

UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI”
DIN IAŞI



CERCETĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA MONITORIZĂRII SISTEMELOR FOTOVOLTAICE

- REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT -

Domeniul de doctorat: Inginerie Electrică

Conducător Științific,

Prof. Univ. Dr. Ing. Radu Olaru

Doctorand,

Ing. Roşu Petru Valentin

Iași, 2026

CERCETĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA MONITORIZĂRII SISTEMELOR FOTOVOLTAICE

Ing. Roșu Petru Valentin

Domeniul Inginerie Electrică

Președinte comisie doctorat:	Prof. univ. dr. ing.
Conducător de doctorat:	Prof. univ. dr. ing. Radu Olaru
Referenți oficiali:	Prof. univ. dr. ing.
	Prof. univ. dr. ing.
	Conf. univ. dr. ing.

Comisia de îndrumare:

Prof. univ. dr. ing. Radu Olaru
Prof. univ. dr. ing. Camelia Petrescu
Conf. dr. ing. Costică Nițucă
S.l. dr. ing. Gabriel Chiriac

CUPRINS

1. STADIUL ACTUAL AL METODELOR ȘI STRATEGIILOR ÎN SISTEME DE MONITORIZARE FOTOVOLTAICE 4/5

1.1. Introducere 7/5

1.2. Prezentare generala a sistemelor de monitorizare fotovoltaice 8/5

1.3. Metode de bază pentru monitorizarea sistemelor fotovoltaice 8/6

1.4. Instrumente moderne utilizate în monitorizarea sistemelor fotovoltaice 8/9

1.5. Controlere și achiziții de date; Metode de transmisie date, stocare și analiză ... 22/9

1.6. Metode de transmisie date, stocare și analiză 23/10

1.7. Oportunități pentru sistemele de monitorizare fotovoltaice 30/13

1.8. Comentarii și recomandări privind sistemele de monitorizare fotovoltaice 34/14

1.9. Realizări actuale de sisteme de monitorizare fotovoltaice 38/17

1.9.1. Sistem de monitorizare fotovoltaic cu modele de predicție a puterii . 38/17

1.9.2. Sisteme de monitorizare fotovoltaice cu controlere PLC 40/19

1.9.3. Sistemul de monitorizare fotovoltaic Solarmon-2.0 ..... 43/20

1.9.4. Sistem de monitorizare fotovoltaică bazat pe comunicații prin linii de alimentare cu energie 44/21

1.10. Concluzii 48/23

2. CERCETĂRI PRIVIND APLICAREA SISTEMULUI KNX LA MONITORIZAREA SISTEMELOR FOTOVOLTAICE 50/25

2.1. Prezentarea sistemului SMART KNX pentru monitorizarea consumului de energie electrică fotovoltaică 50/25

2.1.1. Introducere 50/25

2.1.2. Arhitectura sistemului și metode 54/26

2.1.3. Preluarea parametrilor 56/27

2.1.4. Context tehnologic și alternative de comunicație 58/28

2.1.5. Concluzii la capitol 59/31

3. CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA CONSUMULUI ȘI A FUNCȚIONĂRII SISTEMULUI SMART KNX LA MONITORIZAREA SISTEMELOR FOTOVOLTAICE 66/32

3.1. Identificarea și analiza impactului consumului de energie electrică fără a fi utilizate panouri fotovoltaice sau alte surse adiționale 67/33

3.2. Consumul de energie electrică al casei utilizând producția de energie electrică de la panourile fotovoltaice, fără a avea acumulatori de stocare a surplusului de energie electrică produsă 68/33

3.3. Consumul de energie electrică al casei utilizând panourile fotovoltaice și acumulatori de stocare 70/34

3.4. Maximizarea autoconsumului prin controlul consumatorilor (controlul activ al sarcinilor) 78/38

3.5. Concluzii la capitol 90/47

4. MONITORIZAREA PARAMETRILOR ELECTRICI ȘI TERMICI AI PANOURILOR FOTOVOLTAICE INTEGRATE ÎN FAȚADE VENTILATE 91/47

4.1. Alegerea si testarea sitemului de iluminat pentru simularea radiației solare ... 91/48

4.2. Proiectarea, construcția și testarea simulatorului solar 93/48

4.3. Execuția și testarea simulatorului hibrid PV/ fațadă ventilată 98/52

4.4. Proiectarea sistemului de achiziții date și integrarea lui în sistemul Smart KNX al standului de cercetare 103/54

4.4.1. Senzori si aparate utilizate 103/54

4.4.2. Proiectarea sistemului smart KNX de achiziții date 107/55

4.5. Rezultate experimentale - panouri fotovoltaice integrate în fațadă ventilată . 118/62

4.5.1. Introducere 118/62

4.5.2. Analiza parametrilor termici ai fațadei ventilate și ai panourilor fotovoltaice integrate în fațadă 120/63

4.5.3. Analiza parametrilor electrici 123/65

4.5.4. Analiza puterii electrice versus puterea termică 124/65

4.5.5. Caracteristice ale panourilor fotovoltaice P-V, P-I, I-V 125/66

4.6. Analiza numerică a metodelor de îmbunătățire a eficienței panourilor fotovoltaice termice prin sisteme de răcire activă 127/68

5. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE 132/72

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ 139/78

Actualitatea temei

În ultimii ani, populația urbană și industria și-au arătat interesul pentru generarea de energie fotovoltaică în vederea dezvoltării durabile. Prin urmare, în anii următori se așteaptă o creștere abruptă a sistemelor / instalațiilor fotovoltaice.

Obiectivul unor astfel de tehnologii de monitorizare fotovoltaice este de a preintampina/ sesiza diferite situații nedorite, care pot reduce nivelurile de producție de energie din iradierea solară disponibilă.

