Universitatea Transilvania din Brașov

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor

Bernardo Yaser LEÓN ÁVILA

Colectarea energiei pentru alimentarea nodurilor rețelelor de senzori wireless

REZUMAT

Conducător științific

Prof. Dr. Petru Adrian COTFAS

Prof. Dr. Luis Alberto QUINTERO DOMÍNGUEZ

BRAȘOV, 2026

CONȚINUT

1 Introducere 1

1.1 Justificarea, relevanța și actualitatea subiectului de cercetare 1

1.2 Structura tezei de doctorat 4

2 Analiza stadiului actual al cunoașterii 6

2.1 Cadrul de Declarație PRISMA 6

2.2 Tehnologii și mecanisme EH 7

2.2.1 Studii de caz și aplicații 8

2.2.2 Energie obținută de la recoltator 9

2.3 Stocarea energiei în BF-WSN 10

2.3.1 Supercondensatoare (SC) 10

2.4 Etajul de Management al Energiei (PMS) 12

2.4.1 Ciclul energetic în EH-WSN 12

2.4.2 Soluții cu SC 13

2.5 Concluzii parțiale 14

3 Cadrul Tehnologic 19

3.1 Comportamentul dispozitivului 20

3.1.1 Arhitectura sistemului 20

3.2 Model de simulare pentru Mote 21

3.3 Concluzii parțiale 24

4 Implementarea și validarea sistemului 26

4.1 Arhitectura sistemului 26

4.2 Platforma IoT 27

4.3 Sink 29

4.4 Prototipul Mote 30

4.5 Implementarea în teren 33

4.5.1 Comportamentul operațional pe întregul an 34

4.6 Considerente de securitate 37

4.6.1 Între mote și sink 37

4.6.2 Între sink și platformă 39

4.6.3 Stratul aplicației 40

4.7 Concluzie parțială 40

5 Concluzii finale. Contribuții originale și direcții viitoare de cercetare 43

5.1 Contribuții originale 45

5.2 Direcții viitoare de cercetare 47

Bibliografie 49

1 INTRODUCERE

Rețelele de senzori fără fir (Wireless Sensor Networks, WSN) reprezintă o tehnologie esențială pentru o gamă largă de aplicații. O astfel de rețea este alcătuită, de regulă, din noduri de senzori distribuite spațial (denumite și motes, în concordanță cu terminologia IoT), capabile să măsoare, să proceseze și să transmită fără fir datele, energia fiind factorul limitativ dominant. Prin urmare, proiectarea unui mote nu poate fi abordată izolat: achiziția datelor, procesarea, comunicația și gestionarea energiei trebuie co-optimizate pentru a minimiza consumul energetic și a prelungi durata de funcționare. În mod tradițional, această provocare a fost abordată prin motes alimentate de la baterii; totuși, această abordare limitează în mod fundamental autonomia pe termen lung și scalabilitatea.

Recoltarea energiei (Energy Harvesting, EH) a apărut ca o abordare promițătoare pentru depășirea acestor limitări [1], permițând motes-urilor să extragă energie din surse ambientale precum energia solară, termică, mecanică sau de radiofrecvență [2]. Dintre acestea, EH solară este deosebit de atractivă datorită disponibilității sale largi și a densității energetice relativ ridicate. În ciuda cercetărilor extinse asupra tehnologiilor individuale de recoltare, rămân provocări substanțiale în proiectarea, optimizarea și validarea în condiții reale a sistemelor WSN complet fără baterie (Battery-Free WSN, BF-WSN), în special în ceea ce privește stocarea energiei, managementul puterii și funcționarea autonomă pe termen lung.

Această teză abordează proiectarea și analiza motes-urilor BF-WSN, cu accent deosebit pe EH, stocarea energiei și strategiile de management al puterii care permit o funcționare pe termen lung, neutră energetic. În loc să trateze energia ca pe un subsistem izolat, lucrarea adoptă o perspectivă la nivel de sistem, în care sursele de recoltare, elementele de stocare, circuitele de management al puterii și funcționarea mote-ului sunt considerate în mod conjugat.

1.1 JUSTIFICAREA, RELEVANȚA ȘI ACTUALITATEA SUBIECTULUI DE CERCETARE

Trecerea către motele BF-WSN alimentate de EH prezintă numeroase avantaje, inclusiv durata de viață operațională extinsă, cerințe reduse de întreținere și impact minim asupra mediului.

Totuși, în ciuda beneficiilor evidente, implementarea practică și optimizarea acestor sisteme rămâne un domeniu complex de cercetare. Variabilitatea inerentă a surselor de energie ambientale, împreună cu necesitatea unui stocare eficientă a energiei și a unei gestionări eficiente a energiei, prezintă provocări tehnice semnificative care trebuie abordate pentru a valorifica potențialul deplin al BF-WSN.

Trecerea la motes BF-WSN alimentate prin EH prezintă numeroase avantaje, printre care durate de funcționare extinse, cerințe reduse de întreținere și impact minim asupra mediului. Cu toate acestea, în ciuda beneficiilor evidente, implementarea practică și optimizarea unor astfel de sisteme rămân un domeniu complex de cercetare. Variabilitatea inerentă a surselor de energie ambientală, împreună cu necesitatea unei stocări eficiente a energiei și a unui management adecvat al puterii, ridică provocări tehnice semnificative, care trebuie abordate pentru a realiza întregul potențial al BF-WSN.

Această teză își propune să dezvolte un cadru metodologic și o arhitectură experimentală pentru proiectarea și validarea motes-urilor WSN capabile să funcționeze fără baterii, prin colectarea și gestionarea energiei ambientale, în principal a luminii naturale, în scopul avansării înțelegerii și optimizării sistemelor de senzori distribuite autonome.

Printr-o combinație de modelare teoretică, simulare și validare experimentală, cercetarea se concentrează pe realizarea unui management energetic sustenabil, a unei utilizări eficiente a puterii și a unei funcționări fiabile în condiții de mediu dinamice. Prin atingerea acestor obiective, lucrarea urmărește să contribuie la avansarea tehnologiilor EH și să promoveze implementarea unor soluții WSN prietenoase cu mediul și durabile.

Obiectivele cercetării sunt următoarele:

- **RO1:** Realizarea unei analize sistematice și critice a stadiului actual al cunoașterii privind recoltarea, stocarea și managementul energiei în sistemele încorporate cu consum ultra-redus, pentru a identifica principalele tendințe, limitările tehnologice și lacunele științifice în cercetarea nodurilor de senzori fără fir și fără baterie.

- **RO2:** Analiza și modelarea bilanțului energetic al unui nod fără baterie, luând în considerare dinamica temporală a energiei recoltate, comportamentul dispozitivelor de stocare și profilurile de consum ale componentelor electronice.
- **RO3:** Proiectarea unei arhitecturi hardware și firmware modulare, care să permită validarea experimentală a diferitelor abordări de management și stocare a energiei, asigurând reproductibilitatea experimentelor și comparabilitatea rezultatelor.
- **RO4:** Implementarea unui banc de testare experimental pentru evaluare în laborator și în condiții reale de funcționare, măsurând performanța energetică, fiabilitatea comunicației și stabilitatea funcțională a nodului.

Prin atingerea acestor obiective, cercetarea urmărește să contribuie la avansarea tehnologiilor WSN sustenabile și autonome, deschizând calea către adoptarea lor pe scară largă într-o varietate de aplicații. Se așteaptă ca rezultatele acestui studiu să ofere perspective semnificative și soluții practice pentru implementarea unor sisteme WSN ecologice și de lungă durată, sporind astfel impactul și utilitatea acestora în diverse domenii.

Cercetarea a fost realizată în următoarele etape:

- **Studiul literaturii și identificarea problemei:** Etapa inițială a constat într-o analiză cuprinzătoare a literaturii existente privind WSN, tehnologiile EH și strategiile de management al puterii. Această analiză acoperă progresele actuale și metodele de ultimă generație din aceste domenii.
- **Stabilirea comportamentului dispozitivului WSN:** Aceasta include dezvoltarea unui sistem de operare (OS) multitasking, ca strat de abstractizare flexibil între aplicațiile utilizatorului, care rulează ca protothread-uri, și framework-ul Arduino.
- **Simulare și analiză:** S-a utilizat framework-ul de simulare SPICE pentru a simula comportamentul sistemelor EH proiectate și al circuitelor de management al puterii.
- **Prototipare și validare experimentală:** Pe baza proiectelor optimizate, au fost dezvoltate prototipuri de motes fără baterie, care încorporează sistemul EH și etajul de management al puterii (Power Management Stage, PMS) dezvoltate. Experimentele de laborator au fost efectuate pentru a valida performanța prototipurilor în condiții controlate.

- **Testare în teren și evaluarea performanței:** Prototipurile au fost implementate în medii reale pentru a evalua performanța lor practică.

Toți acești pași sunt orientați spre optimizarea EH și PMS, în vederea îmbunătățirii performanței și eficienței. Simulări și experimente suplimentare pot fi realizate, după caz, pentru a valida aceste îmbunătățiri.

1.2 STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT

Incluzând Introducerea și această secțiune, teza este organizată după cum urmează:

Capitolul 2 — Analiza stadiului actual al cunoașterii

Acest capitol prezintă o analiză cuprinzătoare a stadiului actual al EH și al managementului energiei, inclusiv al PMS, în BF-WSN. Capitolul se bazează pe o analiză sistematică a literaturii (Systematic Literature Review, SLR) și pe studii de tip survey complementare, realizate anterior de autor. Acesta oferă o prezentare structurată a tehnologiilor de recoltare, a arhitecturilor de management al puterii și a soluțiilor de stocare a energiei raportate în literatură.

Capitolul introduce mai întâi cadrul metodologic adoptat pentru analiza literaturii, urmat de o clasificare a mecanismelor EH și a scenariilor de aplicare reprezentative. Studiul SLR evidențiază modul în care BF-WSN câștigă atenție, cu accent deosebit pe supercondensatoare (SC) ca mijloc de stocare a energiei. De asemenea, sunt analizate PMS și ciclurile energetice utilizate în mod obișnuit în nodurile EH. În final, capitolul sintetizează principalele concluzii și tendințe de proiectare, stabilind baza pentru capitolele următoare ale tezei.

Capitolul 3 — Cadrul Tehnologic

Acest capitol descrie arhitectura propusă a dispozitivului și framework-ul de simulare utilizat pentru analiza comportamentului acestuia. Capitolul introduce modele de simulare bazate pe SPICE pentru elementele discrete implicate în EH și stocare, inclusiv panourile fotovoltaice (PV), generatoarele termoelectrice (TEG), bateriile și SC. Aceste modele sunt apoi integrate pentru a studia comportamentul energetic al dispozitivului complet.

Ulterior, este prezentată arhitectura hardware și firmware a mote-ului, cuprinzând modelul procesului, programarea, strategia de management al energiei, temporizatoarele și stiva de rețea. Este dezvoltat un model de simulare al dispozitivului, validat în raport cu un banc de testare experimental simplificat, bazat pe o platformă Arduino, ceea ce permite compararea comportamentului simulat cu cel real. Capitolul se încheie cu o discuție parțială care rezumă comportamentul observat al sistemului și validitatea modelelor propuse.

Capitolul 4 — Implementarea și validarea sistemului

Acest capitol prezintă proiectarea, implementarea și evaluarea pe termen lung a sistemului de senzori fără baterie propus. Capitolul descrie prototipul complet, incluzând arhitectura hardware a mote-ului, framework-ul firmware și modelul de planificare (idOS), modelarea consumului de energie și simularea subsistemului energetic bazat pe recoltare PV și stocare în SC. Rezultatele simulărilor sunt confruntate cu observațiile experimentale, iar comportamentul operațional al sistemului este analizat în continuare printr-o implementare în teren pe durata unui an, incluzând înregistrarea datelor și caracterizarea performanței. În plus, capitolul introduce platforma de sistem dezvoltată pentru colectarea, gestionarea și vizualizarea datelor generate de prototip, acoperind arhitectura nodului colector (sink), infrastructura backend, modelul de date și instrumentele de vizualizare. De asemenea, capitolul include scurte observații metodologice privind procesul de dezvoltare, evidențiind utilizarea unor instrumente de laborator personalizate pentru prototiparea timpurie și rolul tehnicilor de programare asistată de AI în evoluția platformei.

Capitolul 5 — Concluzii finale. Contribuții originale. Lucrări publicate și direcții viitoare de cercetare

Conține concluziile, o listă precisă a contribuțiilor originale, recomandări pentru direcții viitoare de cercetare și o listă a lucrărilor publicate.

După corpul principal, teza include Bibliografia, Lista publicațiilor și Declarația de autenticitate.

2 ANALIZA STADIULUI ACTUAL AL CUNOAȘTERII

Acest capitol se bazează pe articolul "*Tehnici de colectare a energiei pentru rețele de senzori wireless: o revizuire sistematică a literaturii*, publicat în revista "Energy Strategy Reviews", 2025 [3].

2.1 CADRUL DE DECLARAȚIE PRISMA

Studiul de față a fost realizat în conformitate cu cadrul PRISMA Statement pentru SLR [4]. Întrebările de cercetare (Research Questions, RQ) la care se urmărește un răspuns au fost formulate pe baza schemei CIMO (Context, Intervenție, Mecanisme, Rezultate) [5].

- **RQ1**: Ce metode sau tehnologii sunt implementate pentru *extragerea energiei* din mediu pentru a alimenta *nodurile WSN*?
- **RQ2:** Care sunt condițiile și contextele în care *metodele și tehnologiile EH* au fost utilizate pentru alimentarea nodurile din *cadrul WSN-urilor*?
- **RQ3:** Care sunt rezultatele sau rezultatele documentate ale implementării *metodelor și tehnologiilor EH pentru a asigura o alimentare cu energie nedefinită pentru* nodurile WSN*?*

Pentru identificarea cuvintelor-cheie și formularea șirurilor de căutare pornind de la RQ, este prezentată o adaptare a cadrului PICO (Populație, Intervenție, Comparație, Rezultat) din ingineria software [6]. Cuvintele-cheie identificate sunt *EH* și *WSN*; fiecare devine un set de cuvinte-cheie pentru căutare. În cadrul fiecărui set, cuvântul-cheie principal este asociat cu sinonimele sale, după cum urmează:

- **Setul 1:** colectare de energie; recoltare de energie; recoltătoare; recoltare; **recoltare.**
- **Set 2:** rețea de senzori wireless; wsn; nod senzor; dispozitiv lot.

Pornind de la enunțurile de căutare, căutarea inițială a returnat **1.491** de publicații din trei baze de date electronice, limitate la **intervalul 2014–2025** (ultimii 11 ani). Mai exact, Web of Science a returnat **197** de publicații, IEEE Xplore **574**, iar ScienceDirect **720**. Folosind Zotero ca manager bibliografic, au fost detectate **32** de referințe duplicate.

În prima etapă de triere (screening), au fost analizate titlul și rezumatul. Au fost selectate lucrările care îndeplineau potențial criteriile de eligibilitate pentru această cercetare. După acest proces, **au rămas 306** înregistrări. În a doua și ultima etapă de triere, constând în citirea și analizarea documentelor, **91** au fost eliminate, deoarece nu includeau toate elementele necesare acestei investigații. În final, **215** articole au fost eligibile pentru analiză.

2.2 TEHNOLOGII ȘI MECANISME EH

Această subsecțiune abordează RQ1 prin explorarea diferitelor metode și tehnologii utilizate pentru a extrage energia din sursele de mediu pentru a alimenta nodurile WSN. Pentru a spori precizia clasificării, aceste concepte au fost separate și definite distinct:

- **Sursă de energie:** O entitate care generează energie, de exemplu vântul, valurile mării, soarele, o antenă, electricitatea dintr-un conductor etc.
- **Tip de energiei:** Tipul de energie produs de o sursă, de exemplu lumină, căldură, undă electromagnetică (EM), vibrație mecanică etc..
- **Tip de traductor:** Un dispozitiv care, pe baza unui principiu fizic, transformă energia ambientală în electricitate utilizabilă.

Figura 1 rezumă distribuția articolelor în funcție de tipul de traductor. Aici, traductoarele piezoelectrice (PZ) apar ca fiind cele mai des menționate, urmate de nanogeneratorul triboelectric (TENG) și de variantele EM.

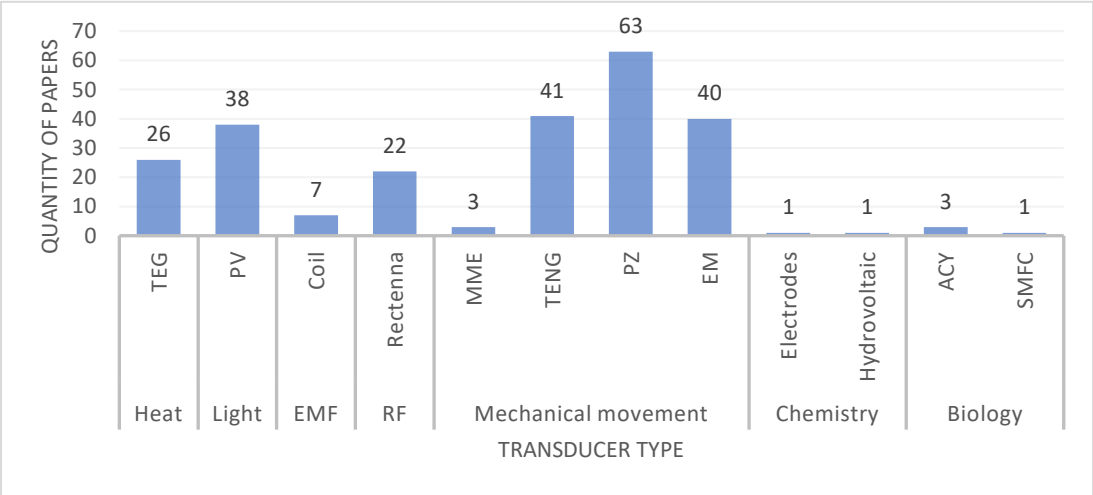


Figura 1: Distribuția articolelor pe baza tipului de traductor

Atât articolul, cât și teza conțin o explicație extinsă a mecanismelor de recoltare a energiei din diferite surse. Aici vom face doar o scurtă referire la cele mai relevante concluzii:

- **Traductoarele mecanice domină** literatura de specialitate, reprezentând peste 50% din lucrările analizate, traductoarele **piezoelectrice (PZ)** fiind cele mai citate, urmate de **variantele** triboelectrice (TENG) și electromagnetice (EM).
- **Sistemele fotovoltaice** sunt surprinzător de slab reprezentate în studiile BF-WSN bazate pe SC; majoritatea implementărilor PV utilizează baterii pentru stocare.
- **Sisteme hibride** (care combină mai multe metode de transducție sau tipuri de energie) sunt în curs de apariție, dar rămân complexe.

