



Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii  
Informaționale

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

## **-REZUMAT-**

**Sisteme de monitorizare și predicție a resursei  
solare pentru rețele microgrid bazate pe energie  
regenerabilă**

**Student-doctorand:**

**Ing. Ioan-Vladimir VOICU**

**Conducător științific:**

**Prof. Dr. Ing. Dorin PETREUȘ**

**- Cluj-Napoca -  
2026**





## INTRODUCERE

Energia solară reprezintă una dintre cele mai promițătoare surse de energie regenerabilă. Soarele oferă o resursă inepuizabilă, capabilă să susțină cerințele energetice ale societății moderne, aflate într-o creștere accelerată. În contextul actual, marcat de poluare, schimbări climatice și necesitatea reducerii dependenței de combustibili fosili, interesul pentru energia regenerabilă a crescut semnificativ, iar energia solară ocupă un loc central în tranziția energetică globală.

Abundența radiației solare, scalabilitatea tehnologiilor fotovoltaice (PV) și potențialul de integrare în rețele electrice de tip smart grid transformă energia solară într-o resursă importantă. Sistemele fotovoltaice moderne, construite din celule solare conectate în module și panouri, pot alimenta de la locuințe individuale până la aplicații industriale și rețele naționale, fiind integrate în micrețele, clădiri inteligente sau infrastructuri energetice distribuite.

Cu toate acestea, natura intermitentă și variabilă a radiației solare, influențată de factori precum norii, condițiile atmosferice, poluarea sau poziția soarelui, impune o monitorizare precisă și o capacitate ridicată de prognoză a resursei solare. Măsurarea fiabilă a radiației solare globale pe orizontală (GHI) este esențială pentru dimensionarea corectă a sistemelor PV, pentru optimizarea producției și pentru integrarea eficientă a acestora în rețelele de distribuție.

În acest cadru, sistemele de achiziție de date (DAQ) joacă un rol important. Ele permit colectarea, stocarea și analiza continuă a parametrilor de radiație solară, temperatură, curent, tensiune, putere, oferind o imagine detaliată și în timp real asupra performanței instalațiilor PV. Astfel, teza propune dezvoltarea unei arhitecturi scalabile de monitorizare și prognoză a resursei solare, menită să sprijine integrarea energiei fotovoltaice în micrețele și să permită multiplicarea sistemului într-o rețea distribuită de măsurători terestre. Sunt investigate atât metode de măsurare de înaltă precizie (cu piranometru), cât și soluții mai accesibile, pentru a permite extinderea sistemului, cu costuri reduse și acoperire largă.

Studiul 1 (Capitolul 4) descrie dezvoltarea sistemului inițial de achiziție de date pentru măsurarea radiației solare, pornind de la un piranometru Kipp & Zonen, conectat la un microcomputer Raspberry Pi. Acesta transmite datele de iradianță și temperatură către un server (VM) care găzduiește o bază de date pentru serii de timp (InfluxDB) și o

soluție de vizualizare web, Grafana. Împreună, aceste componente formează un sistem open-source, replicabil, destinat monitorizării continue a resursei solare.

Studiul 2 (Capitolul 5) prezintă în prima parte o soluție software, care utilizează măsurătorile de radiație globală orizontală (GHI) pentru a determina radiația pe planul panoului (POA) și a estima producția de energie fotovoltaică. Estimarea este realizată cu ajutorul librăriei open-source PVLib, iar sistemul permite ajustarea dinamică a parametrilor în timp real prin intermediul platformei Grafana. În cea de-a doua parte, este abordată analiza și prognoza GHI prin implementarea unui model ARIMA, pe termen scurt, într-un cadru interpretabil și validat statistic.

Studiul 3 (Capitolul 6) propune o metodă alternativă de măsurare a radiației solare GHI, prin utilizarea unui panou fotovoltaic de dimensiuni reduse, conectat la un senzor de curent. Curentul electric generat este folosit în raport cu valorile furnizate de un piranometru de referință, pentru calibrare cu ajutorul unei rețele neuronale artificiale (ANN). Acest demers oferă o soluție replicabilă, cu cost redus, pentru estimarea GHI, contribuind la extinderea posibilităților de implementare a unor rețele de senzori pentru măsurarea GHI.