S-a raportat că pierderea anuală de energie din cauza umbririi parțiale este de aproximativ 10–20%. În plus, va exista o pierdere de producție asociată cu apariția fiecărei defecțiuni a rețelei. Toate aceste probleme legate de diferite domenii trebuie rezolvate printr-o singură soluție.

Monitorizarea continuă a stării sistemelor fotovoltaice este foarte importantă pentru a detecta cauzele care împiedică performanța dorită.

Scopul şi obiectivele tezei

Din perioada studiilor de licență din cadrul Facultății de Construcții și Instalații din Iași, cercetarea a prezentat un interes semnificativ, dovadă fiind participarea la cercuri științifice. În perioada studiilor de masterat studiul s-a axat tot pe comportamentul panourilor fotovoltaice și al programelor de automatizare, lucrarea finală prezentând "Eficientizarea consumului energetic pentru un complex rezidențial utilizând automate programabile", în cadrul căreia am studiat funcționarea PLC-ului, limbaje de programare, respectiv performabilitatea unei instalații de alimentare cu energie electrică cu panouri fotovoltaice. Întru-cât utilizarea energiei fotovoltaice constituie un domeniu de actualitate aflat în continuă dezvoltare, pe perioada studiilor doctorale am ales să continui cercetarea pe această temă.

Scopul principal al tezei este de a suplimenta cunoștințele în domeniul monitorizării panourilor fotovoltaice și optimizării consumului de energie cu ajutorul sistemelor smart KNX. Sunt utilizate metode și echipamente de măsurare specifice pentru a putea realiza evaluarea teoretică și experimentală a comportamentului panourilor fotovoltaice.

Obiectivele lucrării cuprind următoarele:

- Studiul literaturii de specialitate și prezentarea elementelor componente ale panourilor fotovoltaice și factorilor care afectează producția de energie.
- Prezentarea de instrumente moderne utilizate în monitorizarea sistemelor fotovoltaice.
- Utilizarea sistemului SMART KNX pentru monitorizarea consumului de energie electrică fotovoltaică.

- Studierea modalităților de optimizare a consumului de energie electrică și a funcționării sistemului fotovoltaic.
- Analiza parametrilor termici și electrici ai panourilor fotovoltaice care sunt integrate in fațade ventilate.
- Analiza numerică a modalităților de optimizare a eficienței panourilor fotovoltaice termice prin aplicarea sistemelor de răcire activă.

Structura şi conţinutul tezei

Teza de doctorat este struturată în cinci capitole:

În **Capitolul 1** sunt prezentate pe scurt o serie de informații teoretice ce stau la baza alcătuirii și funcționării panourilor fotovoltaice, respectiv factorii care pot influența buna funcționare a acestora.

Capitolul 2 prezintă cercetări privind aplicarea sistemului KNX la monitorizarea sistemelor fotovoltaice.

În **Capitolul 3** s-au realizat mai multe studii de caz având ca obiectiv principal optimizarea autoconsumului. În primul studiu s-a studiat impactul consumului de energie electrică fără a fi folosite panouri fotovoltaice sau alte surse adiționale. În studiul al II-lea s-au folosit panouri fotovoltaice fără însă a avea acumulatori pentru a stoca surplusul de energie produsă de aceste panouri. Ulterior, în alte două studii s-au adăugat inițial acumulatori de stocare, apoi s-a realizat maximizarea autoconsumului prin controlul consumatorilor.

Capitolul 4 prezintă monitorizarea parametrilor electrici și termici ai panourilor fotovoltaice ce sunt integrate în fațade ventilate, realizând în laborator un stand de cercetare. În acest capitol este selectat și testat sistemul de iluminat pentru simularea radiației solare, se realizează proiectarea, construcția și testarea simulatorului solar, testarea simulatorului hibrid PV/ fațadă ventilată, respectiv proiectarea sistemului de achiziții date și integrarea lui în sistemul Smart KNX al standului de cercetare.

Capitolul cuprinde și o scurtă analiză numerică a metodelor de îmbunătățire a eficienței panourilor fotovoltaice termice prin sisteme de răcire activă.

În **Capitolul 5** sunt concluziile finale și contribuțiile personale aduse în urma realizării acestor studii.

1. STADIUL ACTUAL AL METODELOR ȘI STRATEGIILOR ÎN SISTEME DE MONITORIZARE FOTOVOLTAICE

1.1. Introducere

Sistemele de monitorizare fotovoltaice au scopul de a furniza informații despre potențialul energetic, energia extrasă, analiza temperaturii de funcționare a diferitelor defecțiuni care ar putea apărea și pierderile de energie asociate cu acestea.

Această lucrare prezintă o analiză generală a sistemelor de monitorizare fotovoltaice care acoperă toți factorii importanți și componentele asociate cu acesta.

Sistemele de monitorizare fotovoltaice colectează și analizează un număr de parametri măsurați într-o instalație fotovoltaica pentru a monitoriza și/sau evalua performanțele sale. Pentru a asigura funcționarea fiabilă și stabilă a oricărui sistem fotovoltaic este esențial un sistem de monitorizare eficient. În plus, sistemul de monitorizare ține evidența diferiților indici de producere a energiei electrice și aparițiile defecțiunilor.

Aspectele majore ale sistemelor de monitorizare fotovoltaice sunt: senzorii, controlerul utilizat în sistemele de achiziție de date, metodele de transmitere a datelor și stocarea și analiza datelor.

În cele ce urmează, este prezentată o analiză cuprinzătoare a diferitelor sisteme de monitorizare fotovoltaice. Aceasta include o privire de ansamblu detaliată a tuturor tehnicilor majore de evaluare a monitorizării fotovoltaice în termeni de performanțe relative.