2.2.1 Studii de caz și aplicații

O analiză critică a acestor lucrări arată că multe soluții pot fi utilizate sau adaptate pentru alte contexte. În numeroase cazuri, autorii nu specifică un mediu de lucru anume, ceea ce a condus la utilizarea categoriei „Nereferențiat/Neclar":

- **Agricultură:** Include variabile de mediu și de sol din câmpurile de cultură și de la utilajele agricole.
- **Casă inteligentă/clădire/oraș:** Cuprinde aplicații de la monitorizarea mediilor interioare până la infrastructura urbană, vremea locală și calitatea aerului.
- **Medii de apă/mare/marine:** Se referă la sisteme care colectează energie din masele de apă, utilizând în principal energia valurilor.
- **Transport:** Se aplică aplicațiilor care recoltează energie din mijloace de transport, inclusiv trenuri, camioane și autoturisme. În acest context, energia este colectată în principal din vibrațiile generate de mișcarea vehiculelor de marfă.
- **Dispozitive purtabile/sănătate**: Cuprinde dispozitive purtabile, implanturi și alte dispozitive de monitorizare a sănătății, inclusiv pentru animale de companie.
- **Mediu exterior:** Această categorie poate fi privită ca un caz particular al categoriei „Nereferențiat/Neclar", în care autorii sugerează că energia este recoltată din medii exterioare, provenind în principal din lumina solară, vânt sau curenți de apă.

- **Industrie:** Deși mediul industrial este cunoscut pentru caracterul său agresiv, el reprezintă și o cantitate considerabilă de resurse energetice neexploatate, adesea irosite în funcționarea utilajelor, în principal căldură, vibrații și câmpuri EM.
- **Nereferit/nu este clar:** Această categorie cuprinde lucrările care nu oferă informații despre scenariile de aplicare sau care formulează doar sugestii largi și generale pentru aplicații potențiale.

2.2.2 Energie obținută de la recoltator

Densitatea de putere este utilizată frecvent în lucrările de tip review ca metrică pentru evaluarea potențialului diferitelor surse de energie în aplicațiile de recoltare. Aceasta oferă o măsură cantitativă a energiei disponibile pe unitatea de suprafață sau de volum, furnizând informații valoroase privind fezabilitatea și eficiența sistemelor EH. Harta termică (heat map) din Tabelul 1 prezintă sursele de energie pe coloane și intervalele de putere pe rânduri, folosind o scară logaritmică naturală. Fiecare număr din rânduri servește drept multiplicator, indicând numărul de soluții care se încadrează într-un anumit interval de valori ale puterii, conform fiecărei celule.

Tabelul 1: Hartă termică pentru generarea de energie.

P (W)	Heat	Light	EMF	Rectenna	Mech(TENG)	Mech(PZ)	Mech(EM)	Chem	Bio
1 uW	1	1	1	2	3	2	0	0	0
10 uW	1	2	1	2	4	9	3	0	2
100 uW	2	3	1	0	4	8	2	0	0
1 mW	9	2	1	4	6	18	8	1	0
10 mW	2	6	1	0	5	5	6	0	0
100 mW	5	5	0	0	2	5	2	0	0
1W	0	3	0	0	0	1	3	0	0
10 W	0	1	0	0	0	0	1	0	0

Tabelul 1 prezintă distribuția și densitatea soluțiilor în funcție de puterea lor pentru diferitele surse de energie, oferind informații valoroase despre caracteristicile și performanța fiecărei surse într-un context larg.

2.3 STOCAREA ENERGIEI ÎN BF-WSN

Literatura analizată abordează mai multe soluții de stocare a energiei utilizate în sistemele EH pentru WSN, având ca obiectiv principal asigurarea funcționării continue în condițiile unei disponibilități fluctuante a energiei. Abordările de stocare identificate includ bateriile, SC și configurațiile hibride care combină mai multe tehnologii. Cu toate acestea, adecvarea fiecărei soluții depinde de parametri precum densitatea energetică, dinamica încărcării–descărcării, durata de viață și cerințele de întreținere. Figura 2 prezintă distribuția lucrărilor analizate în funcție de elementul de stocare a energiei utilizat. În Figura 2, condensatoarele și SC sunt grupate într-o singură categorie, notată C-SC.

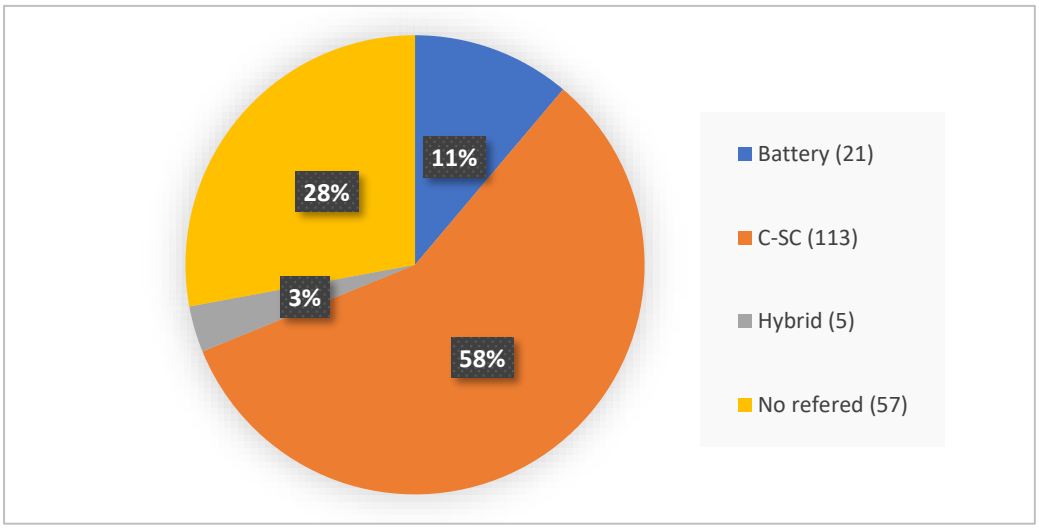


Figura 2: Distribuția elementelor de stocare a energiei.

Se poate observa că soluțiile bazate pe condensatoare sau SC domină literatura, probabil datorită costului mai redus, duratei de viață extinse în cicluri, funcționării fără întreținere și impactului redus asupra mediului, toate acestea fiind deosebit de avantajoase pentru implementările WSN pe termen lung și nesupravegheate.

2.3.1 Supercondensatoare (SC)

Începând cu această secțiune, conținutul este adaptat după lucrarea " *Energy Storage and Management in Battery-free Wireless Sensor Networks*", publicată și prezentată oral la conferința internațională "*14th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2025*" în orașul Viena, Austria [7].

SC pot fi clasificate sistematic în trei categorii principale, în funcție de configurația constructivă, de mecanismul de stocare a sarcinii și de materialele utilizate pentru electrozi și electroliți [8]: **condensatoare cu strat dublu electric (Electric Double-Layer Capacitors, EDLC), pseudocondensatoare (Pseudocapacitors, PC) și SC hibride (Hybrid SCs, HSC)**. Dispozitivele cele mai reprezentative de pe piață sunt EDLC, pentru care se prognozează o creștere semnificativă până în 2033. În schimb, pseudocondensatoarele hibride și SC cresc rapid, dar reprezintă încă o parte mai mică din piața totală [9].

Printre SC hibride disponibile pe piață se remarcă condensatoarele litiu-ion (Lithium-Ion Capacitors, LIC). Această tehnologie a fost promovată ca o punte unică între bateriile litiu-ion convenționale și SC [10].

Modelele SC variază de la rețele RC simple până la echivalente multi-ramură, care surprind atât dinamica tranzitorie, cât și pe cea lentă. Acest studiu se concentrează pe EDLC ca mijloc principal de stocare în BF-WSN. La curent constant, EDLC prezintă o scădere cvasi-liniară a tensiunii între 80% și 40% din tensiunea nominală, ceea ce justifică tratarea similară a condensatoarelor și a SC în scenariile tipice de funcționare:

- Rezistența serie echivalentă (Equivalent Series Resistance, ESR): ESR depinde de temperatură, scăzând la încălzire moderată, dar accelerând degradarea la temperaturi excesive.
- Autodescărcarea: este influențată de temperatură, de tensiunea inițială, de durata încărcării și de tehnologie.
- Degradarea: Sfârșitul duratei de viață a unui SC este atins atunci când capacitatea scade la 80% sau când ESR se dublează. Factorii care accelerează îmbătrânirea includ supratensiunea, temperatura ridicată, umiditatea și solicitările mecanice.

Testele noastre de temperatură efectuate pe un SC de 5 F, la curent redus (90 mA), nu au evidențiat o relație monotonă clară între temperatură și durata de încărcare/descărcare. Acest comportament non-monoton este atribuit efectelor termice concurente: deși căldura îmbunătățește mobilitatea ionică și reduce ESR, ea crește exponențial curentul de scurgere și autodescărcarea (legea Arrhenius), capacitatea variind doar cu ~6% în intervalul de la -40°C la 70°C. Acești mecanisme cuplate maschează orice tendință simplă.

2.4 ETAJUL DE MANAGEMENT AL ENERGIEI (PMS)

Interfața electrică dintre colectorul de energie și sarcină include, de regulă, etaje de condiționare a puterii, adaptare de impedanță, reglare și management al stocării energiei. În funcție de modul de implementare a acestor funcții, în PMS se pot observa comportamente electrice diferite. Pe baza acestor diferențe funcționale, arhitecturile PMS pot fi grupate în patru categorii principale [11]:

- Cuplare directă: recoltorul este conectat la elementul de stocare sau la sarcină cu un circuit de condiționare minim.
- Reglat: Încorporează convertoare DC–DC sau regulatoare liniare pentru a furniza o tensiune de ieșire controlată.
- Bazat pe MPPT: În esență, adaptare de impedanță.
- PMS controlat prin prag de stocare: utilizat de obicei în nodurile EH cu consum ultra-redus, la care puterea instantanee disponibilă de la recoltor este insuficientă pentru a susține o funcționare continuă.

Această clasificare reflectă nivelul crescând de complexitate a circuitelor și de control necesar pentru a asigura o funcționare eficientă și fiabilă în nodurile senzor fără fir cu recoltare de energie.

2.4.1 Ciclul energetic în EH-WSN

În EH-WSN, energia ambientală este colectată ca sursă principală de alimentare, dar este, de regulă, intermitentă și imprevizibilă. În teren, PMS reglează continuu aportul de energie de la recoltor și rezervele stocate, pentru a garanti că dispozitivul și subsistemele sale primesc întotdeauna suficientă putere. Figura 3 prezintă arhitectura PMS și ilustrează ciclul de stocare.

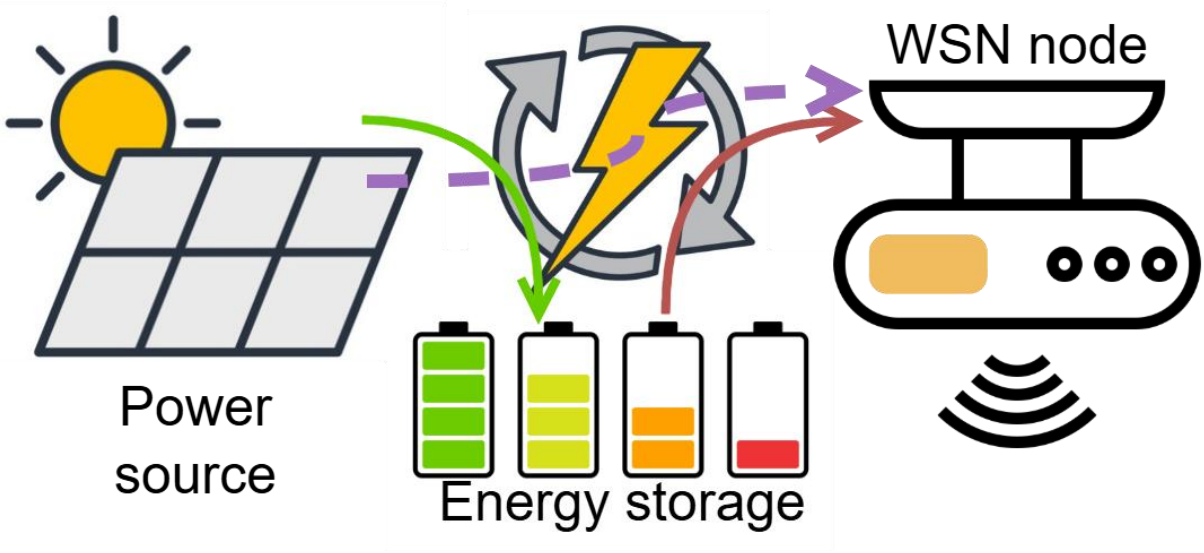


Figura 3: Prezentare generală a operării PMS într-un dispozitiv WSN

Se pot identifica trei scenarii:

- Energia produsă de recoltor este suficientă pentru a alimenta mote-ul.
- Energia produsă de recoltor nu va fi niciodată suficientă pentru a susține mote-ul.
- Evenimentul monitorizat este chiar sursa de energie sau coincide cu aceasta.

Dependența exclusivă de EH intermitentă limitează robustețea sistemului față de variațiile disponibilității sursei. Mai mult, profilul tipic de încărcare–descărcare al SC ridică o provocare suplimentară, iar dimensionarea incorectă a SC poate face diferența dintre succesul și eșecul sistemului.

2.4.2 Soluții cu SC

Un circuit de încărcare adaptiv pentru sistemele de recoltare este esențial, deoarece sarcina văzută trebuie ajustată continuu pentru ca PMS să se adapteze la punctul de putere maximă (Maximum Power Point, MPP) [12]. Tabelul 2 rezumă circuitele raportate în literatură, incluzând soluții bazate pe componente discrete care depășesc o simplă punte redresoare sau un singur condensator.

Trebuie menționat că, deși LTC3588 CI este destinat de producător doar pentru condensatori sau SC, restul circuitului integrat prezentat poate gestiona și baterii Li-Po și Li-ion. Este

necesar să evidențiem circuitul integrat, P1110 de la Power-Cast, proiectat special pentru captarea RF în banda 902-928 MHz, folosit de Tran și Chung, 2014 [66].

Tabelul 2 Rezumat al circuitelor de interfață EH raportate

Tip	Documente
Elemente discrete	[13–21]
LTC3388/LTC2935	[22]
LTC3588-1	[23–39]
LTC3105	[40]
LTC3106	[41]
LTC3108	[42–47]
LTC3330	[48]
LTC4071	[49]
LTC4071/LTC3108	[42]
ADP5090	[50]
AEM10941	[51]
AEM30940	[52]
BQ25570	[53–57]
BQ25570/LTC3106	[41]
LM2575	[58]
BQ25504	[59–61]
BQ25505	[62–64]
MB39C811	[65]

Trebuie menționat că, în timp ce circuitul integrat LTC3588 este destinat de producător doar pentru condensatoare sau SC, celelalte circuite integrate prezentate pot gestiona și baterii Li-Po și Li-ion. Se impune evidențierea circuitului integrat P1110 de la Powercast, conceput special pentru recoltarea energiei RF în banda 902–928 MHz, utilizat de Tran și Chung, 2014 [66].

2.5 CONCLUZII PARȚIALE

Investigarea mecanismelor EH-WSN reflectă atât inovația semnificativă realizată în acest domeniu, cât și provocările tehnice persistente care persistă. O gamă largă de tehnici mecanice și non-mecanice de recoltare, de la arhitecturi simple până la sisteme extrem de complexe, demonstrează diversitatea abordărilor propuse pentru a satisface cerințele energetice ale WSN-urilor care operează în medii eterogene. Totuși, o parte substanțială a acestor soluții a fost validată în principal în condiții de laborator sau controlate, evidențiind necesitatea unor

experimente extinse în lumea reală pentru a evalua fiabilitatea pe termen lung și fezabilitatea practică.

Cercetările recente au explorat, de asemenea, tehnologii emergente și neconvenționale EH, inclusiv rectenele, celulele OPV, rezonatoarele termice, dispozitivele hidrovoltaice și bio-colectoare bazate pe microorganisme vii. Deși aceste abordări lărgesc peisajul conceptual al generării durabile de energie pentru WSN-uri, adoptarea lor practică trebuie cântărită cu atenție în raport cu tehnologiile mai consacrate, care adesea oferă performanțe mai simple, mai eficiente din punct de vedere al costurilor și mai previzibile în implementările reale.

Eficiența rămâne o preocupare centrală în EH-WSN-uri. Strategiile actuale se concentrează pe creșterea numărului și diversității traductoarelor sau pe introducerea unor etape intermediare de conversie a energiei pentru a îmbunătăți performanța generală a recoltării. În ciuda acestor eforturi, atingerea operării complete BF-WSN continuă să reprezinte provocări semnificative, subliniind necesitatea unor cercetări suplimentare atât în integrarea sistemelor, cât și în managementul energiei.

