și, respectiv, $>90.000 \mu A$; (Figura 5.4 și figura 5.5). Algoritmul adaptiv a redus curentul LoRaWAN la sub $10.000 \mu A$ și NB-IoT la sub $60.000 \mu A$, reducând în același timp pachetele transmise cu 76,11% (LoRaWAN) și 86,81% (NB-IoT).



Cifră 5.3 Rezultatele consumului de curent (μA) pentru LoRaWAN



Cifră 5.4 Rezultatele consumului de curent (μA) pentru NB-IoT

Algoritmul adaptiv a redus vârfurile de energie cu 88,5% în LoRaWAN (de la 80 la 5 vârfuri) și cu 87,3% în NB-IoT (de la 600 la 75 de vârfuri). Creșterea pragului de transmisie a datelor a scăzut și mai mult numărul de pachete, arătând capacitatea algoritmului de a filtra datele redundante. În general, această abordare reduce consumul de energie, minimizează transmisiile inutile și îmbunătățește considerabil eficiența energetică atât în aplicațiile de contorizare inteligentă LoRaWAN, cât și în cele NB-IoT.

5.4 Concluziile capitolului

A fost dezvoltat și testat un algoritm de transmisie adaptivă, reducând semnificativ transmisiile inutile de date și consumul de energie atât în sistemele de contorizare inteligentă NB-IoT, cât și în cele LoRaWAN. Rezultatele demonstrează economii substanțiale de energie, sprijinind contorizarea inteligentă scalabilă și durabilă. Aceste constatări au fost publicate ca:

K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.-M.C. Drăgulescu, C. Marghescu, A. Martian, N.A.H. Al-Sammak, G. Suci, K.M.A. Alheeti, *Optimizing IoT Energy Efficiency: Real-Time Adaptive Algorithms for Smart metering with LoRaWAN and NB-IoT*, in *Energies*, 18(4), 987, 18 February 2025, DOI: 10.3390/en18040987, ISI Q3, WOS: 001431808900001.

Capitolul 6 Concluzii și lucrări viitoare

6.1 Rezultatele și contribuțiile cercetării

Această teză abordează sistematic întrebări cheie de cercetare în contextul contorizării inteligente bazate pe LPWAN, validate prin experimente extinse și având ca rezultat mai multe contribuții de mare impact și lucrări publicate.

RQ1: Care sunt aspectele critice de proiectare, cerințele de performanță și provocările emergente pentru tehnologiile de comunicații în sistemele de contorizare inteligentă?

Constatare: A furnizat o revizuire cuprinzătoare și o comparație sistematică a tehnologiilor de contorizare inteligentă cu fir și fără fir, analizând criterii esențiale precum acoperirea, scalabilitatea, latența, eficiența energetică și securitatea.

Contribuție: A identificat cerințele de bază și provocările emergente, inclusiv acoperirea profundă, constrângerile energetice și integrarea protocoalelor, punând bazele pentru comunicații robuste și eficiente de contorizare inteligentă.

Lucrări publicate conexe:

- **K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, *Communications Systems in Smart metering: A Concise Systematic Literature Review*, in Proceedings of the 2022 14th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, 16–18 June 2022, pp. 1–9, IEEE, DOI: 10.1109/COMM54429.2022.9817154.**

RQ2: Care sunt caracteristicile și limitările cheie de performanță ale NB-IoT și LoRaWAN pentru aplicațiile de contorizare inteligentă?

Constatare: A livrat prima evaluare empirică, alăturată a NB-IoT și LoRaWAN pentru contorizarea inteligentă, combinând simulări și experimente din lumea reală. LoRaWAN s-a dovedit a fi mai eficient din punct de vedere energetic, dar sensibil la plasarea gateway-ului; NB-IoT este mai robust, dar consumă mai multă energie, mai ales în condiții de semnal slab.

Contribuție: A stabilit compromisuri critice și considerații de implementare pentru selecția tehnologiei, informând direct cele mai bune practici pentru lansările de contorizare inteligentă în lumea reală.