1.2. Prezentare generala a sistemelor de monitorizare fotovoltaice

Schema bloc a sistemului de monitorizare fotovoltaic este prezentată în figura 1.1.. Sistemele de monitorizare fotovoltaice pot fi clasificate ca sisteme de monitorizare la sol sau in spațiu. Componentele majore utilizate în sistemele de la sol sunt senzorii, care măsoară variabilele în timp real în sistemul de monitorizare. Sub acest aspect, sistemele spațiale ar putea fi economice din cauza absenței senzorilor.

Principalele neajunsuri ale sistemelor bazate pe spațiu sunt precizia lor scăzută în estimare și faptul ca sunt foarte afectate de condițiile climatice, ceea ce este în mod clar de nedorit. Prin urmare, în aceasta lucrare vom analiza numai de sistemele de monitorizare fotovoltaic pe teren/sol.

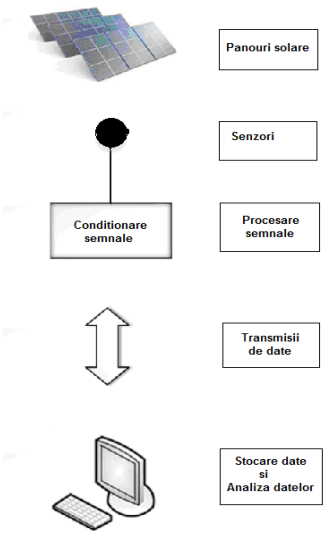


Fig. 1.1. Schema bloc generală a unui sistem de monitorizare fotovoltaic [Matedi2017]

O altă componenta importantă într-un sistem de monitorizare fotovoltaic este unitatea de condiționare a semnalelor.

1.3. Metode de bază pentru monitorizarea sistemelor fotovoltaice

a) Indicatori de performanță utili în monitorizare

Performanța sistemelor fotovoltaice a crescut de la 50% în 1980 până la sistemele actuale, de obicei cu diferite tipuri de sisteme de monitorizare, la o performanță în jur de 80%

Cu toate acestea, performanța completă nu este încă posibilă din cauza mai multor cauze, cum ar fi defecțiunile de încapsulare, crăparea celulelor, praf, zăpadă sau acumulare de murdărie sau creșterea vegetației din jurul modulelor fotovoltaice. Defecțiuni care, dacă sunt detectate, sunt ușor de remediat.

Dintre toți indicatorii de măsurare a performanței sistemelor fotovoltaice, cei mai folosiți sunt randamentul final (R_F), randamentul de referință (R_R) și raportul performanței (RP).

Există diferențe semnificative în RP a sistemelor fotovoltaice în funcție de eficiența celulelor solare, dependența de temperatură a modulului și pierderile de energie din cauza defecțiunilor, umbririi sau prafului, printre altele.

Există mai multe cauze de defecțiune care pot fi rezolvate dacă sunt detectate. Din acest motiv, monitorizarea este cea mai eficientă modalitate de a maximiza RP, minimizând timpul până când defecțiunea este detectată și remediată.

b) Cauze ale defectării modulelor fotovoltaice

Defecțiunile modulelor fotovoltaice, care implică o pierdere a productivității, pot fi cauzate de mai multe motive, cum ar fi:

• *Defecțiuni de coroziune*.
• *Defecțiuni de fisurare a celulelor*.
• *Puncte fierbinți*.
• *Interconexiuni electrice sau mecanice*.
• *Praf*.
• *Umbre parțiale datorate creșterii vegetației*.
• *Degradarea potențială indusă*.

Cauzele de defectare enumerate mai sus implică o scădere a PR al sistemelor fotovoltaice și în plus, unele dintre ele accelerează degradarea modulelor fotovoltaice, scurtând durata de viață a modulelor fotovoltaice.

Alte defecțiuni, cum ar fi acumularea de praf sau umbrele parțiale presupun pierderi considerabile de energie, dar sunt foarte ușor de corectat dacă sunt detectate. ***Din aceste motive, a avea un sistem de monitorizare eficient este vital în sistemele fotovoltaice.***

c) Tehnici și metode de monitorizare a sistemelor fotovoltaice

Cele mai utilizate tehnici de monitorizare a sistemelor fotovoltaice și principalele avantaje și dezavantaje sunt studiate în această secțiune.

Există mai mulți parametri care ar putea fi utili pentru a măsura performanța sistemului fotovoltaic și pentru a monitoriza sistemele, dar de obicei sunt utilizați 4 parametri principali. Acești parametri, care sunt comuni pentru toate sistemele, doi electrici, curent și tensiune, și alți doi de mediu, temperatură și iradiere solară. Acești parametri pot fi măsurați fie la nivel de instalație fotovoltaică, la nivel de șir sau la nivel de modul fotovoltaic (fig. 1.2).

Cu aceste măsuri, trebuie atinse trei obiective principale pentru monitorizarea optimă a sistemului fotovoltaic. Pe de o parte, pentru a estima îmbătrânirea modulelor fotovoltaice, în al doilea rând, pentru a măsura performanța sistemului fotovoltaic și în plus, pentru a detecta într-un mod rapid și fiabil defecțiunile pe care sistemul le poate suferi.

Au fost propuse mai multe metode de măsurare a acestor parametri la nivel de instalație, șir sau matrice de panouri, combinând un model de sistem fotovoltaic (șir sau matrice) cu măsurări de parametri. Unele dintre aceste metode au obținut măsurători din date de la satelit. Scopul acestor abordări este de a detecta cât mai curând posibil defecțiunile sistemului fotovoltaic folosind o rutină automată de detectare a defecțiunilor.