Literatura arată o predominanță clară a surselor mecanice de energie, în special a recoltării bazate pe vibrații, ceea ce explică dominanța traductoarelor PZ. Soluțiile EM și TENG au atras, de asemenea, un interes tot mai mare. În contrast, recoltarea fotovoltaică este relativ subreprezentată în studiile care se bazează exclusiv pe CS pentru stocarea energiei, așa cum s-a menționat în lucrări precum [51]. Acest dezechilibru poate fi atribuit maturității tehnologice a sistemelor fotovoltaice, care reduce percepția lor de noutate, precum și intermitenței inerente a energiei solare. Ciclurile de lumină zilnice și interioare impun adesea perioade prelungite de iluminare scăzută, preferând soluții de stocare cu densitate energetică ridicată și motivând cercetarea continuă a arhitecturilor de colectare solară. Această observație se aliniază cu studiile anterioare privind sistemele fără baterii care se bazează pe iluminat artificial persistent [67] sau pe valori foarte mari de capacitate pentru a face legătura între ciclurile de lumină solară [68].

În acest context, stocarea bazată pe condensatori, în special EDLC-urile electrice, devine un factor cheie pentru BF-WSN. EDLC-urile combină densitate mare de putere, durată de viață lungă și funcționare fără întreținere, ceea ce le face foarte potrivite pentru scenarii

intermitente de EH. Ele pot amortiza eficient energia în fazele de somn cu consum redus de energie și pot livra explozii scurte și de mare putere în timpul funcționării active. Cu toate acestea, un compromis esențial de proiectare constă în dimensiunea optimă a SC-ului. Deși o capacitate mai mare crește energia stocată, ea extinde și timpul de creștere a tensiunii datorită constantii RC, ceea ce poate întârzia sau chiar împiedica nodul să atingă tensiunea minimă operațională.

În final, dincolo de alegerea componentelor de recoltare și depozitare, PMS joacă un rol decisiv în facilitarea funcționării durabile. Trebuie să se adapteze la fluctuațiile inputurilor de energie, să gestioneze eficient procesele de sarcină și descărcare, să regleze tensiunea de alimentare și să programeze activitățile nodurilor pentru a menține o funcționare energetică neutră pe termen lung. Progresele continue atât în proiectarea hardware-ului, cât și în managementul energiei la nivel de sistem vor fi, prin urmare, esențiale pentru a valorifica pe deplin potențialul BF-WSN în implementări practice.

Investigarea mecanismelor EH-WSN reflectă atât inovațiile semnificative realizate în acest domeniu, cât și provocările tehnice persistente. O gamă largă de tehnici de recoltare mecanice și nemecanice, de la arhitecturi simple până la sisteme foarte complexe, demonstrează diversitatea abordărilor propuse pentru a răspunde cerințelor energetice ale WSN care funcționează în medii eterogene. Cu toate acestea, o parte substanțială a acestor soluții a fost validată în principal în condiții de laborator sau controlate, ceea ce evidențiază necesitatea unei experimentări extinse în condiții reale pentru a evalua fiabilitatea pe termen lung și fezabilitatea practică.

Cercetări recente au explorat, de asemenea, tehnologii EH emergente și neconvenționale, inclusiv rectenele, celulele OPV (fotovoltaice organice), rezonatoarele termice, dispozitivele hidrovoltaice și bio-recoltoarele bazate pe microorganisme vii. Deși aceste abordări lărgesc peisajul conceptual al generării sustenabile de energie pentru WSN, adoptarea lor practică trebuie evaluată cu atenție în raport cu tehnologiile mai consacrate, care oferă adesea performanțe mai simple, mai rentabile și mai predictibile în implementările reale.

Eficiența rămâne o preocupare centrală în EH-WSN. Strategiile actuale se concentrează pe creșterea numărului și a diversității traductoarelor sau pe introducerea unor etaje intermediare

de conversie a energiei, pentru a îmbunătăți performanța globală de recoltare. În ciuda acestor eforturi, atingerea unei funcționări complet BF-WSN continuă să ridice provocări semnificative, subliniind necesitatea unor cercetări suplimentare atât în integrarea sistemelor, cât și în managementul energiei.

Literatura arată o predominanță clară a surselor de energie mecanică, în special a recoltării bazate pe vibrații, ceea ce explică dominanța traductoarelor PZ. Soluțiile EM și TENG au atras, de asemenea, un interes tot mai mare. În contrast, recoltarea PV este comparativ slab reprezentată în studiile care se bazează exclusiv pe SC pentru stocarea energiei, după cum se menționează în lucrări precum [51]. Acest dezechilibru poate fi atribuit maturității tehnologice a sistemelor PV, care reduce noutatea percepută a acestora, precum și intermitenței inerente a energiei solare. Ciclurile zilnice și cele ale luminii de interior impun adesea perioade prelungite de iluminare scăzută, ceea ce favorizează soluțiile de stocare cu densitate energetică ridicată și motivează continuarea cercetărilor privind arhitecturile de recoltare solară. Această observație este în concordanță cu studii anterioare privind sistemele fără baterie care se bazează pe iluminat artificial persistent [67] sau pe valori foarte mari ale capacității pentru a acoperi ciclurile solare [68].

În acest context, stocarea bazată pe condensatoare, în special EDLC electrice, apare ca un factor-cheie pentru BF-WSN. EDLC combină densitatea mare de putere, durata de viață îndelungată în cicluri și funcționarea fără întreținere, fiind foarte potrivite pentru scenariile EH intermitente. Ele pot stoca eficient energia în fazele de repaus cu consum redus și pot livra impulsuri scurte de putere mare în timpul funcționării active. Cu toate acestea, un compromis critic de proiectare constă în dimensionarea optimă a SC. Deși o capacitate mai mare crește energia stocată, ea prelungește și timpul de creștere a tensiunii din cauza constantei RC, putând întârzia sau chiar împiedica atingerea de către nod a tensiunii minime de funcționare.

În final, dincolo de alegerea componentelor de recoltare și stocare, PMS joacă un rol decisiv în asigurarea unei funcționări sustenabile. Acesta trebuie să se adapteze la intrările energetice fluctuante, să gestioneze eficient procesele de încărcare și descărcare, să regleze tensiunea de alimentare și să planifice activitățile nodului pentru a menține o funcționare neutră energetic pe termen lung. Prin urmare, progresele continue atât în proiectarea hardware, cât și în

managementul energiei la nivel de sistem vor fi esențiale pentru a valorifica pe deplin potențialul BF-WSN în implementările practice.

3 CADRUL TEHNOLOGIC

Acest capitol introduce cadrul tehnologic care stă la baza mote-ului propus BF-WSN. Începe prin a descrie modelele de simulare SPICE dezvoltate pentru elementele discrete folosite în analiză și simulări. Aceste modele, implementate în mediul LTspice®, sunt necesare deoarece componentele corespunzătoare nu sunt disponibile în bibliotecile standard.

Capitolul prezintă apoi arhitectura generală a sistemului, inclusiv cadrul firmware mote, modelul de programare și strategia de management al energiei adoptată pentru a susține funcționarea neutră energetic. În final, descrie abordarea de modelare și simulare folosită pentru a analiza comportamentul energetic al sistemului, cuprinzând EH, stocare și aspecte de consum de energie, și stabilește fundația tehnică pentru implementarea și validarea ulterioară a prototipului.

Teza conține o descriere completă a modelelor SPICE pentru bateriile PV, TEG, SC și Li-ion, bazate pe modelele descrise în literatură. Acest rezumat va prezenta doar modelul motelor, care este una dintre contribuțiile acestei cercetări.

Acest capitol introduce cadrul tehnologic care stă la baza mote-ului BF-WSN propus. Acesta începe prin descrierea modelelor de simulare SPICE dezvoltate pentru elementele discrete utilizate în analize și simulări. Aceste modele, implementate în mediul LTspice®, sunt necesare deoarece componentele corespunzătoare nu sunt disponibile în bibliotecile standard.

Capitolul prezintă apoi arhitectura generală a sistemului, incluzând framework-ul firmware al mote-ului, modelul de programare și strategia de management al energiei adoptată pentru a susține funcționarea neutră energetic. În final, descrie abordarea de modelare și simulare utilizată pentru analiza comportamentului energetic al sistemului, cuprinzând aspectele legate de EH, stocare și consum de putere, și stabilește fundamentul tehnic pentru implementarea și validarea ulterioară a prototipului.

Teza conține o descriere completă a modelelor SPICE pentru PV, TEG, SC și bateriile Li-ion, bazate pe modele descrise în literatură. Acest rezumat va prezenta doar modelul mote-ului, care reprezintă una dintre contribuțiile acestei cercetări.

3.1 COMPORTAMENTUL DISPOZITIVULUI

Această secțiune se bazează pe lucrarea " *Protothread and Cooperative Multitasking Scheduler on the Arduino Framework* ", publicată în volumul conferinței și prezentată la *International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)* [69]. Secțiunea prezintă idOS, un sistem de operare (OS) implementat în cadrul framework-ului Arduino. În cadrul acestei cercetări, idOS a fost adaptat de autorii săi pentru a funcționa la intervale periodice, cu scopul de a minimiza consumul de energie și, astfel, de a se potrivi mai bine condițiilor cu resurse energetice limitate, tipice WSN. Secțiunile următoare descriu idOS în detaliu, inclusiv arhitectura și subsistemele sale.

IdOS este motivat de necesitatea simplificării abordării acestor sisteme pentru un public mai larg, în principal utilizatorii Arduino, și de facilitarea construirii de aplicații direct pentru Internetul Lucrurilor (IoT), în special pentru rețele cu pierderi și consum redus (Low-Power and Lossy Networks, LLN).

3.1.1 Arhitectura sistemului

IdOS funcționează ca un strat parțial de abstractizare între aplicații și framework-ul Arduino, permițând accesul direct la Arduino și la bibliotecile terților, în funcție de cerințele specifice ale aplicației. Structura idOS include nucleul (*kernel*) și bibliotecile de sistem (*sys*), cu un strat suplimentar de abstractizare (*arch*) între *sys* și hardware, care îmbunătățește gestionarea hardware în cadrul framework-ului.

Figura 4 oferă o reprezentare vizuală a structurii idOS.

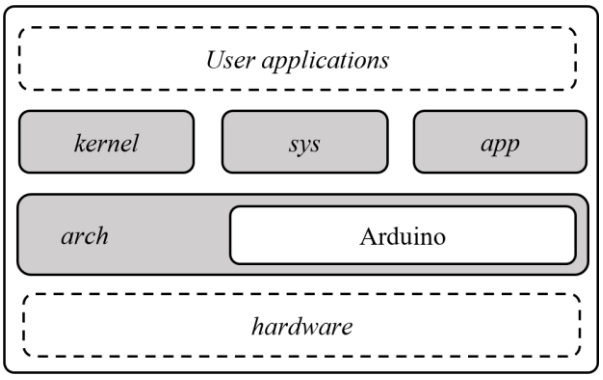


Figura 4: Elemente structurale ale idOS.

Componentele idOS sunt încărcate la compilare, iar memoria este alocată static pentru a menține codul compact. În ciuda funcționalității sale, amprenta codului rămâne remarcabil de mică, de aproximativ 4 Kbytes, cu doar aproximativ 250 Bytes de RAM utilizați fără stiva de rețea, un impact semnificativ de redus. Chiar și cu includerea stivei TCP/IP, amprenta de RAM și flash (cod) crește doar până la aproximativ 1,5 Kbytes, lăsând suficient spațiu pentru rularea aplicațiilor alături de idOS. Teza și articolul asociat oferă o descriere extinsă a idOS. Codul sursă idOS este disponibil public într-un depozit GitHub.

3.2 MODEL DE SIMULARE PENTRU MOTE

Această secțiune se bazează pe articolul "*Modele electrice cuprinzătoare pentru un dispozitiv de rețea wireless de senzori*", 2024, publicat în *Heliyon* Jurnal [70].

Un *mote* acționează ca o sarcină pentru sursa de energie, așa cum este ilustrat în Figura 3. Estimarea consumului maxim de putere al unui nod WSN prin simpla însumare a valorilor din cel mai defavorabil caz furnizate de producătorii componentelor ar fi nerealistă. Caracteristicile electrice ale componentelor-cheie dintr-un mote WSN sunt esențiale pentru înțelegerea și modelarea consumului de putere și a performanței globale. Mote-ul funcționează în diverse stări, fiecare influențată de componente diferite, cu proprietăți distincte. Componentele principale sunt [71] **Microcontrolerul (MCU), Senzorii și Interfața Radio (Transceiver)**. În funcție de aplicație, un mote WSN poate include periferice suplimentare, precum module de memorie sau actuatoare.

Fiecare componentă contribuie ca sarcină care alternează periodic între două stări. Aceste sarcini sunt reprezentate prin surse de curent. Fiecare sursă de curent simulează stările fiecărei componente sub forma unei funcții de tip puls, rezultând o funcție compusă care reprezintă suma tuturor funcțiilor de curent. Această funcție compusă poate fi exprimată ca o suprapunere de forme de undă dreptunghiulare periodice pe două niveluri, cu factor de umplere constant TLW, având amplitudinea , frecvența și faza $A_i f_i \phi_i$.

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N} TLW(A_i, \quad f_i, \quad \phi_i) \qquad [1]$$

Modelul va fi completat cu o sursă care reprezintă mote-ul în modul de consum minim, un semnal aleatoriu care simulează zgomotul și o rețea RLC. În model, prezentat în Figura 5, sursa

de curent utilizează o funcție de tip puls, în care I_{on} și I_{off} sunt stările de consum, T_{on} este durata în starea de consum ridicat în cadrul unei perioade T_{period}, iar T_{delay} definește faza sub forma unei întârzieri.

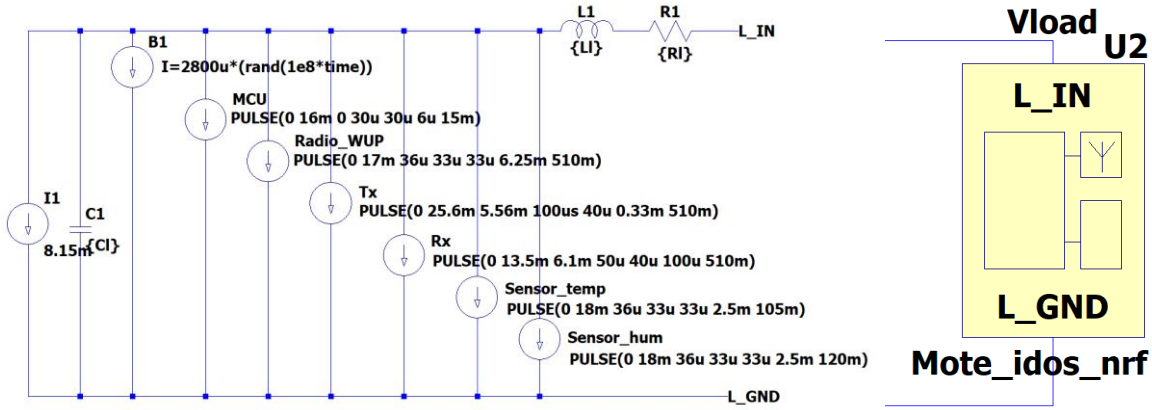
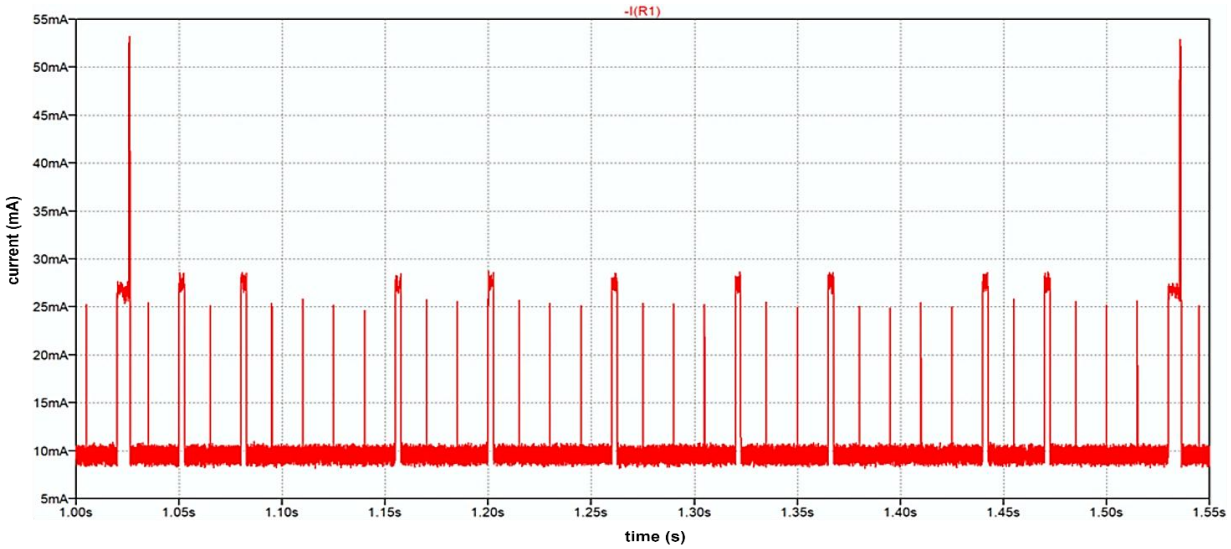


Figura 5: Modelul nodului WSN în stânga. În dreapta, simbolul LTspice®

Figura 6 prezintă, în primul grafic, simularea în LTspice® a consumului de energie al mote-ului și, în al doilea, o captură de ecran a interfeței web a datalogger-ului NI Elvis III.