Studiul 4 (Capitolul 7) extinde sistemul anterior prin integrarea unei camere cu lentilă fisheye, care permite extragerea altor parametri din analiza vizuală a cerului. Informațiile extrase din imaginile captate sunt utilizate pentru antrenarea unui model de tip Long Short-Term Memory (LSTM), capabil să anticipeze variațiile rapide ale radiației GHI. Această abordare este importantă în contextul microrețelelor, unde este necesară o adaptare rapidă la schimbările atmosferice pentru a menține stabilitatea energetică.

Studiul 5 (Capitolul 8) este axat pe securizarea sistemului prin implementarea soluției Keycloak, destinată autentificării și autorizării accesului la setul de date colectate. Această integrare asigură interoperabilitatea cu platforma de vizualizare Grafana. Astfel, se creează premisele extinderii sistemului într-o rețea distribuită și securizată de monitorizare a resursei solare.

Teza își propune să contribuie la domeniul energiei regenerabile printr-o abordare integrată, ce combină instrumente de măsurare, tehnologii de procesare a datelor și metode de prognoză, orientate spre îmbunătățirea integrării energiei solare în rețelele electrice moderne.

Utilizarea unor soluții cu cost redus crează premisele dezvoltării unor rețele terestre de măsurători a GHI, în sprijinul managementului microrețelelor inteligente.

## 5. Implementarea unui sistem de achiziție și vizualizare a datelor de radiație solară

Capitolul prezintă dezvoltarea și implementarea unui sistem complet de achiziție și procesare a datelor de radiație solară și temperatură, având ca scop principal monitorizarea radiației pentru panourile fotovoltaice și analiza impactului acestora asupra rețelelor electrice, în special în contextul microrețelelor. Sistemul este construit exclusiv cu soluții hardware și software open-source, fiind ușor de replicat, întreținut și scalat. Componenta principală a sistemului este un Raspberry Pi conectat la un piranometru Kipp & Zonen clasă C, amplasat lângă panouri fotovoltaice, în cadrul infrastructurii experimentale de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

Datele de radiație globală orizontală (GHI) și temperatură sunt colectate continuu și transmise către o bază de date pentru serii de timp (InfluxDB), fiind vizualizate în timp real prin interfața Grafana. Această arhitectură asigură un cadru flexibil de analiză, atât în timp real cât și istoric, pentru diverse scopuri operaționale și de cercetare. Începând cu anul 2024, sistemul a fost optimizat pentru a colecta date la o rezoluție de o secundă, pe lângă rezoluția standard de un minut folosită anterior. Această îmbunătățire permite detectarea rapidă a perturbațiilor de radiație solară, cum ar fi trecerea norilor, care pot afecta performanța instalațiilor fotovoltaice și pot genera instabilități în rețea.

În plus față de măsurătorile directe, sistemul integrează un model matematic pentru estimarea radiației solare în condiții de cer senin (GHI\_CS), pe baza modelului Ineichen-Perez, implementat cu ajutorul bibliotecii PVLib. Compararea valorilor GHI măsurate cu GHI\_CS permite identificarea rapidă a momentelor cu cer acoperit și evaluarea performanței panourilor în condiții variabile. Această comparație oferă o bază solidă pentru dezvoltarea de coeficienți de conversie între radiație și puterea electrică produsă, utile în estimările de producție energetică.

Datele istorice colectate între 2018 și 2024 au fost analizate pentru a extrage informații despre comportamentul resursei solare în diferite condiții meteorologice și perioade ale anului. Reprezentările grafice sub formă de heatmap au fost utilizate pentru a vizualiza distribuția valorilor GHI și GHI\_CS pe parcursul anului, evidențiind tendințele sezoniere, perioadele cu variabilitate ridicată și momentele critice pentru funcționarea optimă a rețelelor cu surse regenerabile.

Aceste vizualizări ajută atât la validarea modelelor de predicție, cât și la planificarea operațională a microrețelelor.