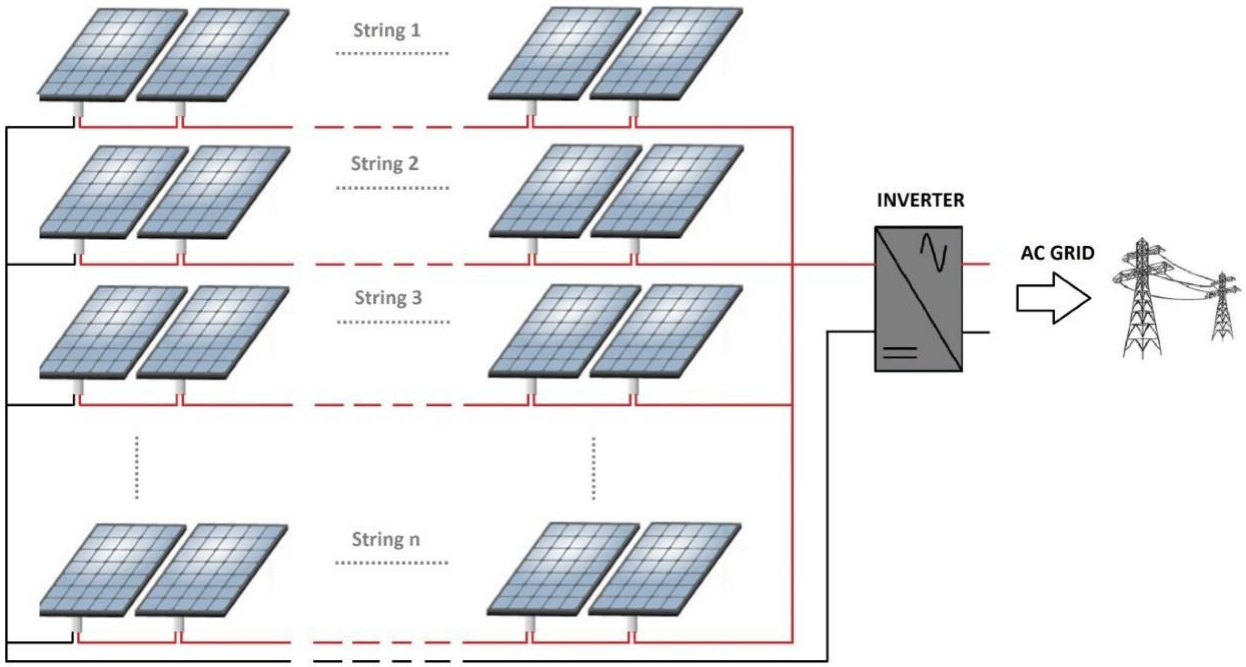


Fig. 1.2. Schema bloc de bază a unui sistem fotovoltaic [Ortega2017]

Metodele de monitorizare la nivel de sistem, șir sau matrice, au avantajul că sunt metode mai ieftine decât metodele de monitorizare la nivelul de modul, dar pe lângă lipsa de precizie, au un alt dezavantaj important: Chiar dacă defectul este detectat, nu există o indicație clară despre modulul sau grupul de module cu defecțiune.

În [Sera2008] este propusă o metodă la nivel de modul bazată pe măsurarea rezistenței în serie, a temperaturii și a puterii de ieșire.

Mulți autori au propus utilizarea rețelelor de senzori (cu fir și fără fir) pentru monitorizarea sistemelor fotovoltaice, implementând mai mulți senzori pe teren pentru măsurarea temperaturii, iradierii, tensiunii și curentului.

A fost propusă, de asemenea, utilizarea imaginilor termice și a vehiculelor aeriene fără pilot. S-a dovedit a fi o metodă utilă pentru detectarea defecțiunilor vizuale, dar nu este suficient de fiabilă ca singură metodă de monitorizare.

Din cele prezentate mai sus, rezultă că monitorizarea sistemelor fotovoltaice este cea mai bună modalitate de a maximiza performanța sistemelor fotovoltaice, cu un efect direct în raportul performanței, RP și disponibilitatea centralelor fotovoltaice.

În mod ideal, pentru a maximiza RP, toate sistemele fotovoltaice ar trebui monitorizate la nivel de modul și în acest fel, chiar și pierderile mai mici de energie vor fi detectate într-un

mod rapid și precis, cu o indicație clară despre care modul sau grup de module este defect și cauza.

În concluzie, cu dispozitivele actuale de monitorizare viabile din punct de vedere economic există aproximativ 20% din pierderi de energie la sistemele fotovoltaice. Pentru a reduce pierderile de energie și a face din energia fotovoltaică o sursă de energie și mai profitabilă și mai eficientă este necesar un nou sistem de monitorizare capabil să detecteze defecțiunile individuale ale modulelor fotovoltaice într-un mod automat, ieftin și eficient.

1.4. Instrumente moderne utilizate în monitorizarea sistemelor fotovoltaice

Instrumentele moderne și performante, care sunt utilizate în sistemul de monitorizare fotovoltaic pentru a măsura cu precizie și acuratețe parametrii, sunt enumerate mai jos [Madeti2017]:

a. Senzori de curent

b. Senzori de tensiune

c. Senzori de radiație solară

d. Senzori de temperatură

e. Senzori de viteză a vântului, anemometre

f. Senzori de umiditate, higrometre

g. Senzori de presiune, barometre

h. Sisteme de achiziție date

i. Instrumente de transmisie date

j. Instrumente de stocare și analiza date

k. Instrumente software.