Lucrări publicate conexe:

- **K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.M. Drăgulinescu, C. Marghescu, N.A.H. Al-Sammak, *An Experimental Study of Power Consumption in Narrowband IoT Devices*, in Proceedings of the 2024 15th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, 03–04 October 2024, pp. 1–6, IEEE, DOI: 10.1109/COMM62355.2024.10741514.**

- **K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, C. Marghescu, A.M. Drăgulescu, G. Suciu, A.G. Abdulqader, *A Comprehensive Assessment of LoRaWAN and NB-IoT Performance Metrics Under Varied Payload Data Sizes*, in **Proceedings of the 2024 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)**, Iași, Romania, **27–28 June 2024**, pp. 1–5, IEEE, DOI: 10.1109/ECAI61503.2024.10607481.**
- **K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, N.A.H. Al-Sammak, G. Suciu, *An Evaluation of the Functionality of NB-IoT for Smart metering Applications*, in **Proceedings of the International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (INFUS 2025)**, Istanbul, Turkey, **29–31 July 2025**. **RQ3: Cum poate fi optimizată amplasarea gateway-ului pentru rețelele LoRaWAN pentru a îmbunătăți acoperirea, fiabilitatea și eficiența?****

Constatare: A introdus și validat cadrul de optimizare hibridă GateOpt PSODE (PSO + DE), folosind datele reale ale semnalului și clusterizarea pentru a determina locațiile optime ale gateway-ului. S-a demonstrat că gateway-urile de la ultimul etaj oferă în mod constant cea mai bună acoperire și cea mai mică pierdere de pachete, în timp ce adăugarea gateway-urilor fără optimizare strategică poate reduce performanța generală a rețelei.

Contribuție: A fost pionier al unei abordări practice de optimizare cu mai multe criterii pentru infrastructura LPWAN rentabilă și fiabilă în clădirile cu mai multe etaje.

Lucrări publicate conexe:

- **K. A. Al-Sammak, S. H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.-M. C. Drăgulescu, C. Marghescu, A. Martian, N. A. M. Alduais, and N. A. H. Al-Sammak, *Optimizing LoRaWAN Gateway Placement in Urban Environments: A Hybrid PSO-DE Algorithm Validated via HTZ Simulations*, in **Technologies**, vol. 13, no. 6, p. 256, 17 June 2025, DOI: 10.3390/technologies13060256, ISI Q1 (2025), WOS:001514625000001.**

RQ4: Ce strategii pot fi utilizate pentru a îmbunătăți eficiența energetică a nodurilor de contorizare inteligentă prin transmisie adaptivă?

Constatare: A dezvoltat și validat experimental un algoritm de transmisie adaptivă care transmite doar la modificări semnificative ale parametrilor, reducând numărul de pachete cu până la 87% și vârfurile de energie cu până la 88% atât pentru dispozitivele LoRaWAN, cât și pentru NB-IoT.

Contribuție: A demonstrat o soluție scalabilă, intertehnologică, pentru economii substanțiale de energie și reducerea congestiei în rețelele de contorizare inteligentă.

Lucrări publicate conexe:

- **K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.-M.C. Drăgulescu, C. Marghescu, A. Martian, N.A.H. Al-Sammak, G. Suciu, K.M.A. Alheeti, *Optimizing IoT Energy Efficiency: Real-Time Adaptive Algorithms for Smart metering with LoRaWAN and NB-IoT*, in **Energies**, 18(4), 987, 18 February 2025, DOI: 10.3390/en18040987, ISI Q3, WOS: 001431808900001.**

Aceste descoperiri avansează în mod colectiv domeniul contorizării inteligente prin reducerea lacunelor teoretice cu soluții practice - oferind noi perspective comparative, algoritmi de optimizare și metode adaptive pentru a permite următoarea generație de sisteme de contorizare fiabile, eficiente din punct de vedere energetic și scalabile bazate pe IoT.