Coeficientul de conversie între GHI și puterea produsă, notat cu  $\alpha$ , a fost calculat pe baza datelor din 2017 și analizat pentru a observa variația sa sezonieră. Rezultatele arată că valoarea acestuia variază între 1,9 în lunile de vară și 2,9 în cele de iarnă, cu o medie anuală de 2,36. Acest coeficient poate fi utilizat pentru estimări preliminare de producție fotovoltaică și pentru dimensionarea sistemelor de energie solară.

Analiza spectrală a datelor de înaltă rezoluție a fost realizată folosind transformata Fourier rapidă (FFT) și scalarea Kolmogorov 5/3, cu scopul de a cuantifica energia asociată fluctuațiilor rapide ale radiației solare. Energia spectrală din banda de frecvență 0,1–0,5 Hz, asociată cu evenimente de tip rampă, oferă o măsură a potențialului perturbator al acestor variații și poate fi folosită pentru proiectarea strategiilor de control în microrețele, cum ar fi ajustarea încărcărilor sau activarea sistemelor de stocare.

Implementarea sistemului open-source permite și facilități suplimentare, precum exportul datelor în format CSV pentru analize ulterioare sau integrarea în aplicații externe. Sistemul este capabil să susțină scenarii de disponibilitate ridicată, prin replicarea bazei de date și backup-uri automate. Prin această infrastructură, se obține o platformă robustă, eficientă și accesibilă, capabilă să furnizeze date de înaltă calitate pentru analiza radiației solare și estimarea producției PV, cu aplicații practice în cercetare, dezvoltare și operarea rețelelor inteligente.

În concluzie, acest capitol demonstrează că un sistem construit din componente accesibile și software open-source poate asigura monitorizarea precisă și în timp real a radiației solare, oferind date esențiale pentru analiza performanței fotovoltaice și pentru gestionarea inteligentă a microrețelelor. Platforma este scalabilă, ușor de replicat în alte locații, și poate contribui semnificativ la optimizarea integrării energiei regenerabile în sistemele energetice moderne.

## **6. Estimarea în timp real a producției de energie fotovoltaică folosind GHI**

Studiul al doilea (Capitolul 5) prezintă dezvoltarea și testarea unei soluții open-source și cu costuri reduse pentru estimarea în timp

real a producției de energie fotovoltaică (PV), folosind măsurători locale de radiație solară globală orizontală (GHI). Sistemul se bazează pe un piranometru conectat la un Raspberry Pi 5, care achiziționează date la frecvență mare (1 Hz) și le stochează într-o bază de date InfluxDB, oferind în același timp o interfață de vizualizare și configurare în timp real prin Grafana.

Metodologia se bazează pe transformarea valorilor de GHI în radiație pe planul modulului fotovoltaic (POA), folosind modele standard de descompunere și transpunere a radiației, cum ar fi ERBS și Hay-Davies. Aceste modele permit obținerea celor trei componente ale radiației incidente pe panou (directă, difuză și reflectată), care sunt apoi folosite pentru estimarea producției electrice. Parametrii sistemului fotovoltaic, cum ar fi unghiul de înclinare, azimutul, numărul de panouri, puterea nominală și coeficientul de temperatură, pot fi ajustați în timp real pentru a reflecta configurația reală a instalației.

Un aspect important al studiului este utilizarea datelor la rezoluție înaltă (1 Hz), care permit captarea variațiilor rapide ale radiației solare cauzate de trecerea norilor, cunoscute sub numele de „evenimente tip rampă”. Analiza comparativă a datelor la 1 minut și 1 Hz arată că, la rezoluție joasă, aceste evenimente sunt semnificativ subestimate sau chiar omise, ceea ce afectează negativ precizia prognozelor și a estimărilor de producție. Spre exemplu, într-o zi analizată, la 1 Hz au fost identificate peste 770 de evenimente rampă, în timp ce la 1 minut doar 156, confirmând importanța eșantionării fine în aplicații de control și operare în microrețele.