Există puține studii observate în literatură care descriu criteriile de proiectare pentru dezvoltarea sistemului de monitorizare. Prin urmare, pentru a proiecta un sistem de monitorizare eficient, primul pas este studierea diferitelor soluții propuse de autori pentru propriul sistem.

1.5. Controlere și achiziții de date; Metode de transmisie date, stocare și analiză

Controlerele joacă un rol vital în toate sistemele de monitorizare fotovoltaice și sunt utilizate pentru a gestiona datele de ieșire ale senzorilor. Mulți cercetătorii au folosit microcontrolere, înregistratoare de date (data-logger), carduri achiziție date (DAQ) și module

drept controlere pentru a colecta semnale de la senzori și a digitaliza semnalul pentru stocare, analiză și prezentare pe un personal computer (PC).

În cazul microcontrolerelor, un circuit de interfață este utilizat pentru a măsura ieșirea senzorului. Pentru sistemele digitale de monitorizare și control, parametrii operaționali și metrologici trebuie să fie în formă digitală. Acest lucru necesită un convertor analog-digital (ADC) conectat la ieșirea unei anumite tehnici de detectare.

Pentru sisteme fotovoltaice de dimensiuni mici și cu costuri reduse, un microcontroler cu ADC de 8 biți s-a dovedit a fi suficient în [Mukaro 1997]. Cu toate acestea, pentru sistemele fotovoltaice mari și cu funcționare îndelungată, au fost utilizate microcontrolere mai bune, cum ar fi un ADC pe 10 și 12 biț.

1.6. Metode de transmisie date, stocare și analiză

Procesul de transmitere a datelor este important în sistemele de monitorizare fotovoltaic. Stocarea datelor este, de asemenea, un factor important, deoarece poate fi folosită pentru analiza performanței și referințe viitoare. Prin urmare, mai multe metode legate de stocarea datelor sunt prezentate la punctul 1.6.

a. Metode de transmisie date

Un transfer fizic de date de la un punct la altul printr-un canal adecvat este cunoscut ca *transmisie de date*. Fiecare sistem de comunicație constă dintr-un emițător, un receptor și un canal de transmisie.

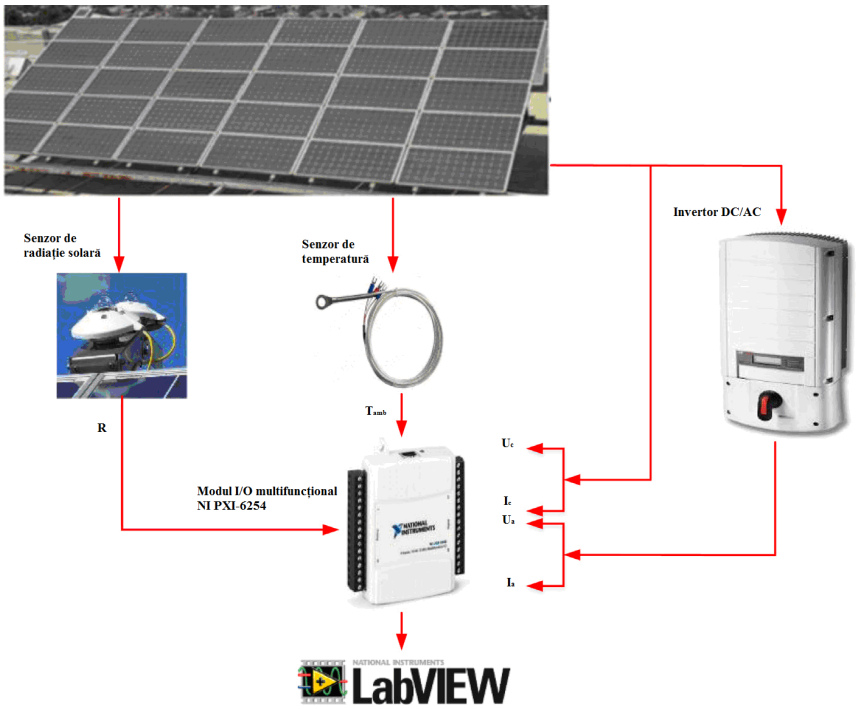


Fig. 1.3. Monitorizare fotovoltaică cu cablu coaxial [Madeti2017]

Unele canale folosite de cercetători pentru a transmite date sunt: (i) comunicația prin cablu, care are două subcategorii, (a) cablu coaxial [Wang2011, Eke2012] și (b) cablu cu fibră optică [Kribus2000, Zidani2012], (ii) comunicare fără fir [Guerriero2014, Tejwani2014,] și (iii) comunicare prin linie de alimentare (PLC) [Di Napoli2014, Jonke2013, Han2014].

Cablul coaxial are rezistență scăzută, rată de eroare scăzută și lățime de bandă bună. Acceptă mai multe canale și diverse servicii inclusiv date, voce, video și multimedia. Fig. 1.3. prezintă exemplul de conectare a cablului coaxial într-un sistem de monitorizare fotovoltaic [Madeti2017].

Un *cablu de fibră optică* este format din fire subțiri de sticlă în arhitectura sa pentru a transporta lumina. Pulsul de lumină trece prin miezul fibrei, ceea ce permite cea mai mare viteză de transmisie a datelor [Indra2015].

O altă opțiune pentru transmiterea datelor este rețeaua de *arie locală fără fir* (Wireless Local Area Networking - WLAN). ARețelele wireless ad-hoc permit comunicarea fără planificare, ceea ce le face mai bune în comparație cu rețelele cu fir.