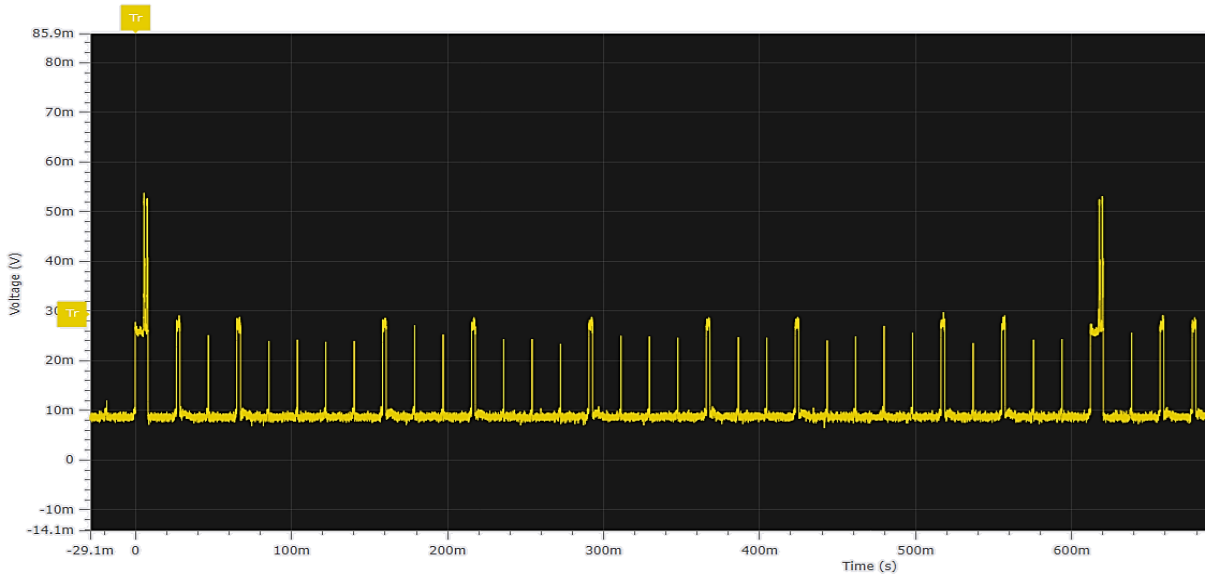


Figura 6: Întregul ciclu dintre activitățile interfeței radio în simularea LTspice® (sus) față de mote-ul real în interfața web NI Elvis III (jos).

Pentru a examina în detaliu corespondența dintre comportamentul simulat și cel măsurat al mote-ului, au fost extrase două intervale Tx/Rx: unul din simularea LTspice® și celălalt din date obținute folosind NI Elvis III. Aceste intervale erau aliniate temporal folosind MS Excel pentru a permite compararea directă. Suprapunerea rezultată este prezentată în Figura 7.

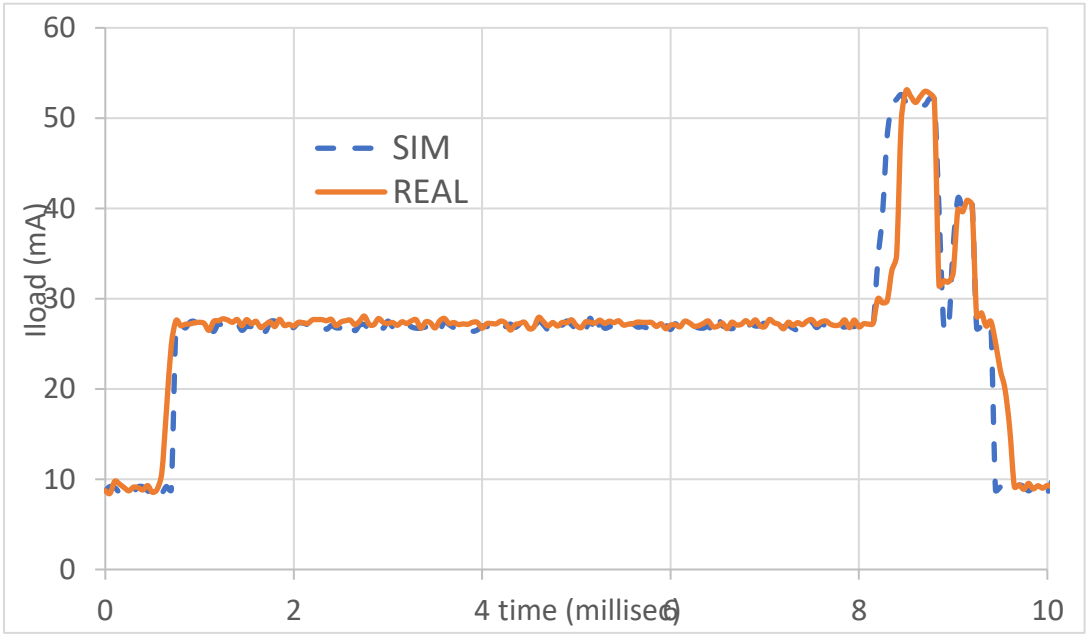


Figura 7 un eveniment Tx/Rx în simulare vs. un mote pe același graf

Pentru a evalua acuratețea modelului din perspectiva consumului de energie, măsurătorile obținute de la prototipul fizic au fost comparate cu rezultatele simulării.

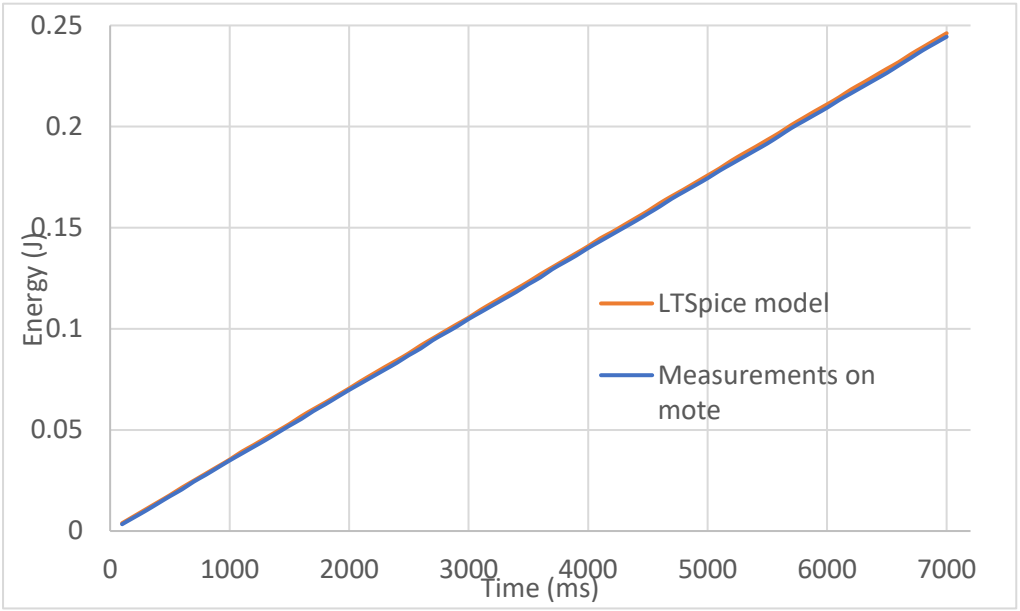


Figura 8: Progresul consumului de energie măsurat pe un mote real versus modelul care rulează în LTspice.

Figura 8 prezintă profilul consumului de putere pe un interval de 7 secunde, atât pentru simulare, cât și pentru prototipul real, evidențiind un comportament temporal aproape identic. Pentru a obține valorile prezentate în graficul din Figura 8, energia a fost calculată la fiecare 100 de milisecunde.

3.3 CONCLUZII PARȚIALE

Acest capitol a prezentat un cadru tehnologic cuprinzător pentru proiectarea, implementarea și analiza mote-urilor BF-WSN. Cadrul integrează arhitectura firmware, modelarea hardware și simularea la nivel de circuit, stabilind o bază solidă pentru implementarea ulterioară a prototipului și validarea experimentală.

Valorificând simplitatea și adoptarea pe scară largă a framework-ului Arduino, este introdus idOS, un sistem de operare ușor, bazat pe evenimente, adaptat dispozitivelor IoT cu resurse limitate. Pe baza unui model de planificare cooperativă inspirat de protothreads, idOS permite multitasking discret eficient, menținând în același timp un overhead redus de memorie și

energie. Servicii de bază precum temporizatoarele, primitivele de management al puterii și o stivă de rețea TCP/IP ușoară demonstrează adecvarea sa pentru medii cu resurse limitate.

Analiza transceiverului nRF24 evidențiază avantajele acestuia în ceea ce privește simplitatea, consumul redus de putere și costul, făcându-l o opțiune atractivă pentru nodurile cu resurse energetice limitate. Cu toate acestea, dimensiunea limitată a sarcinii utile (payload) și lipsa unor mecanisme robuste de control al accesului la mediu impun constrângeri asupra proiectării protocolului și scalabilității rețelei. Deși aceste limitări nu exclud utilizarea sa, ele necesită mecanisme suplimentare de agregare a pachetelor și de integrare IP bazată pe gateway, identificate ca direcții pentru lucrări viitoare.

Din perspectiva hardware și energetică, acest capitol a introdus un cadru de modelare electrică bazat pe SPICE pentru componentele EH, inclusiv panouri PV, TEG, baterii cu litiu și SC, împreună cu un model detaliat, la nivel de circuit, al unui mote WSN. Modelul propus reproduce cu acuratețe comportamentul ciclic (duty-cycled) al unui dispozitiv real, prin încorporarea caracteristicilor electrice ale microcontrolerului, senzorilor, transceiverului radio și circuitelor de management al puterii.

Deși modelul face abstracție de dinamica la nivel de rețea și presupune condiții ideale de comunicație, validarea experimentală față de un prototip fizic demonstrează o corespondență strânsă între consumul de energie simulat și cel măsurat. Aceasta confirmă eficiența modelului pentru analiza la nivel de circuit și pentru evaluarea strategiilor de management al puterii și a subsistemelor EH într-un mediu de simulare SPICE. Astfel, modelul oferă un instrument valoros pentru optimizarea consumului de putere și pentru susținerea proiectării unor noduri WSN eficiente energetic și cu durată lungă de viață.

Lucrările viitoare se vor concentra pe rafinarea idOS cu primitive de sincronizare pentru prevenirea condițiilor de cursă (race conditions), pe îmbunătățirea modurilor de funcționare cu consum redus și pe explorarea unei integrări mai strânse între tehnicile EH și strategiile adaptive de management al puterii. Se preconizează că aceste extensii vor îmbunătăți și mai mult sustenabilitatea și robustețea implementărilor BF-WSN.

4 IMPLEMENTAREA ȘI VALIDAREA SISTEMULUI

Acest capitol se concentrează pe implementarea și validarea experimentală a sistemului propus. Sunt detaliate construirea prototipului, integrarea componentelor hardware și firmware și configurația de implementare utilizată pentru evaluarea pe termen lung. Rezultatele simulărilor sunt confruntate cu observațiile experimentale, iar comportamentul operațional al sistemului este evaluat prin măsurători în condiții reale, oferind perspective asupra performanței, robusteții și limitărilor practice.

4.1 ARHITECTURA SISTEMULUI

Această secțiune se bazează pe o lucrarea *" Integration of a Sink Node and Django Platform for Solar-Powered BF-WSNs: Enabling IP Connectivity and Cloud Data Management"*, publicată în volumul simpozionului 31st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2025 [72].

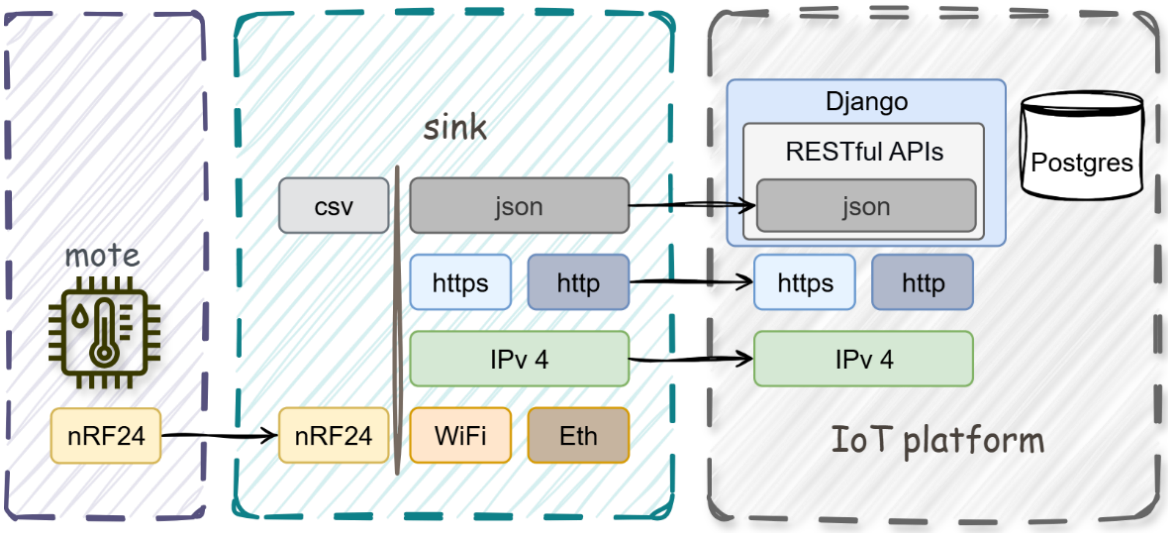


Figura 9: Arhitectura sistemului: descompunerea stivei de protocoale

Arhitectura propusă de sistem implementează o abordare în trei niveluri care face legătura între dispozitivele BF-WSN și infrastructurile standard de rețea IP. Arhitectura constă din mote (nivel de nod BF-WSN), *sink* (nivel *gateway*) și platforma IoT (nivel de aplicație), fiecare abordând provocări tehnice specifice, menținând în același timp cerințele de interoperabilitate și scalabilitate. Figura 9 ilustrează arhitectura completă a sistemului.

4.2 PLATFORMA IOT

Platforma este implementată ca o aplicație web modulară, folosind framework-ul Django [73], și integrează structuri de baze de date, urmărire geospațială și funcții de vizualizare în timp real, permițând atât gestionarea pe termen lung a mote-urilor, cât și validarea comportamentului fără baterie.

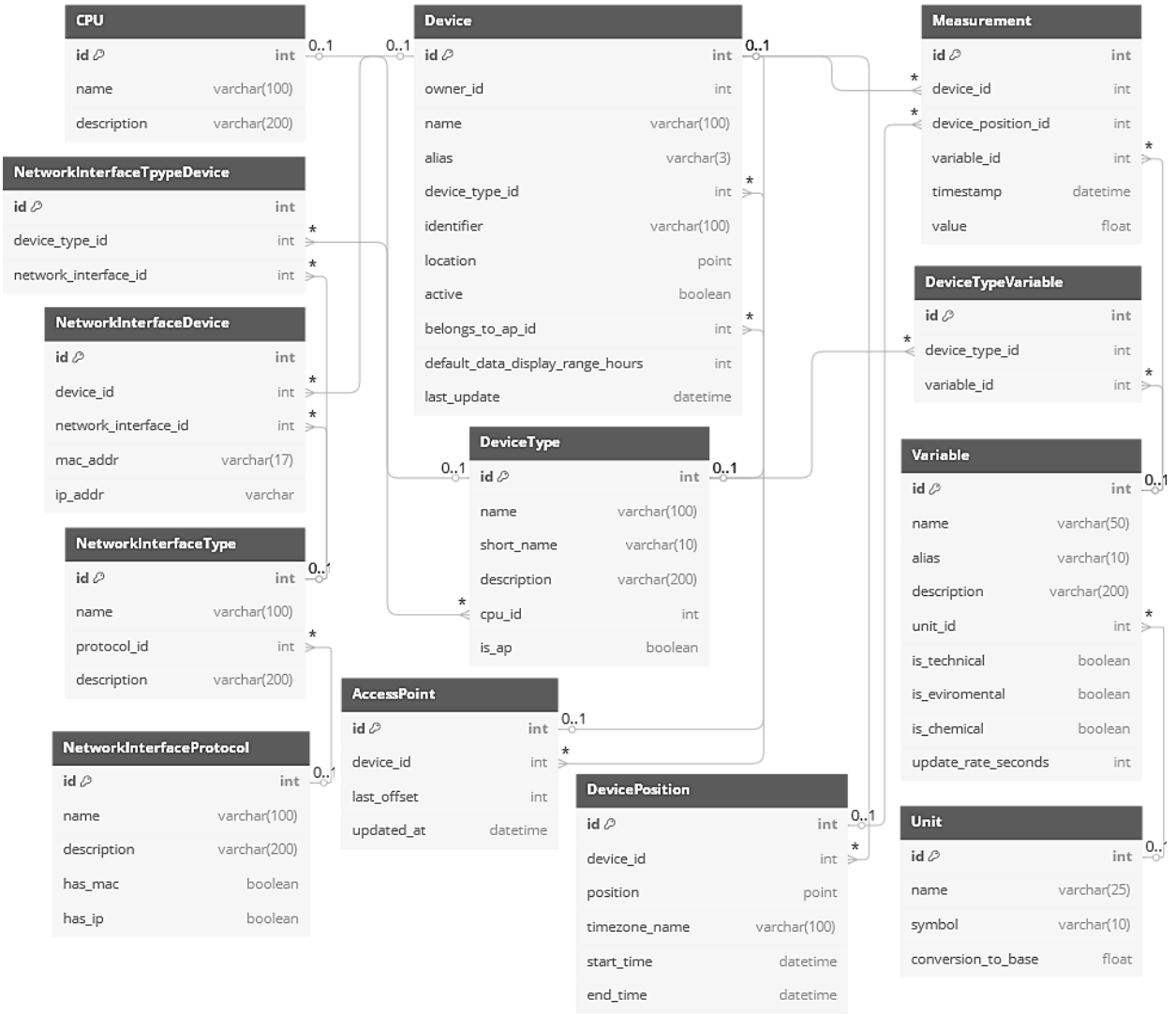


Figura 10: diagramă fizică a bazei de date a aplicației Dispozitiv

Implementarea platformei IoT a valorificat framework-ul Django, ceea ce a impus trecerea de la stocarea inițială bazată pe CSV la un model de bază de date relațională. Figura 10 prezintă diagrama fizică a bazei de date, care descrie structurile de date de bază ale sistemului. Persistența datelor este implementată prin intermediul mapatorului obiect-relațional (ORM)

al Django, folosind modele relaționale convenționale, adecvate având în vedere frecvența scăzută de actualizare a senzorilor (de ordinul minutelor).