Pentru prognoza pe termen scurt a GHI, autorii au folosit modele autoregresive integrate de medie mobilă (ARIMA), calibrate special pentru detecția rampelor. Modelul a fost testat pe mai multe orizonturi de prognoză (5, 15, 30, 60 minute). Performanța a fost măsurată prin indicatori standard: eroarea absolută medie (MAE), eroarea pătratică medie (RMSE) și coeficientul de determinare ( $R^2$ ). S-a observat că pentru prognoze scurte (5–15 minute), modelul oferă rezultate bune (ex.  $R^2 = 0,92$  la 5 minute), dar precizia scade treptat pentru orizonturi mai lungi, ajungând la  $R^2 = 0,81$  pentru 60 de minute. Această degradare a performanței se explică prin complexitatea și imprevizibilitatea variațiilor de radiație solară pe termen lung.

Analiza spectrală a datelor (prin FFT și densitatea spectrală a puterii, Power Spectral Density - PSD) confirmă faptul că energia asociată rampelor este concentrată în banda de frecvențe 0,1–0,5 Hz, ceea ce justifică alegerea rezoluției de 1 Hz pentru monitorizarea și

prognoza acestora. Acest tip de analiză este crucial pentru operatorii de microrețele, deoarece permite luarea de decizii rapide privind echilibrarea rețelei, controlul invertoarelor și managementul stocării energiei.

În concluzie, studiul demonstrează că o soluție simplă, bazată pe hardware accesibil și software open-source, poate oferi o estimare fiabilă a producției fotovoltaice în timp real, fără a depinde de infrastructură cloud sau echipamente comerciale costisitoare. Acest cadru este ideal pentru aplicații de cercetare, educație și operare a microrețelelor, oferind un model scalabil, replicabil și ușor de întreținut. În plus, studiul sugerează că integrarea unor metode de învățare automată, precum LSTM, ar putea duce la o creștere semnificativă a preciziei în prognoze mai complexe, în special în medii cu variabilitate atmosferică ridicată.

## **7. Metode pentru estimarea radiației solare GHI folosind panouri fotovoltaice miniaturale și rețele neuronale**

Capitolul 6 descrie dezvoltarea unui sistem IoT low-cost pentru estimarea radiației solare globale (GHI), utilizând panouri fotovoltaice miniaturizate și senzori de curent și tensiune INA219, împreună cu senzori ambientali BME280 pentru măsurători de temperatură, umiditate și presiune. Scopul principal este oferirea unei alternative accesibile la piranometrele profesionale, care sunt costisitoare și greu scalabile pentru implementări pe scară largă sau în rețele distribuite.

Sistemul colectează date în timp real, cu o rezoluție de 1 minut, de curent generat de la panouri, și condițiile ambientale, pe care le combină cu modele numerice open-source pentru condiții de cer senin (folosind biblioteca PVLlib și modelul Ineichen) pentru a estima radiația solară. Estimarea se bazează pe un model de inteligență artificială, concret o rețea neuronală artificială (ANN), antrenată inițial cu date dintr-un sit A în perioada septembrie 2024 - aprilie 2025.

Modelul ANN1 folosește ca intrări curentul fotovoltaic și temperatura pentru a estima GHI în condiții de cer senin. Un al doilea model (ANN2), preia estimările ANN1 și le corectează pe baza datelor reale colectate de la un sit B, inclusiv măsurători efectuate cu un piranometru de referință. Această arhitectură în două etape permite

ajustarea și calibrarea modelului pentru a ține cont de factori locali, cum ar fi microclimatul.

Testele inițiale în laborator au confirmat funcționarea corectă a senzorilor și a sistemului de colectare date, iar instalarea în exterior a permis obținerea unor seturi complete de date reale pentru antrenarea și validarea modelelor. Analize statistice, precum corelația Pearson și interpretarea SHAP, au evidențiat faptul că curentul generat de panouri și temperatura ambientală sunt variabilele cele mai relevante pentru estimarea GHI, în timp ce alți parametri, precum unghiul zenital solar (SZA), deși influenți, au fost excluși pentru a evita suprapotrivirea și redundanța datelor.

Evaluarea performanței modelelor a arătat că ANN1 funcționează bine în condiții de cer senin, însă prezintă erori mai mari în situații meteorologice variabile, cum ar fi cerul parțial înnorat sau cu variații rapide. ANN2 reduce semnificativ aceste erori, obținând o eroare medie absolută sub 10% și bias aproape de zero, ceea ce indică o predicție relative precisă și echilibrată.