Serverul de protocol de transfer de fișiere (FTP) este o altă opțiune pentru transmiterea datelor printr-un sistem global pentru modemuri GSM-GPRS (General Packet Radio Service). Poate exista sub formă de card PC sau unitate externă și poate fi conectat printr-un cablu USB, un cablu serial, infraroșu sau Bluetooth (figura 1.4.).

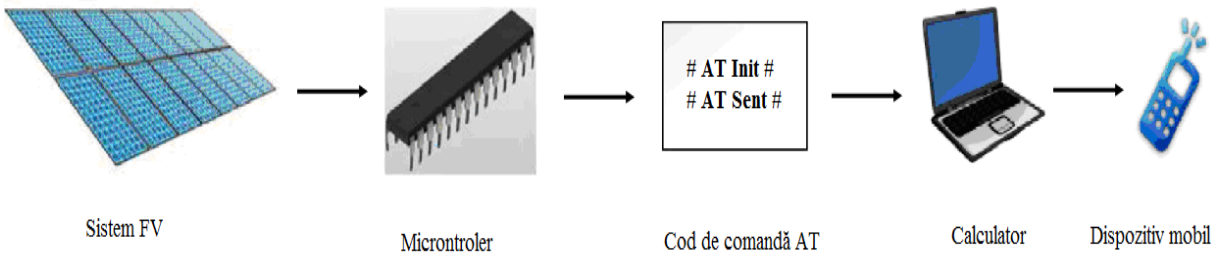


Fig. 1.4. Sistem încorporat cu un emițător de date SMS [Tejwani2014]

b. Metode de stocare date

Stocarea datelor este foarte importantă pentru a efectua orice analiză de performanță. Setul complet de date achiziționate este stocat pe un card Secure Digital (SD). Astfel, datele originale pot fi prevenite de la orice accident. Cardurile SD nu produc interferențe de zgomot și oferă o modalitate ușoară de stocare și urmărire a datelor.

Pentru a capta tensiunea sau curentul în unele aplicații este utilizat un osciloscop cu semnal digital care poate măsura semnalele electrice [Sinton1996]. De asemenea, oferă funcții suplimentare, cum ar fi stocarea și afișarea datelor. Baza de date My Sequel (MySql) poate fi

folosită și pentru a stoca date, care este un sistem de gestionare a bazelor de date. Datele trimise de la modulul GSM sunt trimise la baza de date MySql și afișate ca o pagină de preprocesor de hipertext (PHP) [Ding2009, Al-Ali2010].

c. Metode de analiză a datelor

Analiza datelor este esențială pentru a trage concluziile necesare. Prin urmare, au fost utilizate diferite metode pentru analiza cantitativă a datelor pentru a determina performanța diferitelor configurații ale sistemelor fotovoltaice. Evaluarea performanței energetice a unei centrale fotovoltaice nu este ușoară deoarece funcționarea unei centrale fotovoltaice este afectată de multe variabile. Pentru a evalua performanța generală a unui sistem fotovoltaic, se folosesc norme standard [IEC1998] care sunt reprezentate în termeni de resurse solare, producție de energie și pierderi de sistem, dar au următoarele dezavantaje:

- furnizează informații inexacte despre performanța generală a sistemului fotovoltaic.
- nu permite nici o evaluare a comportamentului pieselor individuale dintr-un sistem fotovoltaic.

Pentru a îmbunătăți caracteristicile software-ului disponibil, a fost propusă o procedură în doi pași în [Vergura2009a]. A fost implementat în Matrix Laboratory (MATLAB) cu statistici avansate.

O altă procedură este descrisă în [Vergura2008], în care informațiile referitoare la populație pot fi extrase chiar și în absența datelor pe întregul an. Această abordare se bazează pe o tehnică bootstrap așa cum este descrisă în [Vergura2009b].

LabVIEW este o interfață grafică cu utilizatorul (GUI), care acceptă achiziția de date, controlul manual și automat al parametrilor sistemului. Pentru a colecta, calcula și analiza datele operaționale și metrologice ale unui sistem fotovoltaic, se folosește LabVIEW care este dezvoltat prin instrument virtual (IV). Un VI a fost dezvoltat cu ajutorul LabVIEW pentru a monitoriza instalația solară fotovoltaică autonomă din Bogota [Forero2006].

O nouă metodă de analiză a datelor care este utilizată pentru a testa sistemele fotovoltaice constă în utilizarea simulării numerice. Se poate realiza folosind Programul de simulare pe computer personal cu accent pe circuit integrat (PSpice) [Castaner2002] și MATLAB [Silvestre2004].

Datele operaționale și metrologice colectate de la instalațiile fotovoltaice pot fi analizate utilizând tehnici de inteligență artificială (IA), cum ar fi rețeaua neuronală artificială (ANN), logica fuzzy, algoritmii genetici (GA) și analiza neuronală fuzzy [Mellit2008b, Boonmee2009, Chao2008, Karatepe2011, Houssein2010].

Teoria mulțimilor fuzzy (FS) a fost introdusă de Zadeh în 1965, care este generalizarea teoriei mulțimilor convenționale. Conține un instrument matematic, care se poate ocupa de variabile lingvistice asociate limbilor naturale. Poate fi folosită pentru analiza datelor având un sistem cu intrări multiple și ieșiri multiple (MIMO) [Madeti2017].

Algoritmii genetici (Genetic algorithms-GA) reprezintă o altă opțiune pentru analiza datelor. Are în vedere multe puncte în spațiul de căutare simultan pentru clasificarea, diagnosticarea și controlul defecțiunilor [Holland1992].