Modelul de date este centrat pe Device, legat de *DeviceType* (CPU, capabilitate de punct de acces, interfețe de rețea). *DevicePosition* urmărește mobilitatea în timp, evitând redundanța. *Measurement* înregistrează datele senzorilor, legând dispozitivele de *Variable* (metadate: unități, alias-uri, clasificare) prin *Unit*. Interfețele de rețea sunt abstractizate prin *NetworkInterfaceType*, *NetworkInterfaceProtocol* și *NetworkInterfaceDevice*, pentru a susține hardware eterogen. *CPU* facilitează reutilizarea codului. *AccessPoint* distinge nodurile colectoare (*sink*) de senzori. *DeviceTypeVariable* definește variabilele măsurabile pentru fiecare tip de dispozitiv.



Figura 11: Vedere detaliată pentru variabilele tehnice ale mote-urilor

Interfața oferă un panou de sinteză (metadate, geolocalizare prin Leaflet.js, filtre) și vizualizare a seriilor de timp (*Plotly*) pentru variabilele-cheie (tensiunea PV, tensiunea SC, temperatura, umiditatea).

Interfața oferă informații atât în timp real, cât și istorice despre starea operațională a dispozitivelor implementate. Figura 11 prezintă panoul de monitorizare tehnică pentru unul dintre mote-urile din teren (Senspire_Mote_2), generat automat din baza de date backend.

Graficul seriilor de timp, randat cu Plotly, prezintă măsurători istorice pe intervale selectabile și suportă funcții interactive precum zoom, panoramare, tooltip-uri și selecția dinamică a seriilor.

Widgetul de hartă integrat oferă un context spațial esențial, afișând ultima poziție înregistrată a dispozitivului, stocată în tabelul *DevicePosition*, și facilitând gestionarea mai multor mote distribuite pe zona de implementare.

4.3 *Sink*

Arhitectura *sink*-ului implementează un design cu trei interfețe, care permite comunicarea fluentă între rețeaua de senzori bazată pe nRF24 și rețelele IP standard. Sistemul utilizează un microcontroler ESP8266 ca unitate principală de procesare, ales pentru capabilitățile Wi-Fi integrate, resursele computaționale suficiente și compatibilitatea atât cu modulele nRF24L01, cât și cu controlerul Ethernet ENC28J60, prin comunicație pe interfața serială periferică (SPI). *Sink*-ul încorporează un RTC DS3231 și un adaptor pentru card SD, pe lângă funcționalitatea sa de bază. Pentru a asigura funcționarea continuă, am implementat un subsistem de sursă neîntreruptibilă (UPS) folosind module comerciale: un încărcător TP4056 pentru bateria Li-ion 18650, un regulator LDO HT7333 care menține tensiunea sistemului la 3,3 V și un circuit de protecție bazat pe MOSFET IRLM6402 împotriva supraîncărcării bateriei.

Așa cum se arată în Figura 12, *sink*-ul integrează un afișaj OLED pentru feedback local către utilizator și control de bază. În plus, *sink*-ul încorporează un încărcător Li-ion PWM în comutație CN3791, cu MPPT integrat, permițând alimentarea directă de la o sursă PV. Unitatea poate funcționa fie de la o sursă convențională de 5 V, fie de la un panou solar, utilizând o baterie reîncărcabilă ca sursă de energie de rezervă pentru a asigura funcționarea neîntreruptă.

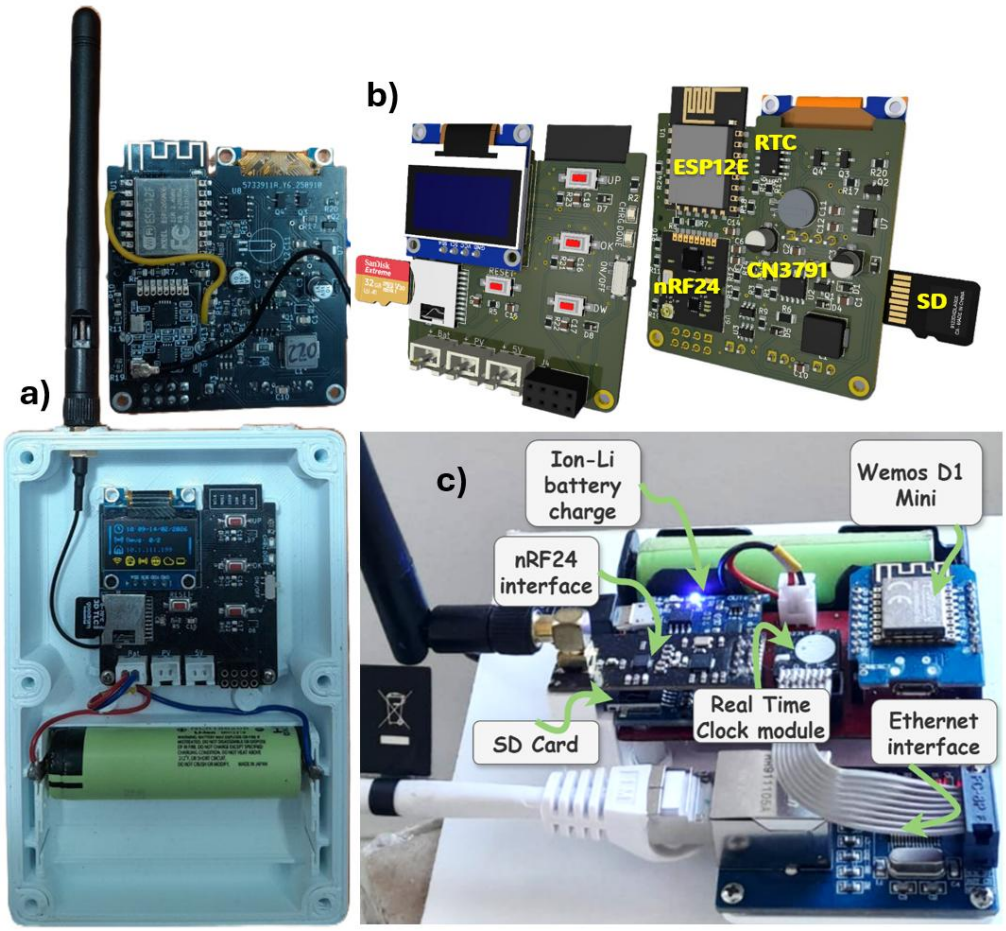


Figura 12: Sink

Firmware-ul, dezvoltat direct pe cadrul Arduino (spre deosebire de implementarea mote-ului), funcționează în modul de ascultare persistentă pe toate interfețele de rețea.

4.4 Prototipul Mote

Obiectivul proiectării mote-ului a fost atingerea simplității, cu intenția de a minimiza consumul de putere, costul și complexitatea circuitelor. După cum se ilustrează în Figura 13, dispozitivul a fost fabricat folosind o mașină CNC artizanală, de cost redus, conform tehnicii descrise de León Ávila et al. [74].

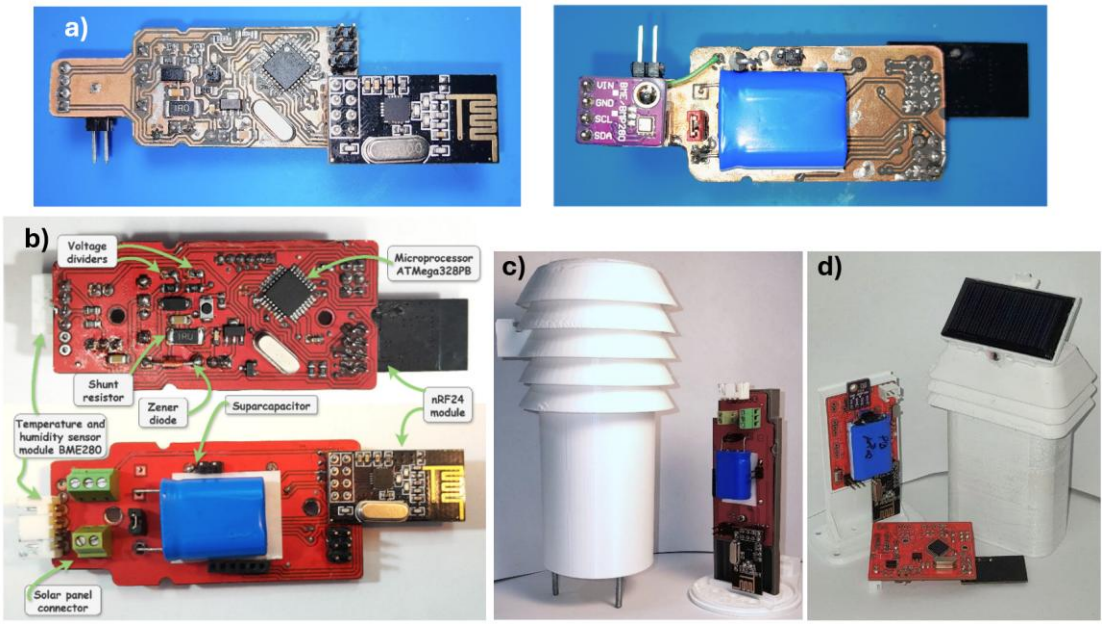


Figura 13: Vedere a celor trei versiuni ale prototipului mote-ului, inclusiv carcasa

Figura 13 prezintă cele trei versiuni dezvoltate ale mote-ului. Figura 13 a) și b) prezintă ambele fețe ale celor două variante hardware timpurii, fabricate printr-un proces cvasi-artizanal, conform tehnicilor descrise în León Ávila et al. [74]; prima variantă nu include mască de lipire. Figura 13 c) prezintă un prototip cu mască de lipire, montat într-o carcasă personalizată din polipropilenă (PP) imprimată 3D. Figura 13 d) prezintă cea mai recentă revizie, cu un PCB fabricat de JLCPCB și asamblat manual, împreună cu cea mai recentă variantă de carcasă, care încorporează un panou PV integrat. Nu există modificări semnificative ale componentelor electronice între diferitele prototipuri, ci doar ajustări ale PCB-ului.

Figura 14 reprezintă schema generală a mote-ului dezvoltat. Se observă că ieșirea PV este direcționată printr-o diodă Schottky SS14 pentru încărcarea SC. Energia stocată este apoi furnizată sistemului printr-un regulator liniar HT7333, care furnizează până la 3,3 V mote-ului. Microcontrolerul funcționează fiabil în intervalul 2,7–3,3 V, iar capacitatea regulatorului de a funcționa sub 3,3 V permite funcționarea continuă până la atingerea pragului de detecție a căderii de tensiune (brown-out detection, BOD) de 2,7 V.

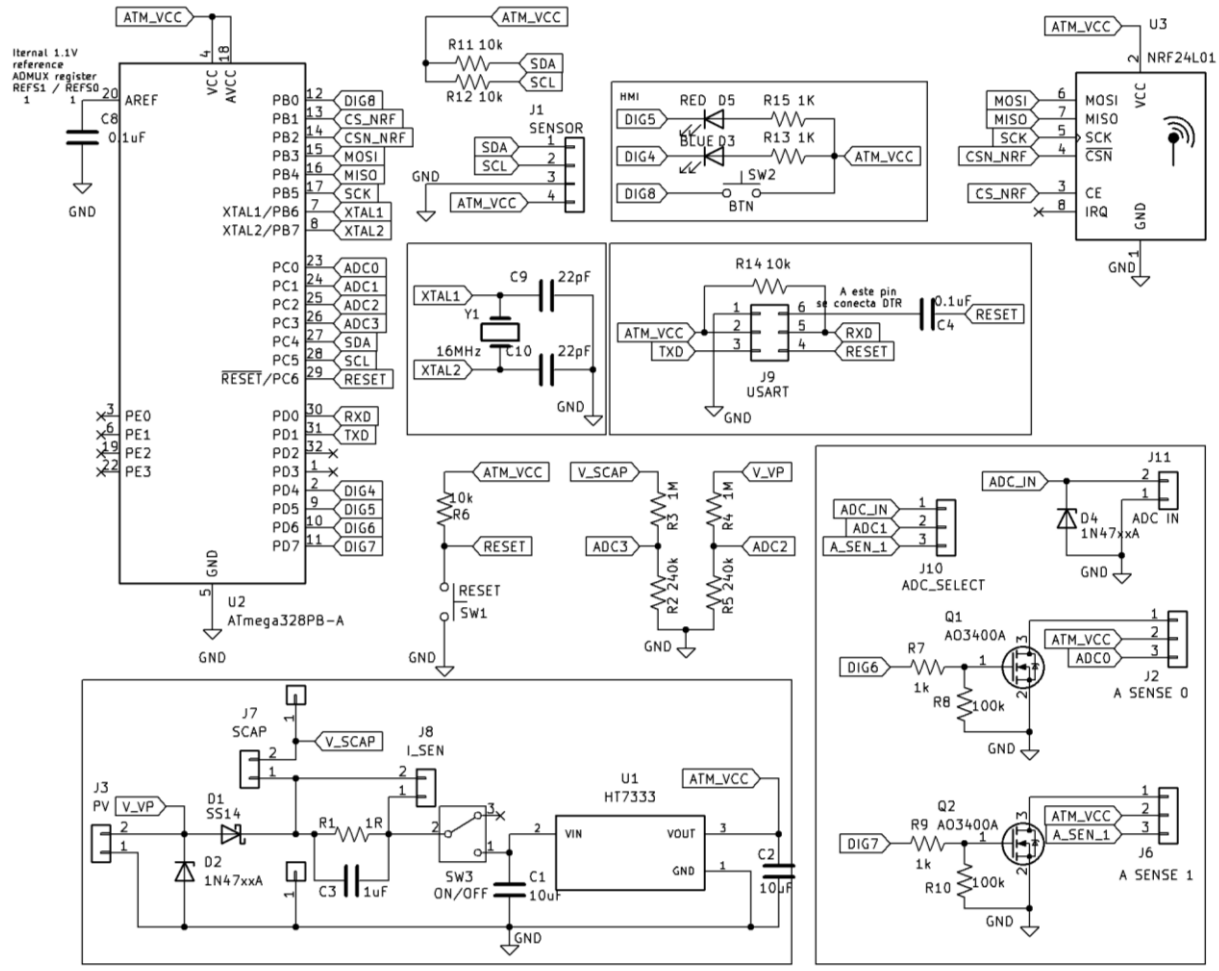


Figura 14: Schema generală a mote-ului

Ca sursă de energie a fost selectat un micro-panou PV policristalin comercial (53 × 30 mm). Conform producătorului, acesta furnizează până la 5,1 V la 32 mA în condiții STC, deși punctul de funcționare nu este specificat explicit.

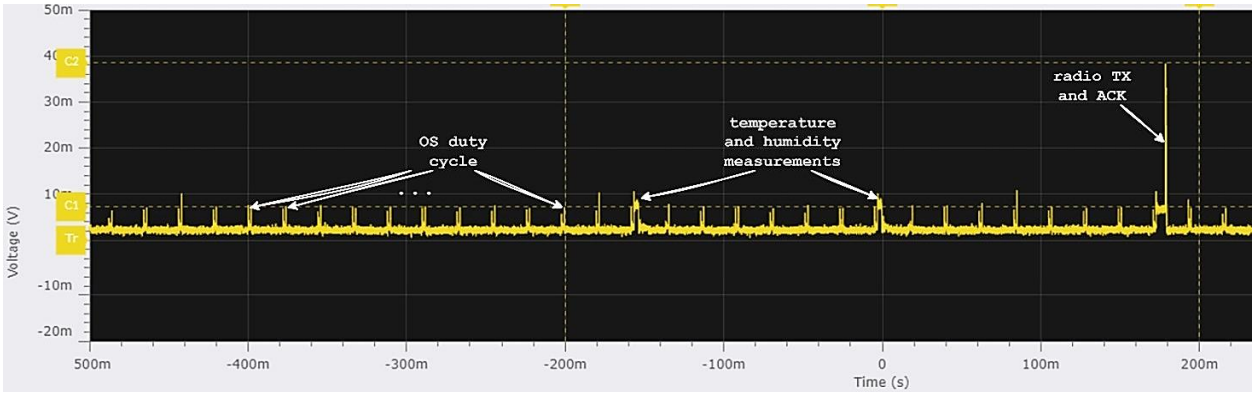


Figura 15: Profilul energetic obținut prin măsurarea căderii de tensiune pe un rezistor șunt de 1 Ω introdus în linia VCC

Figura 15 ilustrează profilul de consum al mote-ului dezvoltat. În Figura 15 se poate observa funcționarea mote-ului la intervale regulate (tick-uri de sistem), între care consumul de energie este practic neglijabil.

4.5 IMPLEMENTAREA ÎN TEREN

Au fost alese două medii distincte: un climat de savană tropicală „Aw/As" (Sancti Spiritus, Cuba) și România, cu climat continental umed „Dfb" (Brașov, România), conform clasificării Köppen-Geiger [75]. În acest sens, Brașovul are un climat semnificativ mai variabil și mai sezonier decât Caraibele tropicale, cu temperaturi extreme, zăpadă, nebulozitate persistentă iarna și regimuri complexe de precipitații, ceea ce îl face un teren de testare excelent pentru aceste sisteme. Figura 16 prezintă implementarea unui mote pe acoperișul Colina Universității, România.