Limitările identificate țin de capacitatea redusă a sistemului cu cost redus de a surprinde rapid fenomene meteorologice tranzitorii și de necesitatea recalibrării periodice cu ajutorul unor instrumente de referință. Pentru viitor, se recomandă integrarea unor senzori suplimentari (ex. pentru radiație difuză și directă) și utilizarea unor modele mai sofisticate, cum ar fi rețelele LSTM sau Transformer-e, pentru a îmbunătăți estimarea dinamicii temporale a radiației solare.

În concluzie, studiul validează utilizarea senzorilor low-cost și a modelelor bazate pe machine learning pentru monitorizarea distribuită a radiației solare. Sistemul propus oferă o soluție economică, scalabilă și flexibilă, ce poate fi implementată pe platforme embedded pentru aplicații practice în microrețele, prognoza resurselor solare și educație.

## **8. Soluție cu cost redus pentru prognoza radiației solare pe termen scurt**

Integrarea energiei solare în sistemele inteligente de energie necesită prognoze precise ale radiației solare pentru a gestiona eficient variațiile naturale ale producției fotovoltaice. O soluție modernă o reprezintă platformele edge-based, care colectează și prelucrează datele direct la sursă, reducând dependența de infrastructura cloud și latența, fiind ideale pentru locații izolate sau cu resurse limitate.

O analiză sistematică a literaturii din 2011-2020 arată că majoritatea studiilor utilizează metode statistice clasice pentru prognoza radiației, dar tendința se îndreaptă către învățarea automată (Machine Learning). Datele provin în principal din imagini all-sky (capturate cu camere fisheye) și senzori meteorologici, iar metodele de procesare includ tehnici de computer vision pentru urmărirea norilor.

Un studiu recent propune un model empiric care corelează luminanța relativă extrasă din imagini all-sky cu măsurătorile de radiație solară, obținând performanțe superioare metodelor tradiționale în captarea variațiilor rapide. O soluție open source, bazată pe un model hibrid CNN-LSTM antrenat cu imagini și date istorice GHI, oferă prognoze pe termen foarte scurt (15 minute) cu erori semnificativ mai mici față de metodele clasice.

În acest context, s-a dezvoltat o platformă low-cost, construită pe baza unui Raspberry Pi 5 echipat cu o cameră HQ fisheye și un panou fotovoltaic miniatural conectat la un senzor INA219 pentru măsurarea curentului. Sistemul include și senzori de mediu (temperatură, umiditate, presiune) și extrage caracteristici simple din imagini, precum luminanța mediată, pentru a aproxima condițiile cerului.

Datele colectate sunt corelate și folosite pentru antrenarea unei rețele neuronale LSTM, capabile să ofere prognoze pe termen scurt (5, 10, 15 și 30 minute) ale radiației globale orizontale (GHI). Alimentarea prin PoE asigură funcționarea continuă, iar puterea de procesare a Raspberry Pi permite analiza și predicția în timp real.

Sistemul este modular, scalabil și utilizează un server central cu InfluxDB pentru stocarea datelor, accesibile prin Grafana, facilitând monitorizarea și analiza parametrilor în timp real. Imaginile sunt captate cu o cameră cu senzor Sony IMX477 și lentilă fisheye, oferind o acoperire hemisferică a cerului.

Pentru analiza imaginilor, se extrag caracteristici spectrale și luminoase (raporturi roșu/albastru, luminanță, saturație), iar prin aplicarea unor tehnici de procesare (thresholding și mască binară) se izolează cerul senin de zonele norate sau obstructionate. Aceste caracteristici sunt corelate statistic cu măsurătorile reale de radiație și condițiile meteorologice folosind coeficientul Pearson, pentru a identifica variabilele cu relevanță mare în predicția GHI.

Modelul LSTM antrenat utilizează aceste date multimodale (parametri meteo, măsurători panou PV și caracteristici imagini) pentru a prognoza GHI derivat pe intervale scurte, captând variațiile rapide cauzate de trecerea norilor. Performanța modelului a fost evaluată prin

indicatori statistici precum RMSE și MAE, demonstrând acuratețe suficientă pentru aplicabilitate în rețele inteligente sau micro-rețele fotovoltaice.