Arhitectura fuzzy-neurală este bazată pe două tehnici de încredere, cum ar fi logica fuzzy și rețelele neuronale. Modelele fuzzy stabilite pot estima cu ușurință locația defecțiunii în aplicații în timp real [Hu2016].Oportunități, provocări și perspective pentru sistemele de monitorizare fotovoltaice

1.7. Oportunități pentru sistemele de monitorizare fotovoltaice

Diverse organizații, cum ar fi Agenția Internațională pentru Energie Atomică (IAEA), Consiliul Mondial al Energiei (WEC), Agenția Internațională pentru Energie (IEA), Administrația de Informații Energetice din SUA (EIA) au oferit diferite previziuni/proiecții privind cererea de energie pe ani, 2020, 2030 și 2050 [Suganthi 2012]. Potrivit estimărilor lor, procentul din energia electrică mondială generată din cărbune va fi redus de la 40% în 2008 la 37% și, respectiv, 33% în 2030 și, respectiv, 2050.

Dintre toate energiile neconvenționale și regenerabile, energia solară are un potențial ridicat și este cea mai abundentă sursă din lume, care poate fi utilizată pentru a satisface viitoarele cereri de energie. Se preconizează că producția de energie solară pe glob va crește la 402 TWh până în 2030.

a. Provocări și perspective ale sistemelor de monitorizare fotovoltaice

Se constată că a existat un progres semnificativ în tehnicile de monitorizare fotovoltaice în ultimii ani. Un scurt rezumat al provocărilor din domeniul monitorizării sănătății sistemului fotovoltaic raportate în literatură este discutat mai jos:

- *Condiții de mediu severe*.
- *Cerințe de fiabilitate*.
- *Degradarea eficienței*.
- *Constrângeri de resurse*.
- *Calibrarea sistemului și provocări economice*.

În ansamblu, pentru sistemele de monitorizare fotovoltaice este necesară selecția dispozitivelor de măsurare adecvate a căror calibrare este gestionată de la distanță de către

sistemul testat conectat printr-o rețea de bună calitate, pentru a asigura o funcționare fiabilă și eficientă energetic.

- Alte provocări viitoare și posibilități de îmbunătățire: pentru a percepe provocările sistemelor viitoare de monitorizare fotovoltaic, este important să se reexamineze proprietățile așteptate ale acestora, care includ raportarea în timp real, predicția tendințelor, capacitatea de operare fără personal uman, măsurători precise, înregistrare în timp real a datelor, facilități de stocare adecvate, declanșatoare/alerte, control în afara amplasamentului și acces securizat. Aceste proprietăți pot fi realizate prin îndeplinirea obiectivelor / sarcinilor viitoare după cum urmează:
    - Înregistrare, stocare și transmitere eficientă a datelor;
    - Automatizarea sistemului și operarea în timp real;
    - Detectarea și eliminarea imediată a erorilor;
    - Vizualizarea în timp real a parametrilor operaționali;
    - Estimarea prealabilă a comportamentului sistemului;
    - Controlul sistemului pentru maximizarea ieșirii.

Obiectivele/sarcinile menționate mai sus ridică mai multe provocări dintre care, unele ar putea fi depășite într-o anumită măsură prin următoarele abordări:

- Utilizarea de dispozitive de măsurare, senzori și traductoare cu eficiență dovedită și dezvoltarea unora noi cu performanțe îmbunătățite;
- Utilizarea tehnicilor de procesare a semnalului, cum ar fi transformarea wavelet pentru compresia eficientă a datelor și costul redus de stocare a datelor;
- Concentrarea pe noi tehnologii precum OPAL-RT în loc de microcontrolere pentru control și automatizare;
- Asigurarea controlului centralizat sau în afara amplasamentului folosind rețele de comunicații de mare viteză, cum ar fi sateliți, sisteme de comunicații fără fir;
- Utilizarea tehnicilor de inteligență artificială pentru predicția stării viitoare;
- Încorporarea celor mai noi tehnologii hardware/software în sistemele de monitorizare pentru operare în timp real și sigură.

1.8. Comentarii și recomandări privind sistemele de monitorizare fotovoltaice

Din parcurgerea literaturii științifice rezultă mai multe comentarii/discuții și recomandări privind sistemele de monitorizare fotovoltaice, prezentate in cele ce urmează.

Pentru a detecta parametrii operaționali și metrologici ai unui sistem fotovoltaic, diferiți senzori sunt utilizați așa cum este raportat în literatură [Eke2012, Mukaro 1999]. Dar este foarte dificil de identificat, din cauza variației dimensiunii sistemului, principiilor de funcționare, structurii senzorilor, hardware-ului utilizat și diferențelor între locurile de instalare.

Pentru măsurarea curentului, metoda rezistenței șunt este utilizată pe scară largă datorită simplității, costului redus și preciziei rezonabile. Senzorii de curent bazați pe AMR în buclă închisă oferă performanțe aproape similare cu senzorii cu efect Hall. Senzorii de curent cu poartă de flux oferă o precizie de înaltă performanță, dar sunt potriviți doar pentru anumite aplicații, deoarece sunt foarte scumpi. Pentru amplitudine mare, sunt preferați senzorii de curent cu fibră optică pentru curenți continui. Curenții alternativi pot fi măsurați pe scară largă folosind bobine Rogowski și TC. Aceste tehnici pot măsura de la câțiva amperi la mega amperi cu costuri reduse și precizie ridicată. Senzorii de câmp magnetic precum AMR și GMR permit detectarea curentului indirect la preț rezonabil. Divizoarele de tensiune sunt utilizate în general pentru măsurători în aplicații de joasă tensiune datorită construcției simple și preciziei rezonabile. De obicei, PT și CCVT au fost folosite pentru a detecta tensiunea de nivel mediu și înalt cu o bună acuratețe.