6.2 Publicații de autor

- [1] **Journal:** K. A. Al-Sammak, S. H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.-M. C. Drăgulescu, C. Marghescu, A. Martian, N. A. M. Alduais, and N. A. H. Al-Sammak, *Optimizing LoRaWAN Gateway Placement in Urban Environments: A Hybrid PSO-DE Algorithm Validated via HTZ Simulations*, in **Technologies**, vol. 13, no. 6, p. 256, 17 June 2025, DOI: 10.3390/technologies13060256, ISI Q1 (2025), WOS:001514625000001.
- [2] **Journal:** K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.-M.C. Drăgulescu, C. Marghescu, A. Martian, N.A.H. Al-Sammak, G. Suci, K.M.A. Alheeti, *Optimizing IoT Energy Efficiency: Real-Time Adaptive Algorithms for Smart metering with LoRaWAN and NB-IoT*, in **Energies**, 18(4), 987, 18 February 2025, DOI: 10.3390/en18040987, ISI Q3, WOS: 001431808900001.
- [3] **Conference:** K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, A.M. Drăgulescu, C. Marghescu, N.A.H. Al-Sammak, *An Experimental Study of Power Consumption in Narrowband IoT Devices*, in **Proceedings of the 2024 15th International Conference on Communications (COMM)**, Bucharest, Romania, 03–04 October 2024, pp. 1–6, IEEE, DOI: 10.1109/COMM62355.2024.10741514.
- [4] **Conference:** K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, C. Marghescu, A.M. Drăgulescu, G. Suci, A.G. Abdulqader, *A Comprehensive Assessment of LoRaWAN and NB-IoT Performance Metrics Under Varied Payload Data Sizes*, in **Proceedings of the 2024 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)**, Iași, Romania, 27–28 June 2024, pp. 1–5, IEEE, DOI: 10.1109/ECAI61503.2024.10607481.
- [5] **Conference:** K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, I. Marghescu, *Communications Systems in Smart metering: A Concise Systematic Literature Review*, in **Proceedings of the 2022 14th International Conference on Communications (COMM)**, Bucharest, Romania, 16–18 June 2022, pp. 1–9, IEEE, DOI: 10.1109/COMM54429.2022.9817154.
- [6] **Conference:** K.A. Al-Sammak, S.H. Al-Gburi, N.A.H. Al-Sammak, G. Suci, *An Evaluation of the Functionality of NB-IoT for Smart metering Applications*, in **Proceedings of the International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (INFUS 2025)**, Istanbul, Turkey, 29–31 July 2025.
- [7] **Journal:** S.H. Al-Gburi, K.A. Al-Sammak, I. Marghescu, C.C. Oprea, A.-M.C. Drăgulescu, N.A.M. Alduais, K.M.A. Alheeti, N.A.H. Al-Sammak, N.A.H. *EffRes-DrowsyNet: A Novel Hybrid Deep Learning Model Combining EfficientNetB0 and ResNet50 for Driver Drowsiness Detection* in **Sensors**, 25,

- 3711, 13 June 2025, DOI:10.3390/s25123711, ISI Q2 (2025), WOS:001516386400001.
- [8] **Journal:** S.H. Al-Gburi, **K.A. Al-Sammak**, I. Marghescu, C.C. Oprea, A.-M.C. Drăgulinescu, G. Suciu, K.M.A. Alheeti, N.A.M. Alduais, N.A.H. Al-Sammak, *Introducing a Novel Fast Neighbourhood Component Analysis–Deep Neural Network Model for Enhanced Driver Drowsiness Detection* in **Big Data and Cognitive Computing**, 9(5), 126, 08 May 2025, DOI: 10.3390/bdcc9050126, ISI Q1 (2025), WOS: 001497786100001.
- [9] **Conference:** S.H. Al-Gburi, **K.A. Al-Sammak**, I. Marghescu, C.C. Oprea, K.M.A. Alheeti, N.A.A. Almosa, *Analyzing Different Models for Driver Behavior Detection Using EEG Data*, in **Proceedings of the 2024 15th International Conference on Communications (COMM)**, Bucharest, Romania, 03–04 October 2024, pp. 1–5, IEEE, DOI: 10.1109/COMM62355.2024.10741402.
- [10] **Conference:** S.H. Al-Gburi, **K.A. Al-Sammak**, K.M.A. Alheeti, G. Suciu, A.G. Abdulqader, *Driver Behavior Assessment with Different ML Models Using EEG and Physiological Data – A Comparative Study*, in **Proceedings of the 2024 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)**, Iași, Romania, 27–28 June 2024, pp. 1–6, IEEE, DOI: 10.1109/ECAI61503.2024.10607554.
- [11] **Journal:** S. H. Al-Gburi, **K. A. Al-Sammak**, I. Marghescu, and C. C. Oprea, *State of the Art in Drivers' Attention Monitoring – A Systematic Literature Review*, **Karbala International Journal of Modern Science**, vol. 9, no. 1, Jan. 2023, DOI: 10.33640/2405-609x.3278. Scopus Q2.
- [12] **Conference:** S.H. Al-Gburi, **K.A. Al-Sammak**, N.A.A. Almosa, G. Suciu, N.A.H. Al-Sammak, *Comparative Analysis of Logistic Regression and SVM Models for Drowsiness Detection in Drivers*, in **Proceedings of the International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (INFUS 2025)**, Istanbul, Turkey, 29–31 July 2025.
- [13] **Conference:** G. Suciu, C. Stalidi, **K.A. Al-Sammak**, S.H. Al-Gburi, M.-A. Sachian, *Integrated Solution Based on Innovative Digital Technologies for Smart Ports*, **FOR-FREIGHT Project White Paper**, BEIA Consult International, Bucharest, Romania, 2023, available at: <https://www.for-freight.eu/publications/>.