Această abordare oferă o alternativă eficientă, economică și scalabilă față de metodele tradiționale, reducând costurile și necesarul de infrastructură, facilitând implementarea pe dispozitive edge precum Raspberry Pi.

## **9. Accesul securizat la datele obținute în Grafana prin Keycloak: Implementare și Discuții**

Studiul detaliază implementarea și beneficiile unei soluții bazate pe Keycloak pentru autentificare unică (SSO) și managementul identității și accesului (IAM), cu accent pe înalta disponibilitate și scalabilitate. Prin utilizarea HAProxy în combinație cu clustering-ul Keycloak și Infinispan, s-a demonstrat că este posibilă menținerea continuității serviciilor chiar și în scenarii de failover, asigurând atât replicarea stării utilizatorilor, cât și afinitatea sesiunii. Aceasta minimizează impactul întreruperilor asupra experienței finale a utilizatorului.

Integrarea cu federația eduGAIN reprezintă un pas important în facilitarea colaborării europene, permițând acces securizat și controlat al utilizatorilor din instituții diferite la serviciile locale. Totuși, această integrare necesită o configurare riguroasă a atributelor și o monitorizare continuă a fluxurilor de autentificare pentru a menține conformitatea cu standardele federației. Testele efectuate pentru eliberarea atributelor și interfederație au confirmat respectarea cerințelor standardizate, iar extinderea către alte federații va necesita verificări suplimentare.

Capitolul evidențiază și flexibilitatea Keycloak prin integrarea aplicațiilor externe compatibile OIDC, exemplificate prin Grafana și GitLab, care pot astfel utiliza Keycloak pentru autentificare și autorizare fără a stoca local credentialele utilizatorilor. Aceasta asigură o gestionare centralizată a accesului și crește securitatea infrastructurii.

Pe termen lung, soluția poate fi extinsă prin implementarea OAuth2 cu JSON Web Tokens (JWT), care ar permite aplicațiilor să valideze direct token-uri standardizate, reducând încărcarea serverelor Keycloak și scăzând latența autentificării. Această metodă ar îmbunătăți

semnificativ performanța și scalabilitatea sistemului, facilitând integrarea rapidă a noilor aplicații și servicii.

Experiența practică subliniază importanța unei administrări proactive a infrastructurii Keycloak, incluzând monitorizarea constantă a performanței, aplicarea actualizărilor regulate și efectuarea testelor de failover. O gestionare corectă a clusterelor și a HAProxy este vitală pentru evitarea problemelor legate de scalabilitate și pentru menținerea unei experiențe utilizator fluide și neîntrerupte.

În concluzie, arhitectura prezentată demonstrează faptul că Keycloak oferă un cadru solid, flexibil și scalabil pentru autentificare și autorizare, combinând funcționalități avansate precum SSO, fluxuri condiționate post-login, integrare cu eduGAIN și suport OIDC, cu potențial de extindere prin JWT și integrarea rapidă a serviciilor externe. Aceasta asigură un control detaliat asupra accesului și o protecție sporită a datelor utilizatorilor.

De asemenea, se prevede extinderea mecanismelor de autentificare pentru a permite și dispozitivelor IoT, precum senzorii, să transmită date semnate și autentificate prin JWT, extinzând astfel securitatea autentificării dincolo de utilizatorii tradiționali.

## 10. Discuții generale

Rezultatele obținute în cadrul acestei teze demonstrează fezabilitatea și utilitatea unei abordări integrate, bazate pe soluții hardware și software open-source, pentru monitorizarea și prognoza resurselor solare. Sistemul propus, construit pe platforma Raspberry Pi și echipat cu senzori low-cost, a dovedit că poate furniza date relevante pentru estimarea radiației solare globale (GHI), precum și pentru prognoza pe termen scurt a producției de energie fotovoltaică.

Comparativ cu soluțiile comerciale consacrate, sistemul dezvoltat prezintă o serie de avantaje clare: costuri reduse, flexibilitate ridicată în configurare și posibilitatea de extindere sau adaptare la diferite scenarii de microrețele și aplicații de cercetare. Utilizarea componentelor software open-source (InfluxDB, Grafana, PVLlib, Keycloak) a permis atât reducerea costurilor de licențiere, cât și crearea unui cadru transparent și reproductibil, ceea ce reprezintă un beneficiu semnificativ pentru comunitatea academică și pentru inițiativele din mediile cu resurse limitate.