Figura 16: Mote implementat în România

Aplicând aceleași principii ca în simulările noastre și ținând cont de faptul că evenimentele monitorizate evoluează lent și nu sunt critice, mote-urile utilizează o schemă de transmisie semi-adaptivă: datele sunt eșantionate la fiecare 5 minute, dar sunt transmise doar la detectarea unei variații de ±0,1 °C a temperaturii sau de ±1% a umidității relative. Dacă 5 intervale de eșantionare consecutive nu indică nicio variație, se transmite un *mesaj keep-alive* pentru a confirma activitatea mote-ului, transmisia având loc la intervale între 5 și 25 de minute.

4.5.1 Comportamentul operațional pe întregul an

Pentru a valida autosustenabilitatea unui mote în diferitele medii implementate anterior, în cursul anului 2025 se va serializa tensiunea SC () folosind MS Excel, pe baza seriilor de iradianță furnizate de Copernicus V_{sc}[76]. Acestea includ iradierea globală orizontală (GHI) la nivelul solului, la intervale de 15 minute, în Wh/m², incluzând impactul norilor. Pentru a corespunde măsurătorilor mote-ului, valoarea va fi convertită în M*edii ale iradianței* pe panou ca $G = GHI \times 4$.

Pentru a obține seria, am calculat *tensiunea circuitului deschis* (și V_{oc}) *Curent de scurtcircuit* (I_{sc}) în funcție of G, ajustat cu coeficientul empiric liniar (k_G), și incluzând efectele temperaturii T în grade Celsius conform ecuațiilor de translație din IEC 60891 [77].

$$I_{sc}(G) = I_{sc_stc} \times G \times 10^{-3}\,(1 + \alpha(T - 25)) \quad [2]$$

$$V_{oc}(G) = V_{oc_stc} + k_G \times \ln(G \times 10^{-3}) + \beta(T - 25) \quad [3]$$

Temperatura a fost preluată din seria de timp de o oră Open-Meteo [78] și a crescut într-un factor empiric (ΔT), datorită diferențelor dintre temperatura ambientală și temperatura de suprafață PV, rezultând în $T = T_{env} + \Delta T$.

Tensiunea PV (V_{pv})depinde de V_{oc}, și va fi limitată la tensiunea de rupere a diodei Zener (V_z), iar odată ce depășește pragul de conducție al diodei Schottky (V_{stk}), va fi modulată de tensiunea SC (V_{scap}). Algoritmic, îl reprezentăm astfel:

$$V_{pv} = MIN\big(V_z,\quad MIN\big(V_{oc},\quad (V_{scap} + V_{stk})\big)\big) \quad [4]$$

Din aceste ecuații, creșterea/scăderea tensiunii în SC (ΔV_{sc}), cu capacitate C, va fi recalculată la fiecare 5 minute (Δt) de la o valoare inițială de V_{sc}, ca punct de plecare atât pentru calculele modelului Excel, cât și pentru valorile seriale luate de particula reală, unde:

$$V_{scap} = V_{sc_previus} + \Delta V \quad [5]$$

$$\Delta V = \frac{I_{net} \times \Delta t}{C} \quad [6]$$

I_{net} este curentul de încărcare/descărcare al SC. Deoarece există o diodă Schottky cu o tensiune de ieșire V_{stk}, această contribuție de curent de la panou va fi făcută doar dacă $V_{oc} \geq V_{scap} + V_{stk}$, altfel, SC-ul se descarcă în sarcina ($-\Delta V$). Algoritmic, îl putem exprima astfel:

$$I_{net} = IF\left(\left(V_{oc} \geq V_{scap} + V_{stk}\right), \left(I_{chg}\right), \left(-I_{dischg}\right)\right) \quad [7]$$

când:

$$I_{dischg} = I_L - I_{leak} \quad [8]$$

$$I_{chg} = I_{pv} - I_L - I_{leak} \quad [9]$$

Deși I_L și I_{leak} sunt constante, I_{pv} reprezintă un punct de funcționare specific pe caracteristica neliniară a celulei PV $I_{pv}(V_{pv})$, curba care diferă în funcție de iradianță. Acest grafic poate fi împărțit în 3 secțiuni:

- De la $0V$ la tensiunea punctului de putere maximă V_{mpp},
- De la V_{mpp} la tensiunea circuitului deschis V_{oc}
- Mai mare decât V_{oc}

unde V_{mpp} este tensiunea la punctul de putere maximă, exprimată ca 80% din V_{oc}. Prima este definită de $(V_{scap} + V_{stk}) \leq V_{mpp}$ și, ca aproximație, putem defini I_{pv} ca curentul punctului de putere maximă (I_{mpp}), exprimat ca 90% din I_{sc}.

A doua secțiune este definită în intervalul $V_{mpp} \leq (V_{scap} + V_{stk}) \leq V_{oc}$ care, deși nu are un comportament liniar, credem că aproximația este fezabilă, luând ca puncte (V_{mpp}, I_{mpp}) și (V_{oc}, 0)

$$m = \frac{0 - I_{mpp}}{V_{oc} - V_{mpp}} = \frac{-I_{mpp}}{V_{oc} - V_{oc} \times 0.8} = \frac{-I_{mpp}}{V_{oc} \times 0.2} \quad [10]$$

$$n = -mV_{oc} \quad [11]$$

$$I_{pv} = m \times (V_{scap} + V_{stk} - V_{oc}) \quad [12]$$

A treia secțiune este când $V_{oc} \leq (V_{scap} + V_{stk})$ și nu ar trebui să aibă loc niciodată, dar pentru siguranță o vom lua în considerare doar pentru a exprima acest lucru în acest caz $I_{pv} = 0$ sau direct $\Delta V = 0$.

Ultima considerație este că, așa cum am văzut deja în V_{pv}, tensiunea în SC este de asemenea limitată de dioda Zener, iar acest lucru nu este luat în considerare în calculul anterior care lucrează cu valorile teoretice, deci aceasta trebuie să fie tăiată expres și în ecuația Excel astfel:

$$\Delta V = IF(V_{oc} > V_z, 0, (\Delta V)) \quad [13]$$

Pe baza comparațiilor cu măsurătorile reale din octombrie 2025, metricile de eroare prezentate în Tabelul 3 au fost obținute.

Tabelul 3: Metrici de eroare între tensiunea supercondensatorului simulată și măsurată

Metrică	Valoare
Eroarea Absolută Medie (MAE)	0,134 V
Eroarea medie pătratică rădăcină (RMSE)	0,366 V
RMSE normalizat (nRMSE)	8.30%
Eroarea procentuală absolută medie (MAPE)	5.74%
Coeficientul de determinare R^2	0.54

Valorile obținute se încadrează în intervalele acceptate în mod obișnuit în literatură pentru acest tip de model:

- MAPE-ul de 5,74% este deosebit de scăzut, indicând o acuratețe relativă ridicată în predicție.
- NRMSE de 8,3% este, de asemenea, scăzut, sugerând că modelul nu prezintă abateri sistematice semnificative.
- MAE de 0,134 V reprezintă o mică abatere absolută, mai mică de 6% din gama dinamică a tensiunii măsurate.
- Valoarea moderată R^2 de 0,54 este aproape de limita inferioară considerată acceptabilă. R^2 nu ar trebui folosit ca metrică unică; ar trebui să fie însoțit de MAE/RMSE. În cazul nostru, această valoare poate fi atribuită în principal fluctuațiilor de înaltă frecvență ale iradianței (cauzate, de exemplu, acoperirii de nori), care nu sunt captate de rezoluția temporală de 15 minute a datelor Copernicus, și naturii simplificate a modelului panourilor fotovoltaice. Pentru scopul principal al acestui studiu, care este evaluarea fezabilității energetice zilnice și prezicerea evenimentelor de foamete energetică, acest nivel de acuratețe este considerat mai mult decât suficient.

Această concordanță puternică ne permite să reconstruim în mod fiabil comportamentul sistemului folosind serii istorice de iradianță. Odată validate modelele, le aplicăm pe parcursul unui an calendaristic complet, mai exact, cel mai recent an complet, 2025.

În Figura 17, fiecare marcaj de pe curbele „min" și „max" corespunde celei mai mici, respectiv celei mai mari valori zilnice, calculate pentru fiecare zi a anului calendaristic 2025. După cum se observă în figura, tensiunea mote-ului scade sub pragul BOD, iar funcționarea încetează, doar în 3 zile, în evenimente izolate.

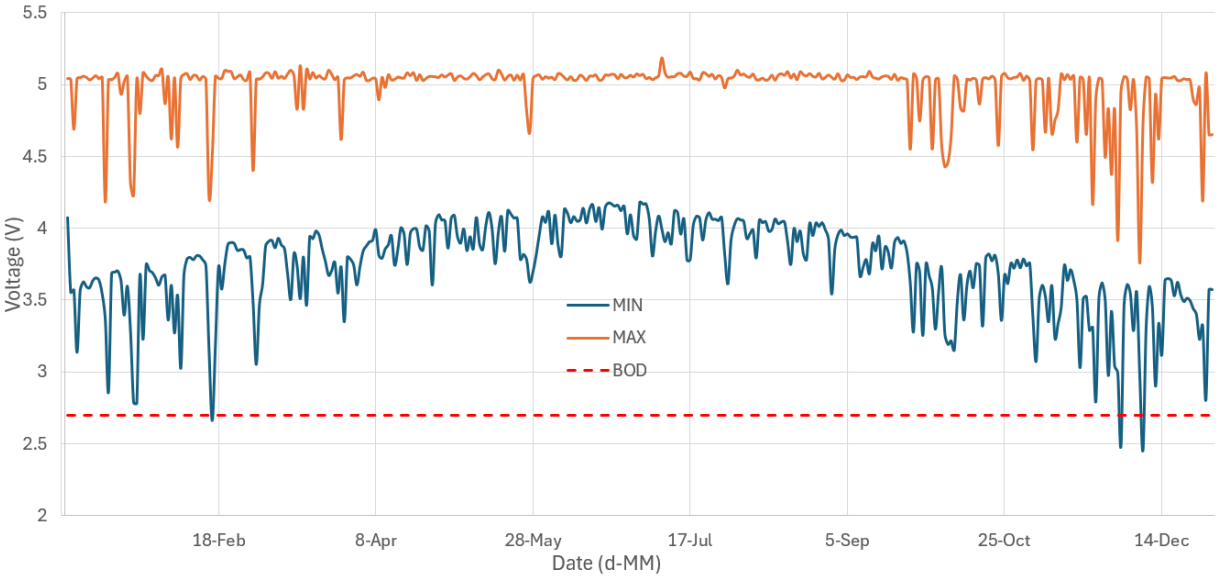


Figura 17: Valori zilnice minime și maxime pe tot parcursul anului 2025 V_{scap}

În funcție de aplicație, această scădere temporară ar putea fi atenuată complet prin mecanisme adaptive sau poate fi chiar irelevantă în scenarii mai puțin critice [79]. Având în vedere arhitectura deliberat simplă a nodului (lipsit de mecanisme de urmărire a punctului de putere maximă (MPPT) sau de convertoare DC–DC de tip buck), rezultatele subliniază fezabilitatea sistemelor fără baterie într-o varietate de implementări WSN.

4.6 CONSIDERENTE DE SECURITATE

Implementarea sistemelor cu resurse atât de limitate introduce provocări unice de securitate cibernetică. Așa cum s-a identificat în etapele finale ale acestei cercetări, discutarea politicilor de securitate pentru aceste noduri este imperativă.

Privind sistemul în ansamblu, din punctul de vedere al securității există trei straturi: *mote–sink*, *sink*–platformă și aplicație. Prin urmare, vom formula evaluări separate ale politicilor și mecanismelor.

4.6.1 Între mote și sink

Este posibil cel mai vulnerabil strat tocmai pentru că este cel mai restricționat. În arhitecturile cu LLN standardizate, precum BLE, Zigbee sau LoRa, există mecanisme consacrate de

protecție, atenuare și recuperare în fața amenințărilor, dar în cea prezentată în această teză niciunul dintre aceste mecanisme nu există.

Principalele provocări ale acestui strat sunt:

- **Compromisul energie–securitate:** În BF-WSN, energia este factorul limitativ dominant. Implementarea oricărui protocol criptografic introduce un overhead computațional care poate epuiza rapid energia limitată stocată într-un SC de 5 F. Există o nevoie critică de mecanisme de autentificare ușoare, compatibile cu bugetele energetice stricte ale mote-urilor alimentate de SC.
- **Reziliența la funcționarea intermitentă:** Calculul intermitent, în care nodurile pierd alimentarea și repornesc frecvent, creează vulnerabilități în menținerea unei „stări securizate".
- **Sarcini utile (payload) foarte limitate:** nRF24 are doar 32 de octeți. Adăugarea de antete criptografice, coduri de autentificare a mesajelor sau nonce-uri la fiecare pachet reduce sarcina utilă disponibilă pentru datele senzorilor, mărește numărul de pachete necesare pentru un anumit volum de date, saturează rapid spațiul disponibil și ar forța fragmentarea cadrelor în rafale, costul energetic rezultat putând deveni nesustenabil.
- **Dispozitive expuse fizic:** Întrucât funcția lor se desfășoară, în majoritatea cazurilor, în locuri deschise, izolate, nesupravegheate și chiar accesibile publicului, trebuie presupus că pot fi victime ale vandalismului, uzurpării identității, manipulării fizice, saturării canalului radio și tuturor tipurilor de interferențe, având în vedere puterea lor redusă, precum și ale interceptării pasive inevitabile de către persoane sau entități neautorizate ori direct ostile.

În acest sens, securitatea acestui strat reprezintă doar o primă linie de apărare care, într-o abordare serioasă, trebuie întotdeauna presupusă ca fiind încălcată, iar măsurile de atenuare și izolare trebuie adoptate la niveluri superioare.

Privind lucrurile astfel, ne-am putea întreba: merită protejat acest strat? Când vine vorba de securitate, răspunsul va fi întotdeauna DA, dar nu din motive evidente și nu în modul tradițional. În aceste rețele, datele nu sunt de obicei cel mai important lucru, astfel încât

intervențiile malițioase vizează de obicei atacuri de tip denial of service (DoS) asupra nodurilor sau uzurparea identității acestora.

În special, aceste rețele introduc un nou vector de atac: energia. Dacă există acces la mediul fizic al rețelei, în general::

- **Fizic:** Un atacator, chiar și fără acces fizic la mote, ar putea manipula sursa de energie ambientală.
- **Epuizare a resurselor:** Nodurile nelegitime pot inunda rețeaua cu diverse tipuri de trafic, epuizând rezervele de energie.

Se poate, de asemenea, falsifica identitatea unui mote sau chiar a sink-ului pentru a primi cât mai mult trafic, apoi fie să se crească semnificativ latența acestuia, degradând serviciul, fie să se renunțe direct la trafic fără retransmitere, întrerupând direct serviciul.

Protocolul aflat în dezvoltare include:

- Numere de identificare fixe și universale pentru dispozitive.
- CRC ușor plus numărul de caractere trimis pentru a detecta date corupte sau modificate intenționat.
- Protecție împotriva atacurilor de reluare folosind un hash format dintr-un număr de secvență și un nonce generat de *sink*.
- Listă albă gestionată de *sink* care identifică nodul după ID-ul său fizic unic și universal.
- Detectarea anomaliilor energetice, unde nodul monitorizează constant sursele de energie și raportează platformei.

4.6.2 Între sink și platformă

Securitatea acestui strat se bazează pe mecanisme standard de securitate a rețelei și va depinde în primul rând de legătura de ultimă milă din partea sink-ului și de implementarea API-ului REST din partea platformei. Mecanismele actuale de implementare la nivelul aplicației includ HTTPS și gestionarea sesiunilor Django. Toate acestea fac parte din standardele și implementările specifice framework-urilor, așa că nu vom intra aici în detalii..

4.6.3 Stratul aplicației

Acest strat este ultima și cea mai importantă linie de apărare. Cu toate acestea, arhitectura de securitate este specifică aplicației care gestionează platforma, deci depășește scopul acestei lucrări.

Pe lângă politicile și mecanismele de securitate bine cunoscute, se pot oferi câteva considerații empirice bazate pe experiența în manipularea datelor:

- **Neîncredere totală:** Fiecare șir de date provenit de la un mote poate fi modificat sau poate conține date eronate. Orice comportament anormal sau neașteptat trebuie considerat suspect.
- **Neîncredere continuă:** Chiar dacă datele curente nu par compromise, datele istorice trebuie verificate și corelate periodic pentru a depista anomalii și inconsecvențe.
- Obligarea sink-ului să autentifice fiecare nod individual, chiar dacă sink-ul gestionează de fapt sesiunile nodurilor.
- Trebuie să existe neîncredere și față de sink, deoarece și acesta poate fi compromis sau direct uzurpat.

În general, considerăm că, din cauza limitărilor de resurse ale acestor sisteme, cea mai bună modalitate de a proiecta o arhitectură de securitate este să se presupună că garantarea securității și integrității datelor primite de la nodurile unui LLN este imposibilă, astfel încât o politică de securitate bună implică încercarea activă de a detecta și atenua activitățile malițioase la nivelul aplicației.

4.7 CONCLUZIE PARȚIALĂ

Prin combinarea unui panou PV compact, a unui SC mic de 5 F și a unui dispozitiv personalizat cu consum ultra-redus, susținut de un OS ușor, acest capitol demonstrează funcționarea zilnică neîntreruptă a mote-urilor BF-WSN atât în climate tropicale, cât și în cele temperate. Autonomia energetică este atinsă prin asigurarea faptului că SC finalizează în mod fiabil cel puțin un ciclu de reîncărcare pe zi, în ciuda variațiilor iradianței solare, confirmând fezabilitatea practică a funcționării BF-WSN.