6.3 Lucrări viitoare

Direcțiile viitoare de cercetare pentru extinderea în continuare a acestei lucrări includ:

- Aplicați învățarea automată pentru transmisie adaptivă în timp real pe baza rețelei și a condițiilor de mediu.
- Utilizați blockchain pentru a îmbunătăți securitatea și transparența în contorizarea inteligentă.
- Dezvoltați noduri IoT alimentate cu energie regenerabilă pentru o funcționare mai lungă și durabilă.
- Testați scalabilitatea algoritmului în rețele IoT mai mari și diverse.

Bibliografie

- [1] Apriantoro, Roni, Amin Suharjono, Kurnianingsih Kurnianingsih, and I. Ketut Agung Enriko., "Investigation of Coverage and Signal Quality of LoRaWAN Network in Urban Area," in *International Conference on Computer Engineering, Network, and Intelligent Multimedia (CENIM)*, 2020.
- [2] Majid, Mamoonah, Shaista Habib, Abdul Rehman Javed, Muhammad Rizwan, Gautam Srivastava, Thippa Reddy Gadekallu, and Jerry Chun-Wei Lin., "Applications of wireless sensor networks and internet of things frameworks in the industry revolution 4.0: A systematic literature review," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2087, 2022.
- [3] Swamy, S. Narasimha, and Solomon Raju Kota, "An empirical study on system level aspects of Internet of Things (IoT)," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 188082-188134, 2020.
- [4] Abdulazeez, Sabah, Abbas Khalifa Nawar, Nawar Banwan Hassan, and Emad Tariq, "Internet of Things: Architecture, technologies, applications, and challenges," *AlKadhim Journal for Computer Science*, vol. 2, pp. 36-52, 2024.
- [5] Silva, J  ssica Alice A., Juan Camilo L  pez, Cindy Paola Guzman, Nataly Ba  ol Arias, Marcos J. Rider, and Luiz CP da Silva., "An IoT-based energy management system for AC microgrids with grid and security constraints," *Applied Energy*, vol. 337, p. 120904, 2023.
- [6] Barros, Tiago GF, Eronides F. Da Silva Neto, Jo  o Alexandre Da Silva Neto, Andr   GM De Souza, Vitor B. Aquino, and Erico S. Teixeira., "The anatomy of IoT platforms—A systematic multivocal mapping study," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 72758-72772, 2022.
- [7] Pawar, P., and K. Vittal., "Design and development of advanced smart energy management system integrated with IoT framework in smart grid environment," *Journal of Energy Storage*, vol. 25, p. 100846, 2019.
- [8] Abate, F., M. Carrat  , C. Liguori, and V. Paciello., "A low cost smart power meter for IoT," *Measurement*, vol. 136, pp. 59-66, 2019.
- [9] Shaukat, N., Ali, S. M., Mehmood, C. A., Khan, B., Jawad, M., Farid, U., & Majid, M. , "A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within Smart Grid.," *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 81, pp. 1453-1475, 2018.
- [10] M. E. S. & Z. A. Rafiei, "Wireless communication protocols for smart metering applications in power distribution networks," in *17th Conference Electrical Power Distribution Networks (EPDC)*, 2012 .
- [11] L. & X.-y. W. Wei-xuan, "The Research of AMR in Smart Meter," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2010 .
- [12] Yu, Rong, Yan Zhang, Stein Gjessing, Chau Yuen, Shengli Xie, and Mohsen Guizani. ". " 25, no. 5 (): ., "Cognitive radio based hierarchical communications infrastructure for smart grid," *IEEE network*, vol. 25, no. 5, pp. 6-14, 2011.
- [13] Al-Turjman, Fadi, and Mohammad Abujubbeh, "IoT-enabled smart grid via SM: An overview," *Future Generation Computer Systems*, vol. 96, pp. 579-590, July 2019.
- [14] Mulla, Afshan Y., Jaypal J. Baviskar, Faruk S. Kazi, and Sushama R. Wagh, "'Implementation of ZigBee/802.15.4 in Smart Grid communication and analysis of power consumption: A case study," *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pp. 1-7, 2014.
- [15] Menaga, S., R. Nivetha, B. Nivethaa, E. Paul Shiny, and K. Vishnu Priya. , "Smart Grid Meter Using ZigBee WSN," *Research and Applications: Embedded System*, vol. 2, no. 3, pp. 9-15., 2018.
- [16] Cecilia, A. Arockia, and K. Sudarsanan, "A survey on smart grid.," *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS)*, pp. 1-7, 2016.
- [17] Al-Sammak, Kanar, AL-Gburi Sama, and Ion Marghescu, "Communications Systems in Smart Metering: A Concise Systematic Literature review," in *14th International Conference on Communications (COMM)*, 2022.
- [18] de Carvalho Silva, Jonathan, Joel JPC Rodrigues, Antonio M. Alberti, Petar Solic, and Andre LL Aquino, "LoRaWAN—A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and