Integrarea unui panou fotovoltaic de mică putere ca senzor solar alternativ, calibrat prin rețele neuronale artificiale, a demonstrat că măsurători indirecte pot substitui parțial instrumentele dedicate, fără a compromite semnificativ precizia rezultatelor. Această abordare deschide direcții interesante de cercetare pentru dezvoltarea unor rețele distribuite de micro-senzori solari, utile în aplicații precum prognoza la nivel local, managementul microrețelelor sau studiul variabilității radiației.

În ceea ce privește partea de prognoză, utilizarea modelelor ARIMA a oferit o bază de comparație solidă, în timp ce modelele avansate de tip LSTM, antrenate pe seturi multimodale (date meteorologice, curenți PV, imagini all-sky), au evidențiat potențialul algoritmilor de inteligență artificială pentru anticiparea evenimentelor de tip rampă. Aceste rezultate subliniază importanța abordărilor hibride, care combină simplitatea metodelor statistice cu puterea predictivă a modelelor de deep learning.

Totuși, sistemul dezvoltat nu este lipsit de limitări. Variabilitatea condițiilor atmosferice și prezența datelor lipsă în anumite perioade au influențat acuratețea estimărilor. De asemenea, resursele hardware ale platformei Raspberry Pi, deși suficiente pentru colectarea și procesarea

datelor în timp real, pot reprezenta o constrângere pentru modele complexe sau scenarii de analiză intensivă.

Cu toate acestea, rezultatele obținute confirmă ipoteza de lucru și susțin ideea că soluțiile low-cost și open-source pot contribui semnificativ la “democratizarea” accesului la tehnologii avansate de monitorizare și prognoză solară. Într-un context global marcat de tranziția către surse regenerabile și de necesitatea gestionării integrate a resurselor energetice, astfel de sisteme pot reprezenta un instrument valoros atât pentru cercetare, cât și pentru aplicații practice în microrețele și comunități izolate.

## 10. Concluzii finale

### 10.1. Concluzii generale

Lucrarea de față a avut ca obiectiv principal dezvoltarea și validarea unui cadru complet, integrat și low-cost pentru achiziția, analiza și prognoza resursei solare și implicit a producției de energie fotovoltaică pentru rețelele microgrid. Prin utilizarea unor microcomputere Raspberry Pi, a unor senzori (piranometru, INA219, BME280, cameră fisheye) și a unor instrumente software open-source (InfluxDB, Grafana, PVLib, Keycloak), a fost demonstrată posibilitatea obținerii unei platforme robuste, scalabile și eficiente, capabile să răspundă cerințelor actuale ale tranziției energetice.

Principalele concluzii pot fi sintetizate astfel:

Integrarea hardware-software low-cost este viabilă și performantă. Experimentele au arătat că un sistem bazat pe Raspberry Pi, configurat cu senzori de radiație și parametri meteorologici, poate furniza date de calitate suficientă pentru monitorizarea și prognoza energiei solare. Compararea cu echipamente de referință a demonstrat că soluția propusă poate atinge performanțe comparabile, cu un raport cost/beneficiu semnificativ superior.

Măsurarea și estimarea resurselor solare pot fi realizate prin metode hibride. În lucrare s-a demonstrat că radiația globală orizontală (GHI) poate fi estimată și prin metode alternative cu un piranometru, utilizând un panou PV de 0,3 W și senzorul INA219. Acest tip de senzor virtual, calibrat prin rețele neuronale artificiale, poate constitui o soluție economică pentru aplicații distribuite sau pentru amplasarea fizică acolo unde nu există infrastructură.

Prognoza solară necesită o combinație de metode tradiționale și avansate. Modelele statistice (ARIMA) s-au dovedit utile pentru predicția pe termen scurt în condiții relativ stabile, însă nu pot surprinde în mod perfect evenimentele bruște. Integrarea algoritmilor de tip rețea neuronală recurentă (LSTM), alimentați cu date multimodale (curent PV, condiții meteorologice), a evidențiat o îmbunătățire substanțială în prognoza rampelor de radiație.