Strategia propusă prioritizează ciclul zilnic de reîncărcare, în loc de maximizarea stocării de energie pe termen lung, diferențiindu-se astfel de proiectările convenționale de sisteme PV. Această alegere de proiectare permite utilizarea unor componente mai mici și mai ieftine, menținând în același timp funcționalitatea în condiții de iradianță modestă. Ca urmare, costul redus al dispozitivului permite introducerea redundanței la nivel de rețea, susținând implementări BF-WSN reziliente prin mecanisme de control al topologiei și strategii adaptive de detecție conștiente de energie, care reduc comunicația inutilă și economisesc energie.

Cu toate acestea, constrângerile de mediu rămân un factor limitativ, în special în regiunile temperate, în perioadele cu lumină solară redusă. Variațiile sezoniere, acumularea de praf, acoperirea cu zăpadă și fluctuațiile de temperatură pot perturba ciclul zilnic de încărcare, evidențiind importanța proiectării mote-urilor conștiente de mediu și a luării în considerare a marjelor de energie, pentru a asigura o funcționare fiabilă pe termen lung în diverse scenarii de implementare.

Dincolo de subsistemul energetic, această lucrare demonstrează și un ecosistem BF-WSN complet, end-to-end, prin dezvoltarea integrată a unui sink personalizat și a unei platforme IoT bazate pe Django. Sink-ul face legătura între rețelele nRF24L01 cu consum ultra-redus și infrastructurile IP standard, folosind o traducere ușoară a protocoalelor, în timp ce o arhitectură neblocantă, bazată pe evenimente, asigură monitorizarea continuă a canalelor de comunicație, alături de sarcinile periodice ale sistemului. Mecanismul de sincronizare minimizează utilizarea rețelei prin transfer incremental de date, poziționare a datelor pe bază de offset și transmisie fragmentată, permițând gestionarea fiabilă a seturilor mari de date în condiții de memorie restrânsă.

Pe lângă arhitectura de bază a sistemului, două aspecte metodologice s-au dovedit esențiale în timpul implementării și validării. În primul rând, adoptarea unui flux de fabricare a PCB-urilor în laborator a permis iterarea rapidă a hardware-ului și co-proiectarea strânsă hardware–software în etapele timpurii de prototipare. Deși limitată în comparație cu procesele industriale de fabricație, această abordare a facilitat cicluri rapide de proiectare–testare și hardware experimental reproductibil. În al doilea rând, utilizarea sistematică a instrumentelor de programare asistată de AI a sprijinit dezvoltarea firmware-ului, a simulărilor și a platformei, prin accelerarea sarcinilor de codare de rutină și a implementărilor exploratorii, sub supraveghere umană. Aceste metodologii nu au înlocuit practicile inginerești convenționale, ci au acționat ca factori favorizanți, care au redus overhead-ul de dezvoltare și au susținut integrarea multidisciplinară.

Analiza comparativă dintre LDO și cele mai frecvent utilizate PMIC din literatură arată că costul suplimentar ridicat (de cel puțin 10 ori mai mare), plus complexitatea sporită a PMS, care mărește costurile de testare și punctele potențiale de defectare, nu se traduce semnificativ în ore suplimentare de autonomie în scenariile evaluate. Utilizarea unui PMIC care implementează MPPT, precum BQ25570, este justificată doar în scenarii cu condiții nefavorabile de recoltare a energiei.

Privind spre viitor, dezvoltările următoare se vor concentra pe construirea unor profiluri energetice anuale folosind dispozitivele implementate, rafinarea strategiilor de întreținere și calibrare, integrarea unor politici mai dinamice de management al energiei și optimizarea suplimentară a dimensionării PV și SC. La nivel de sistem, extinderea stivei de comunicație către o funcționare bidirecțională robustă, cu abstractizări standardizate ale protocoalelor, va spori scalabilitatea și flexibilitatea implementării, întărind aplicabilitatea soluțiilor BF-WSN în scenarii reale, la scară largă.

În ceea ce privește securitatea, în general, având în vedere constrângerile de resurse ale nodurilor LLN, cea mai bună modalitate de a proiecta o arhitectură de securitate este să se presupună că garantarea securității și integrității datelor primite de la nodurile unui LLN este imposibilă, astfel încât o politică de securitate bună implică încercarea activă de a detecta și atenua activitățile malițioase la nivelul aplicației.

5 CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Această teză de doctorat oferă un cadru integrat și validat experimental pentru proiectarea, modelarea, implementarea și evaluarea dispozitivelor **BF-WSN**. Lucrarea avansează stadiul actual al cunoașterii prin punerea în legătură a patru domenii care apar în mod tradițional izolate:

- tehnologiile EH și caracterizarea lor,
- stocarea energiei și arhitecturile de management al puterii,
- proiectarea software și firmware pentru calculul intermitent și
- integrarea la nivel de sistem cu infrastructuri IoT reale

Cele mai relevante constatări și concluzii, conform obiectivelor cercetării, sunt menționate mai jos.

Capitolul 2, în întregime, răspunde obiectivului **RO1**. Ca prim pas, a fost propus un cadru taxonomic pentru clasificarea energiilor regenerabile, care distinge între tipul de energie (de exemplu, lumină, căldură sau energie mecanică), sursa de energie (de exemplu, soarele, activitatea industrială sau valurile oceanului) și traductor (de exemplu, celule PV, TEG sau PZ). A fost realizată o SLR bazată pe cadrul PRISMA, care a analizat un deceniu de cercetare (2014–2025) privind EH-WSN și a condus la identificarea și categorizarea a 215 articole. Din această analiză a fost posibil să se desprindă următoarele:

- s-a identificat faptul că sursele de energie mecanică au primit cea mai mare atenție în literatură, iar în cadrul acestei categorii traductoarele PZ sunt cele mai studiate (Secțiunea 2.3).
- S-a observat că, deși recoltarea energiei solare este matură din punct de vedere tehnologic, ea este slab reprezentată în studiile care utilizează exclusiv supercondensatoare (SC) pentru stocare, existând o lipsă de validare experimentală în condiții reale de teren pentru sistemele solare fără baterie (Secțiunea 2.3.1).

- Aceasta contrastează cu tendințele de stocare, deoarece 89% dintre studiile de vârf privind sistemele de alimentare eficiente energetic (EH-WSN) au renunțat la baterii în favoarea condensatoarelor și a SC, datorită duratei lor de viață mai lungi și a întreținerii reduse (Secțiunea 2.4).

RO2 a fost abordat în Secțiunea 2.5, ca parte a SLR. S-a observat că ciclul energetic al sistemelor fără baterie este destul de omogen, bazat pe cicluri scurte (de cel mult o zi) de colectare a energiei și de stocare temporară pentru un număr limitat de activități ale dispozitivului, care trebuie să includă colectarea și transmiterea datelor. Aceasta se datorează faptului că proiectarea lor pornește de la premisa disponibilității intermitente a energiei, dar întotdeauna cu așteptarea că sursa va fi disponibilă la un moment dat. Pornind de la această observație, a fost dezvoltat un cadru complet de modelare, incluzând modele SPICE pentru SC, panouri PV, TEG și pentru mote-ul complet (Capitolul 3). Acest efort de modelare a demonstrat că comportamentul mote-urilor BF-WSN poate fi prezis cu fidelitate ridicată atunci când subsistemul de recoltare și profilul de consum sunt reprezentate împreună. Rezultatele au oferit o metodologie replicabilă pentru dimensionarea elementelor de stocare a energiei, determinarea ciclurilor de lucru fezabile și estimarea viabilității operaționale pe termen lung.

Un prototip complet funcțional de mote fără baterie a fost proiectat, răspunzând obiectivului RO3, fabricat și validat experimental. Firmware-ul, bazat pe sistemul de operare personalizat idOS, a demonstrat că multitaskingul cooperativ, rețelistica ușoară și planificarea conștientă de energie pot fi toate executate pe microcontrolere low-end, menținând în același timp bugete energetice stricte (Secțiunea 3.2). Am evaluat prototipul în condiții de laborator și prin implementare în teren pe termen lung, confirmând că funcționarea autonomă zilnică este fezabilă folosind exclusiv energie solară și stocare în SC..

Capitolul 4 răspunde obiectivului RO4, unde a fost descrisă dezvoltarea unei integrări a sistemului BF-WSN cu un sink compatibil IP și cu o platformă IoT bazată pe Django, care a demonstrat interoperabilitate end-to-end. Platforma permite monitorizarea continuă, sincronizarea datelor, vizualizarea geospațială și analiza pe termen lung a comportamentului dispozitivelor. Acest sistem validează faptul că mote-urile fără baterie pot face parte din infrastructuri IoT complete, de nivel producție.

Secțiunea 4.7.2 prezintă comportamentul estimat pentru un an întreg, pe baza datelor satelitare istorice, demonstrând validitatea modelelor prezentate, precum și fezabilitatea implementării unor noduri PMS extrem de simple și foarte ieftine, cu capacități sub 5 F și panouri PV de mai puțin de 15 cm².

Aceste rețele implementate sunt deosebit de nesigure, deoarece nu dispun de mecanisme de securitate dincolo de identificarea mote-ului față de sink și verificarea activă a integrității. Cu toate acestea, în general, aceste rețele nu sunt pe deplin sigure din cauza limitărilor lor. Prin urmare, se poate concluziona că cea mai bună politică de securitate este detecția atacurilor, izolarea lor și atenuarea daunelor.

În ansamblu, teza demonstrează că BF-WSN pot fi implementate, modelate și gestionate în mod realist folosind hardware ieftin, stocare bazată pe SC și stive software ușoare, cu condiția ca sistemul să fie dimensionat cu grijă și proiectat ca un tot unitar. Constatările aduc claritate metodologică, dovezi experimentale și instrumente practice care avansează fezabilitatea pe termen lung a sistemelor de detecție sustenabile.

5.1 CONTRIBUȚII ORIGINALE

Principalele contribuții originale ale acestei cercetări doctorale sunt următoarele:

- **Un cadru taxonomic** pentru clasificarea energiilor regenerabile în tipuri de energie, surse de energie și traductoare.
- **Un SLR cuprinzător, axat în mod special pe EH pentru WSN-uri.** Spre deosebire de analizele anterioare, aceast SLR introduce o metodologie structurată, identifică tendințe de cercetare, cuantifică intervalele de putere ale mecanismelor de recoltare și evidențiază lacunele din proiectările bazate pe SC și din validarea în condiții de mediu realiste.
- **Un cadru unificat de modelare pentru nodurile BF-WSN (mote-uri).** Cadrul permite o analiză reproductibilă a bugetului energetic și o prognoză precisă a comportamentului mote-ului în condițiile disponibilității intermitente a energiei. Acesta include modele SPICE pentru:
    - Panouri fotovoltaice,

- TEGs,
- SC (incluzând ESR, autodescărcarea și îmbătrânirea),
- și profilul complet de consum al mote-ului.

- **Adaptarea și testarea riguroasă a idOS, un sistem de operare ușor, în mote-uri intermitente și conștiente de energie.** idOS integrează:
  - multitasking cooperativ prin protothreads,
  - stivă de rețea bazată pe uIP,
  - planificare conștientă de energie și cicluri sleep/wake,
  - mecanisme de temporizare și IPC optimizate pentru funcționarea fără baterie.

    Aceasta oferă un strat funcțional de abstractizare a sistemului pentru microcontrolerele cu resurse limitate.

- **Dezvoltarea și validarea unei metodologii complete de simulare bazate pe SPICE pentru BF-WSN.** Metodologia cuplează modelele de recoltare, comportamentul stocării și consumul de energie al mote-ului pentru a simula cicluri operaționale zilnice realiste. Aceasta oferă un instrument nou pentru dimensionarea sistemului și explorarea spațiului de proiectare.
- **Integrarea completă a unui ecosistem BF-WSN cu un sink compatibil IP și o platformă IoT bazată pe Django.** Aceasta demonstrează viabilitatea sistemului end-to-end. Include:
  - translatarea protocolului de la nRF24L01 la IP,
  - protocol de sincronizare incrementală,
  - urmărirea geospațială a dispozitivelor,
  - vizualizarea de tip dashboard și a profilurilor energetice.
- **Implementarea în condiții reale și evaluarea pe durata unui an a mote-urilor fără baterie, alimentate exclusiv cu energie solară și SC.** Aceasta constituie unul dintre puținele studii validate în teren privind comportamentul BF-WSN pe perioade îndelungate, oferind dovezi empirice pentru funcționarea zilnică fără baterii și cu resurse extrem de limitate pentru obținerea, stocarea și gestionarea energiei.

5.2 DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Lucrările viitoare pot extinde constatările acestei teze în mai multe direcții promițătoare:

- **Integrare avansată EH și sisteme hibride. Cercetarea este limitată la panouri solare comerciale.** Ar trebui evaluate și alte surse de energie și traductoare, precum:
    - combinarea surselor PV, termice și mecanice în scheme unificate de management al puterii;
    - investigarea tehnologiilor emergente, precum OPV, TENG și bio-recoltoare, în condiții de mediu realiste.
- **Materiale de stocare îmbunătățite și SC cu număr mare de cicluri.** Piața oferă și alte forme de stocare a energiei, care ar trebui evaluate, precum și mecanisme de păstrare și prelungire a duratei de viață a acestor elemente.
    - Caracterizarea unor noi chimii de SC, a sistemelor hibride Li-ion/SC sau a condensatoarelor în stare solidă.
    - Explorarea modelelor de îmbătrânire și a testelor accelerate a ciclulrilor de viață pentru implementări pe termen lung.
- **Rețelistică conștientă de energie, fără predicție, pentru BF-WSN.** Cercetarea a evitat în mod deliberat orice predicții privind disponibilitatea energiei, dincolo de mecanismele de duty cycle pentru economisirea energiei în mote. Aceasta a arătat rezultate excelente cu cele mai simple metode, care forțează dispozitivul să funcționeze în condiții departe de punctele optime. Integrarea mecanismelor specifice rețelei cu dispozitive foarte restrictive poate include:
    - duty-cycling adaptiv, cu și fără prognoză,
    - protocoale de comunicație oportuniste pentru dispozitive intermitente,
    - mecanisme la nivelul legăturii de date, optimizate pentru bugete de putere foarte variabile.
- **Extinderea idOS într-o platformă modulară completă pentru calcul intermitent.** idOS rulează în prezent pe un microprocesor relativ limitat ca resurse, ATMega328PB. Ar trebui evaluată extinderea capacităților de procesare ale mote-ului folosind hardware mai puternic:
    - suport pentru MCU-uri și interfețe radio suplimentare;

    - analiză automată a traselor de putere pentru adaptarea planificării în timp real;
    - integrare cu structuri de date sigure la întreruperi.
- **Implementări în teren pe termen lung, la scară largă.** Datele au fost colectate de la 5 mote-uri pe o perioadă de aproximativ 5 luni. Pentru a evalua performanța pe un an, a fost realizată o simulare folosind date satelitare, presupunând că toate mote-urile ar continua să funcționeze în același mod în condiții diferite. Studiile la scară largă pot valida mai precis acest model și pot oferi evaluări mai bune pentru industrie. Câteva activități propuse sunt:
    - studierea variabilității mediului pe anotimpuri, culturi, contexte interioare și exterioare;
    - evaluarea comportamentului rețelei cu zeci sau sute de mote-uri;
    - cuantificarea fiabilității, a costului de întreținere și a costului total de proprietate.
- **Către o arhitectură BF-WSN standardizată.** Mecanismele și protocoalele utilizate au fost dezvoltate special pentru validarea studiilor de caz propuse. Este necesară descrierea unor standarde care pot fi analizate și adoptate de industrie:
    - dezvoltarea de specificații deschise pentru mote-uri, sink-uri și platforme conștiente de energie;
    - definirea unor interfețe de referință pentru circuitele integrate de management al puterii și pentru modulele de stocare.
- **Securitate și reziliență în sisteme intermitente cu consum ultra-redus.** Este evident că această cercetare nu abordează un aspect fundamental legat de securitate. Stabilirea unor politici și mecanisme de securitate a rețelei este imperativă. Trebuie realizate următoarele sarcini:
    - autentificare ușoară, compatibilă cu mote-urile alimentate de SC;
    - reziliență la execuția cu stare parțială și la întreruperile comunicației.

După cum demonstrează această lucrare, ea face parte din lungul parcurs al IoT. Este contribuția noastră la construirea unei noi generații de dispozitive pentru rețele de senzori mai simple, mai economice, mai sustenabile și mai prietenoase cu mediul.

BIBLIOGRAFIE

[1] Shaikh FK, Zeadally S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;55:1041–54. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.010.

[2] Singh J, Kaur R, Singh D. Energy harvesting in wireless sensor networks: A taxonomic survey. International Journal of Energy Research 2021;45:118–40. https://doi.org/10.1002/er.5816.

[3] León Ávila BY, García Vázquez CA, Pérez Baluja O, Cotfas DT, Cotfas PA. Energy harvesting techniques for wireless sensor networks: A systematic literature review. Energy Strategy Reviews 2025;57:101617. https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101617.

[4] Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P, Moher D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ 2021;372:n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

[5] Denyer D, Tranfield D, Van Aken JE. Developing design propositions through research synthesis. Organization Studies 2008;29:393–413. https://doi.org/10.1177/0170840607088020.

[6] MacDonell S, Shepperd M, Kitchenham B, Mendes E. How reliable are systematic reviews in empirical software engineering? IEEE Transactions on Software Engineering 2010;36:676–87. https://doi.org/10.1109/TSE.2010.28.

[7] Ávila BYL, Vázquez CAG, Baluja OP, Domínguez LAQ, Cotfas DT, Cotfas PA. Energy Storage and Management in Battery-free Wireless Sensor Networks. 2025 14th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2025, p. 449–54. https://doi.org/10.1109/ICRERA66237.2025.11283914.