- opportunities,” *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, pp. 1-6, 2017.
- [19] Nashiruddin, Muhammad Imam, and Alvin Yusri., “Sigfox network planning for smart metering based on internet of things for dense urban scenario,” in *8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*,., 2020.
 - [20] K. Mochizuki, K. Obata, K. Mizutani, H. Harada, “Development and field experiment of wide area Wi-SUN system based on IEEE 802.15.4g,” *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, p. 76–81, 2016.
 - [21] L. Alliance, “LoRaWAN® 1.0.4 Specification,” 2020. [Online]. Available: https://loralliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0-4/. [Accessed 27 12 2024].
 - [22] LoRa Alliance. . LoRa Alliance, “RP2-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters,” 2021. [Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters>. [Accessed 27 12 2024].
 - [23] Almuhaya, Mukarram AM, Waheb A. Jabbar, Noorazliza Sulaiman, and Suliman Abdulmalek, “A survey on Lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions,” *Electronics*, vol. 11, no. 1, p. 164, 2022.
 - [24] Agrawal, Shilpy, and Khvati Chopra, “Analysis of energy efficient narrowband internet of things (NB-IoT): LPWAN comparison, challenges, and opportunities,” *Wireless Communication with Artificial Intelligence*, pp. 197-217, 2022.
 - [25] Abostait, Abdallah, Rania M. Tawfik, M. Saeed Darweesh, and Hassan Mostafa, “Design and FPGA-Based Hardware Implementation of NB-IoT Physical Uplink Shared Channel Transmitter and Physical Downlink Shared Channel Receiver,” *Electronics* , vol. 9, no. 1, 2023.
 - [26] Al-Sammak, Kanar Alaa, Sama Hussein Al-Gburi, Ion Marghescu, Ana Maria Drăgulinescu, Cristina Marghescu, and Nawar Alaa Hussein Al Sammak, “An Experimental Study of Power Consumption in Narrowband IoT Devices,” in *15th International Conference on Communications (COMM)*, 2024.
 - [27] Ancillotti, E., Bruno, R., & Conti, M., “The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges,” *Computer Communications*, vol. 36, no. 17-18, pp. 1665-1697, 2013.
 - [28] Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. , “For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid,” in *Proceedings of the IEEE*, 2011.
 - [29] Ballerini, Massimo, Tommaso Polonelli, Davide Brunelli, Michele Magno, and Luca Benini, “NB-IoT versus LoRaWAN: An experimental evaluation for industrial applications,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 12, pp. 7802-7811, 2020.
 - [30] Sanchez-Gomez, Jesus, Jorge Gallego-Madrid, Ramon Sanchez-Iborra, and Antonio F. Skarmeta, “Performance study of LoRaWAN for smart-city applications,” *IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)* , pp. 58-62, 2019.
 - [31] Levchenko, Polina, Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, and Andrey Lyakhov, “Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN,” *Sensors* , vol. 22, no. 24, p. 9633, 2022.
 - [32] Sánchez-Sutil, F.; Cano-Ortega, A.; Hernández, J.C., “Design and Implementation of a Smart Energy Meter Using a LoRa Network in Real Time,” *Electronics (Basel)* , vol. 10, p. 3152, 2021.
 - [33] Slaný, V.; Lučanský, A.; Koudelka, P.; Mareček, J.; Krčálová, E.; Martínek, R., “An Integrated IoT Architecture for Smart Metering Using next Generation Sensor for Water Management Based on LoRaWAN Technology: A Pilot Study.,” *Sensors (Basel)*, vol. 20, p. 4712, 2020.
 - [34] Piechowiak, M.; Zwierzykowski, P.; Musznicki, B., “LoRaWAN Metering Infrastructure Planning in Smart Cities.,” *Appl. Sci (Basel)*, vol. 13, p. 8431, 2023.
 - [35] Hseiki, H.; El-Hajj, A.M.; Ajra, Y.; Hija, F.A.; Haidar, A.M. , “A Secure and Resilient Smart Energy Meter,” *IEEE Access*, vol. 12, p. 3114–3125, 2024.
 - [36] Svertoka, Ekaterina, Alexandru Rusu-Casandra, Radim Burget, Jari Nurmi, and Aleksandr Ometov., “k-NN Empowered LoRaWAN Localization for Surface and Underground Scenarios: Work-in-Progress Report,” *Proceedings of Work-in-Progress in Hardware and Software for Location Computation (WIPHAL 2024)*, 2024.
 - [37] Cruz, Hugo AO, Sidnir CB Ferreira, Jasmine PL Araújo, Fabrício JB Barros, Fabrício S. Farias, Miércio CA Neto, Maria EL Tostes, Andréia A. Nascimento, and Gervásio PS Cavalcante,