Baza de date temporală și vizualizarea interactivă adaugă valoare sistemului. Utilizarea InfluxDB pentru stocarea datelor și Grafana pentru vizualizare permite analiza în timp real și ajustarea

parametrilor în cadrul simulărilor și experimentelor, transformând platforma într-un instrument atât de cercetare, cât și operațional.

Securitatea și scalabilitatea sunt esențiale pentru implementarea practică. Integrarea Keycloak pentru autentificare și controlul accesului confirmă posibilitatea extinderii sistemului către rețele distribuite și colaborative, un pas important pentru adoptarea pe scară largă în microrețele.

Lucrarea propune o arhitectură complet integrată și open-source. Originalitatea constă în reunirea într-un singur cadru a tuturor componentelor hardware, software și metodologice, creând o soluție accesibilă și replicabilă, ce poate fi utilizată în scopuri educaționale, de cercetare sau industriale.

În ansamblu, rezultatele confirmă ipoteza de bază: sistemele low-cost, dacă sunt proiectate și calibrate corespunzător, pot susține atât monitorizarea în timp real, cât și prognoza avansată a resurselor solare. Mai mult, acestea pot asista semnificativ dezvoltarea microrețelelor inteligente, prin optimizarea integrării energiei regenerabile, utilizând tehnologii moderne de achiziție și analiză a datelor.

## 10.2. Originalitatea și contribuțiile tezei

Teză propune și validează un cadru integrat pentru monitorizarea și prognoza producției de energie fotovoltaică (PV) utilizând soluții hardware și software low-cost, cu accent pe replicabilitate și flexibilitate. Deși există numeroase studii privind măsurarea radiației solare și prognoza producției PV, combinația abordată aici, senzori fotovoltaici cu cost redus, procesare edge pe Raspberry Pi, modele statistice și de inteligență artificială, precum și vizualizare și securizare open-source, reprezintă un aport distinct în literatura de specialitate.

Principalele elemente care definesc originalitatea tezei includ:

1. Implementarea unui sistem low-cost complet și replicabil, care integrează:
  - Achiziția de date de la un piranometru de referință și un panou PV cu senzor INA219;
  - Preprocesarea și stocarea datelor într-o bază de date open source pentru serii de timp;

- Vizualizarea și interacțiunea cu datele prin Grafana, cu capacitatea de a ajusta parametrii PV în timp real.
- 2. Estimarea și prognoza producției PV în timp real, prin combinarea măsurătorilor GHI cu librăria PVLib pentru calculul radiației pe planul panoului (POA) și utilizarea algoritmilor ARIMA pentru predicții pe termen scurt, adaptate la evenimente de tip rampă.
- 3. Dezvoltarea unei metode accesibile pentru estimarea GHI, utilizând un panou PV de 0,3 W și un model de rețea neuronală artificială (ANN) calibrat cu date de la piranometru, ceea ce oferă o alternativă economică și flexibilă pentru monitorizarea radiației solare.
- 4. Integrarea unui sistem multimodal pentru prognoza iradianței, care combină date de la panou PV, senzor INA219, BME280 și cameră fisheye pentru imagini all-sky, folosit pentru antrenarea unei rețele LSTM destinate prognozei variațiilor rapide ale radiației.
- 5. Asigurarea securității și accesului la date, prin integrarea cu Keycloak, adică cu utilizatori deja existenți, ceea ce permite extinderea sistemului către o arhitectură distribuită pentru colectarea și vizualizarea datelor GHI în condiții sigure.

În concluzie, contribuțiile inovative ale tezei nu constau doar în implementarea fiecărui element individual, ci în combinarea acestora într-un cadru coerent, complet și accesibil, care poate fi utilizat atât în cercetare, cât și în aplicații practice pentru microrețele sau sisteme distribuite cu resurse limitate. Această abordare permite colectarea, procesarea și prognoza datelor solare într-un mod scalabil și adaptabil, demonstrând potențialul tehnologiilor cu cost redus pentru monitorizarea energiei regenerabile.