[8] Olabi AG, Abbas Q, Al Makky A, Abdelkareem MA. Supercapacitors as next generation energy storage devices: Properties and applications. Energy 2022;248:123617. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123617.

[9] Gujar S, Ugale S. Supercapacitor Market Size, Share & Forecast Analysis, 2034. 2025.

[10] Ronsmans J, Lalande B. Combining energy with power: Lithium-Ion Capacitors. 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016, p. 261–4. https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2016.7525905.

[11] Priya S, Inman DJ, editors. Energy Harvesting Technologies. Boston, MA: Springer US; 2009. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1.

[12] Qi N, Dai K, Wang X, You Z. Adaptive Capacitor Charging Circuit With Simplified Configuration for Efficient Piezoelectric Energy Harvesting. IEEE Transactions on Power Electronics 2022;37:10267–80. https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3162947.

[13] Toh WY, Tan YK, Koh WS, Siek L. Autonomous Wearable Sensor Nodes With Flexible Energy Harvesting. IEEE Sensors Journal 2014;14:2299–306. https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2309900.

[14] Vracar L, Prijic A, Nesic D, Devic S, Prijic Z. Photovoltaic Energy Harvesting Wireless Sensor Node for Telemetry Applications Optimized for Low Illumination Levels. ELECTRONICS 2016;5. https://doi.org/10.3390/electronics5020026.

[15] Porcarelli D, Brunelli D, Benini L. Clamp-and-Forget: A self-sustainable non-invasive wireless sensor node for smart metering applications. Microelectronics Journal 2014;45:1671–8. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mejo.2014.05.019.

[16] Zhou K, Wang X, Wang L, Duan C, Zhang Y, Zhao L, Maeda R. Self-powered wireless sensing system with cylindrical high voltage side electric field energy harvesting by discharge circuit. Sensors and Actuators A: Physical 2024;380:116047. https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.116047.

[17] Lampani L, Gaudenzi P. Innovative composite material component with embedded self-powered wireless sensor device for structural monitoring. Composite Structures 2018;202:136–41. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.011.

[18] Chew ZJ, Ruan T, Zhu M. Power Management Circuit for Wireless Sensor Nodes Powered by Energy Harvesting: On the Synergy of Harvester and Load. IEEE Transactions on Power Electronics 2019;34:8671–81. https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2885827.

[19] Lo YC, Shu YC. Self-powered SECE piezoelectric energy harvesting induced by shock excitations for sensor supply. Mechanical Systems and Signal Processing 2022;177:109123. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109123.

[20] Li M, Zhang Y, Li K, Zhang Y, Xu K, Liu X, Zhong S, Cao J. Self-powered wireless sensor system for water monitoring based on low-frequency electromagnetic-pendulum energy harvester. Energy 2022;251:123883. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123883.

[21] Wu X, Lee D-W. An electromagnetic energy harvesting device based on high efficiency windmill structure for wireless forest fire monitoring application. Sensors and Actuators A: Physical 2014;219:73–9. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.09.002.

[22] Kuang Y, Ruan T, Chew ZJ, Zhu M. Energy harvesting during human walking to power a wireless sensor node. Sensors and Actuators A: Physical 2017;254:69–77. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.11.035.

[23] Zhao X, Wei G, Li X, Qin Y, Xu D, Tang W, Yin H, Wei X, Jia L. Self-powered triboelectric nano vibration accelerometer based wireless sensor system for railway state health monitoring. Nano Energy 2017;34:549–55. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.02.036.

[24] Dong L, Hu G, Zhang Y, Ding W, Qu S, Tang Q, Zhao C, Yang Y, Yang F. Metasurface-enhanced multifunctional flag nanogenerator for efficient wind energy harvesting and environmental sensing. Nano Energy 2024;124:109508. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109508.

[25] Xu W, Gu S, Luo A, Tao K, Wang F. A built-in charging electret rotational energy harvester for kinetic energy at ultra-low frequency. Renewable Energy 2025;251:123407. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123407.

[26] Chen L, Xu X, Zeng P, Ma J. Integration of Energy Harvester for Self-Powered Wireless Sensor Network Nodes. INTERNATIONAL JOURNAL OF DISTRIBUTED SENSOR NETWORKS 2014. https://doi.org/10.1155/2014/782710.

[27] Yu H, Zhou J, Yi X, Wu H, Wang W. A hybrid micro vibration energy harvester with power management circuit. Microelectronic Engineering 2015;131:36–42. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mee.2014.10.008.

[28] Liu W, Yuan Z, Zhang S, Zhu Q. Enhanced broadband generator of dual buckled beams with simultaneous translational and torsional coupling. Applied Energy 2019;251:113412. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113412.

[29] Rana MM, Khan AA, Zhu W, Fattah MFA, Kokilathasan S, Rassel S, Bernard R, Ababou-Girard S, Turban P, Xu S, Wang C, Ban D. Enhanced piezoelectricity in lead-free halide perovskite nanocomposite for self-powered wireless electronics. Nano Energy 2022;101:107631. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107631.

[30] Raja V, Umapathy M, Uma G, Usharani R. Performance enhanced piezoelectric rotational energy harvester using reversed exponentially tapered multi-mode structure for autonomous sensor systems. Journal of Sound and Vibration 2023;544:117429. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117429.

[31] Luo A, Xu W, Sun J, Xi K, Tang S, Guo X, Lee C, Wang F. Vibration energy harvester with double frequency-up conversion mechanism for self-powered sensing system in smart city. Nano Energy 2023;105:108030. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.108030.

[32] Wang L, Luo G, Jiang Z, Zhang F, Zhao L, Yang P, Lin Q, Maeda R. Broadband vibration energy harvesting for wireless sensor node power supply in train container. Rev Sci Instrum 2019;90:125003. https://doi.org/10.1063/1.5127243.

[33] Jung HJ, Song Y, Hong SK, Yang CH, Hwang SJ, Jeong SY, Sung TH. Design and optimization of piezoelectric impact-based micro wind energy harvester for wireless sensor network. Sensors and Actuators A: Physical 2015;222:314–21. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.12.010.

[34] Rubes O, Chalupa J, Ksica F, Hadas Z. Development and experimental validation of self-powered wireless vibration sensor node using vibration energy harvester. Mech Syst Signal Proc 2021;160:107890. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107890.

[35] Wang P, Gao M, Sun Y, Zhang H, Liao Y, Xie S. A vibration-powered self-contained node by profiling mechanism and its application in cleaner agricultural production. Journal of Cleaner Production 2022;366:132897. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132897.

[36] Sudhawiyangkul T, Isarakorn D. Design and realization of an energy autonomous wireless sensor system for ball screw fault diagnosis. Sensors and Actuators A: Physical 2017;258:49–58. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.02.027.

[37] Zhuo J, Zheng Z, Huang H, Liu W, Zhao C, Zhang Z, Yuan Y. Plucking and linear-to-rotary hybrid harvester for low-amplitude vibrations of high-speed railway with an innovative three-step amplification mechanism. Applied Energy 2023;347:121363. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121363.

[38] Huang M, Shen C, Zhang Y, Zhang Z, Sun L, Liu H. Self-powered wireless sensor node with hybrid energy harvesting and DL-enhanced vibration sensing for bearing fault diagnosis. Inf Fusion 2026;129:104055. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.104055.

[39] Zheng Y, Wang Y, Liu J, Wang J, Hu G. Toward carbon-zero internet of things: Soil-powered renewable energy for perpetual sensing and communication. DeCarbon 2025;10:100137. https://doi.org/10.1016/j.decarb.2025.100137.

[40] Gao M, Cong J, Xiao J, He Q, Li S, Wang Y, Yao Y, Chen R, Wang P. Dynamic modeling and experimental investigation of self-powered sensor nodes for freight rail transport. Applied Energy 2020;257:113969. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113969.

[41] Loreti P, Catini A, De Luca M, Bracciale L, Gentile G, Di Natale C. The Design of an Energy Harvesting Wireless Sensor Node for Tracking Pink Iguanas. Sensors 2019;19:985. https://doi.org/10.3390/s19050985.

[42] Lin Q, Chen Y-C, Chen F, DeGanyar T, Yin H. Design and experiments of a thermoelectric-powered wireless sensor network platform for smart building envelope. Applied Energy 2022;305:117791. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117791.

[43] Wang H, Niu A, Waktole DA, Jia B, Zuo Z, Wang W. A self-powered wireless temperature sensing system using flexible thermoelectric generators under simulated thermal condition. Measurement 2025;253:117637. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117637.

[44] Hou L, Tan S, Yang L, Zhang Z, Bergmann NW. Autonomous Wireless Sensor Node with Thermal Energy Harvesting for Temperature Monitoring of Industrial Devices. INTERNATIONAL JOURNAL OF ONLINE ENGINEERING 2017;13:75–82. https://doi.org/10.3991/ijoe.v13i04.6802.

[45] Oliveira LFP de, Morais FJ de O, Manera LT. Development of an energy harvesting system based on a thermoelectric generator for use in online predictive maintenance systems of industrial electric motors. Sustainable Energy Technologies and Assessments 2023;60:103572. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103572.

[46] de Oliveira LFP, de Oliveira Morais FJ, Manera LT. Development of a hybrid energy harvesting system based on thermoelectric and electromagnetic generators for use in industrial electric motors. Sustainable Energy Technologies and Assessments 2024;66:103802. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103802.

[47] Wang C, Xu Z, Wang H, Cai T, Tao H, Wang Y, Tang X. Combined energy supply and management of self-powered wireless sensors based on radioisotope thermoelectric generator for multiple scenarios. Energy Conversion and Management 2023;297:117706. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117706.

[48] Visconti P, Ferri R, Pucciarelli M, Venere E. DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF A SOLAR-BASED ENERGY HARVESTING AND POWER MANAGEMENT SYSTEM FOR A WSN NODE APPLIED TO OPTIMIZED GOODS TRANSPORT AND STORAGE. INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS 2016;9:1637–67. https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-933.

[49] Yue X, Kiely J, Gibson D, Drakakis EM. Charge-Based Supercapacitor Storage Estimation for Indoor Sub-mW Photovoltaic Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Nodes. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2020;67:2411–21. https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2896321.

[50] Qi N, Yin Y, Dai K, Wu C, Wang X, You Z. Comprehensive optimized hybrid energy storage system for long-life solar-powered wireless sensor network nodes. Applied Energy 2021;290:116780. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116780.

[51] Sultania AK, Famaey J. Batteryless NB-IoT prototype for bidirectional communication powered by ambient light. Ad Hoc Networks 2023;142:103100. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103100.

[52] Dekimpe R, Xu P, Schramme M, Gérard P, Flandre D, Bol D. A battery-less BLE smart sensor for room occupancy tracking supplied by 2.45-GHz wireless power transfer. Integration 2019;67:8–18. https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2019.03.006.

[53] Zheng Y, Cao L-X, Lv J-R, Wen H-Y, Mao L-X, Wang X-Q, He Z-Z. Self-powered flexible sensor network for continuous monitoring of crop micro-environment and growth states. Measurement 2025;242:116002. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116002.

[54] von der Ahe C, Lüers B, Overmeyer L, Geck B, Fürtjes T. Low power sensor node with photovoltaic power supply for radio-based process monitoring. Procedia Manufacturing 2018;24:203–9. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.038.

[55] Haroun FME, Deros SNM, Alkahtani AA, Din NM. Towards Self-Powered WSN: The Design of Ultra-Low-Power Wireless Sensor Transmission Unit Based on Indoor Solar Energy Harvester. Electronics 2022;11:2077. https://doi.org/10.3390/electronics11132077.

[56] Wang L, Fei Z, Duan C, Han X, Li M, Gao W, Xia Y, Jia C, Lin Q, Zhao Y, Li Z, Zhao L, Jiang Z, Maeda R. Self-sustained and self-wakeup wireless vibration sensors by electromagnetic-piezoelectric-triboelectric hybrid energy harvesting. Applied Energy 2024;355:122207. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122207.

[57] Veerubhotla R, Nag S, Das D. Internet of Things temperature sensor powered by bacterial fuel cells on paper. Journal of Power Sources 2019;438:226947. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226947.

[58] Sharma H, Haque A, Jaffery ZA. Modeling and Optimisation of a Solar Energy Harvesting System for Wireless Sensor Network Nodes. J Sens Actuar Netw 2018;7:40. https://doi.org/10.3390/jsan7030040.

[59] Guan M, Wang K, Xu D, Liao W-H. Design and experimental investigation of a low-voltage thermoelectric energy harvesting system for wireless sensor nodes. Energy Conversion and Management 2017;138:30–7. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.049.

[60] Mihajlovic Z, Milosavljevic V, Joza A, Rajs V, Damnjanovic M, Zivanov M. Surface and Underground Water Level Monitoring Using Wireless Sensor Node with Energy Harvesting Support. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA 2016;22:62–8. https://doi.org/10.5755/j01.eie.22.5.16346.

[61] Botteron C, Briand D, Mishra B, Tasselli G, Janphuang P, Haug F-J, Skrivervik A, Lockhart R, Robert C, Rooij NF de, Farine P-A. A low-cost UWB sensor node powered by a piezoelectric harvester or solar cells. Sensors and Actuators A: Physical 2016;239:127–36. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.01.011.

[62] Zheng K, Zhang Y, Chen B, Dong Y, Li T, Wang Y. Design of a WSN System for Condition Monitoring of the Mechanical Equipment with Energy Harvesting. INTERNATIONAL

JOURNAL OF ONLINE ENGINEERING 2015;11:43–8. https://doi.org/10.3991/ijoe.v11i2.4366.

[63] Avlani S, Seo D-H, Chatterjee B, Sen S. EICO: Energy-Harvesting Long-Range Environmental Sensor Nodes With Energy-Information Dynamic Co-Optimization. IEEE Internet of Things Journal 2022;9:20932–44. https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3178422.

[64] Kang S, Kim J, Yang S, Yun T, Kim H. Electric field energy harvesting under actual three-phase 765 kV power transmission lines for wireless sensor node. ELECTRONICS LETTERS 2017;53:1134–5. https://doi.org/10.1049/el.2017.1794.

[65] Kamenar E, Zelenika S, Blazevic D, Macesic S, Gregov G, Markovic K, Glazar V. Harvesting of river flow energy for wireless sensor network technology. MICROSYSTEM TECHNOLOGIES-MICRO-AND NANOSYSTEMS-INFORMATION STORAGE AND PROCESSING SYSTEMS 2016;22:1557–74. https://doi.org/10.1007/s00542-015-2778-y.

[66] Tran TV, Chung W-Y. IEEE-802.15.4-based low-power body sensor node with RF energy harvester. BIO-MEDICAL MATERIALS AND ENGINEERING 2014;24:3503–10. https://doi.org/10.3233/BME-141176.

[67] Xiao X, Mu B, Cao G. Light-Energy-Harvested Flexible Wireless Temperature-Sensing Patch for Food Cold Storage. ACS Applied Electronic Materials 2021;3:3015–22. https://doi.org/10.1021/acsaelm.1c00251.

[68] Joshi R, Zhu J. Ambient energy harvester design for a wireless sensor network. 2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), 2015, p. 246–50. https://doi.org/10.1109/EIT.2015.7293347.

[69] Ávila BYL, Vázquez CAG, Baluja OP, Alexandru M, Cotfas DT, Cotfas PA, Domínguez LAQ. Protothread and Cooperative Multitasking Scheduler on the Arduino Framework. 2024 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2024, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/ICATE62934.2024.10749444.

[70] Ávila BYL, Vázquez CAG, Baluja OP, Cotfas DT, Cotfas PA. Comprehensive electrical models for a wireless sensor network device. Heliyon 2024;10. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40415.

[71] Li J, Zhou HY, Zuo DC, Hou KM, Xie HP, Zhou P. Energy Consumption Evaluation for Wireless Sensor Network Nodes Based on Queuing Petri Net. International Journal of Distributed Sensor Networks 2014;10:262848. https://doi.org/10.1155/2014/262848.

[72] Ávila BYL, Vázquez CAG, Baluja OP, Domínguez LAQ, Cotfas DT, Cotfas PA. Integration of a Sink Node and Django Platform for Solar-Powered Battery-Free Wsns: Enabling Ip Connectivity and Cloud Data Management. 2025 IEEE 31st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2025, p. 55–60. https://doi.org/10.1109/SIITME67657.2025.11293525.

[73] Django. Django Project n.d. https://www.djangoproject.com/ (accessed June 24, 2025).

[74] León Ávila BY, García Vázquez CA, Pérez Baluja O, Domínguez LAQ, Cotfas DT, Cotfas PA. Experiences in PCB manufacturing with ultra-lowcost and home-made CNC machine. 2024 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2024, p. 1–7. https://doi.org/10.1109/ECAI61503.2024.10607422.

[75] Beck HE, Zimmermann NE, McVicar TR, Vergopolan N, Berg A, Wood EF. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Sci Data 2018;5:180214. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214.

[76] Schroedter-Homscheidt M, Azam M, Azam J, Hanrieder N, Lefèvre M, Saboret L, Saint-Drenan, Y-M. Surface solar irradiation retrieval from MSG/SEVIRI based on APOLLO Next Generation and HELIOSAT-4 methods 2022. https://doi.org/10.1127/metz/2022/1132.

[77] Dobreva P, van Dyk EE, Vorster FJ. Irradiance and temperature corrections of current-voltage curves—Quintessential nature and implications. Solar Energy 2021;227:116–25. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.057.

[78] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Biavati G, Horányi A, Muñoz Sabater J, Nicolas, J, Peubey C, Radu R, Rozum I, Schepers D, Simmons, A, Soci, C, Dee D, Thépaut J-N. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present 2018. https://doi.org/10.24381/CDS.ADBB2D47.

[79] Prauzek M, Krömer P, Mikus M, Konecny J. Adaptive energy management strategy for solar energy harvesting IoT nodes by evolutionary fuzzy rules. Internet of Things 2024;26:101197. https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101197.