- “Methodology for lora gateway placement based on bio-inspired algorithms for a smart campus in wooded area,” *Sensors*, vol. 22, no. 17, p. 6492, 2022.
- [38] Shivaraman, Nitin, Seima Saki, Zhiwei Liu, Saravanan Ramanathan, Arvind Easwaran, and Sebastian Steinhorst, “Real-time energy monitoring in IoT-enabled mobile devices,” in *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2020.
 - [39] Kanakaraja, P., Sourabh Upadhyay, Sarat K. Kotamraju, G. Venkata Sai Suneela, and Rudra Neelesh, “Design and implementation of smart energy meter using LoRa-WAN and IoT applications,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1804, no. 1, p. 012207, 2021.
 - [40] Jabbar, Waheb A., Sanmathy Annathurai, Tajul Ariffin A. Rahim, and M. Fitri Mohd Fauzi, “Smart energy meter based on a long-range wide-area network for a stand-alone photovoltaic system,” *Expert Systems with Applications*, vol. 197, p. 116703, 2022.
 - [41] Ashokkumar, N.; Arun, V.; Prabhu, S.; Kalaimagal, V.; Srinivasan, D.; Shanthi, B., “Design and Implementation of IoT Based Energy Efficient Smart Metering System for Domestic Applications.,” in *9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 2023.
 - [42] Siva Balan, R.V.; Gouri, M.S.; Senthilnathan, T.; Gondkar, S.R.; Gondar, R.R.; Loveline Zeema, J.; Jothikumar, R., “Development of Smart Energy Monitoring Using NB-IOT and Cloud,” *Measur. Sens.*, vol. 29, p. 100884, 2023.
 - [43] Kopják, József, and István Szűcs, “NB-IoT Based IoT Gateway Reference Design for Energy Metering,” in *18th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, 2024 .
 - [44] Abbas, Ahmed M., Khaled Y. Youssef, Imbaby I. Mahmoud, and Abdelhalim Zekry., “NB-IoT optimization for smart meters networks of smart cities: Case study.,” *Alexandria Engineering Journal* 59, vol. 6, pp. 4267-4281, 2020.
 - [45] Wang, Dongshu, Dapei Tan, and Lei Liu., “Particle swarm optimization algorithm: an overview,” *Soft computing*, vol. 22, no. 2, pp. 387-408, 2018.
 - [46] Price, Kenneth V., Rainer M. Storn, and Jouni A. Lampinen., “Differential evolution: a practical approach to global optimization,” in *The differential evolution algorithm*, 2005, pp. 37-134.