O radiație solară directă poate fi măsurată cu pirheliometru prin conversia căldurii solare în semnal electric.

Pentru măsurarea temperaturii, termocuplurile bazate pe efectul Seebeck pot fi utilizate pentru a măsura o gamă largă de temperaturi, dar măsurarea sa are o precizie mai mică și variază neliniar. În schimb, termorezistența (RTD) oferă o măsurare precisă a temperaturii pe o gamă largă de rezistență, care variază liniar cu temperatura [Eke2012].

Un sistem eficient de transmisie a datelor este esențial pentru buna funcționare a monitorizării instalațiilor fotovoltaic [Koutroulis2003]. Pentru a facilita comunicarea dintre senzori și sistemul de achiziție date (DAQ), sunt utilizate diverse medii, cum ar fi sistemele de comunicații cu fir, fără fir și pe liniile de alimentare. În ceea ce privește aria de acoperire și lungimea, cablurile coaxiale nu sunt capabile să funcționeze pe distanțe lungi în comparație cu cablurile cu fibră optică. WLAN poate acoperi doar o zonă mică de aproximativ 20 km^2 în comparație cu GPRS-GSM și poate transmite date pe distanțe de sute sau mii de kilometri prin internet [Al-Ali2010, Benghanem 2010], în timp ce PLC transportă informații pe sute sau mii de metri folosind infrastructura cu fir existentă fără instalații suplimentare, reducând costul sistemului [Wang2011]. Cablul de fibră optică este capabil să transmită numai date de la 100 Mbps la 2000 Mbps. Costul de instalare și procesul de transmisie a datelor prin cablu este foarte

mare. Ca rezultat, wireless și PLC sunt cei mai buni candidați pentru comunicare, deoarece acestea nu au nevoie de cabluri suplimentare între senzor și sistemul de achiziție de date pentru transmiterea datelor [Boquete2012]. Datorită efectului de interferență radio sever, tehnologia fără fir are aplicații limitate. Ca rezultat, tehnologia PLC poate fi considerată o alegere mai bună pentru transmiterea datelor.

De obicei, stocarea datelor se poate face pe un dispozitiv sau online. DSO și cardul SD sunt dispozitivele utilizate pentru stocarea datelor. MySQL este o formă online de stocare în care datele sunt stocate într-o bază de date [Benghanem 1999]. Cardul SD are unele dezavantaje, inclusiv acela că poate fi spart sau pierdut cu ușurință din cauza dimensiunilor sale mici și, de asemenea, poate fi expus la viruși care corup toate informațiile utile. MySQL este cea mai bună modalitate de a păstra datele în siguranță împotriva oricărei modificări sau pierderi accidentale. Este foarte dificil să găsești date de pe dispozitivele de stocare decât datele care sunt disponibile online. Dezvoltarea rețelei la nivel mondial a făcut mai ușoară obținerea de informații online.

În general, analiza datelor este utilizată pentru a afla informații utile pentru a implementa cu succes sistemul de sprijin decizional asistat de computer în sistemele de monitorizare fotovoltaic. Puține dintre aceste metode sunt complexe, în timp ce celelalte sunt simple. LabVIEW constituie un limbaj de programare grafică, care poate analiza datele într-un interval scurt de timp în comparație cu mediile de programare bazate pe text. Aceste programe LabVIEW se numesc VI-uri, care conțin un panou frontal (FP) și o diagramă bloc (BD). MATLAB și Microsoft Visual Basic pot fi, de asemenea, folosite pentru a dezvolta o interfață grafică. O interfață grafică cu utilizatorul (GUI) poate fi creată interactiv sau prin programare [Anwari2011]. C/C++ este cel mai comun limbaj de programare folosit pentru a dezvolta aplicații software. Rețeaua neuronală este complicată deoarece include o rețea multistrat care trebuie antrenată corespunzător pentru a obține rezultatele dorite [Mellit2008]. Pe de altă parte, logica fuzzy este mult mai simplă decât rețeaua neuronală, dar performanța sa este inferioară [Shaheer2021].

Recomandări

Majoritatea invertoarelor fotovoltaice au o gamă largă de interfețe, inclusiv intrări pentru senzori și interfețe de comunicare. Aceste intrări ale senzorilor pot fi utilizate pentru a conecta senzorii de temperatură ai modulului fotovoltaic și senzorii de iradiere ca piranometre.

Pentru un sistem avansat de monitorizare fotovoltaic, este potrivit să se măsoare curentul sau puterea la nivelul șirului de consumatori. Costul suplimentar pentru sistemul de

monitorizare avansat depinde de capacitatea centralei fotovoltaice. Când se produce mai multă energie din instalația fotovoltaică instalată, atunci beneficiul economic este mai mare. Dacă instalația fotovoltaică produce mai puțină energie decât se aștepta, monitorizarea nivelului șirului reduce semnificativ costul și timpul necesar pentru a detecta defecțiunea [Chouder2010, Sera2008]. Din aceste motive, se recomandă cu tărie monitorizarea nivelului șirului consumatorilor [Jonke2013, Karatepe2011].

Câteva recomandări generale pentru sistemele de monitorizare fotovoltaic sunt următoarele:

- **Interval de măsurare:** Datele trebuie prelevate la o rată mare. Valorile medii trebuie stocate în 5-15 minute. Rata de degradare poate fi calculată cu ușurință printr-un număr mare de puncte de date. Datorită dezvoltării tehnologiei, costul implementării hardware și al stocării datelor scade.
- **Conexiuni pentru cabluri în aer liber:** în aplicații în aer liber trebuie utilizați manșoane de protecție pentru conectorii de cablu, pentru a rezista la condiții climatice dure de lucru.
- **Interval de inspecție:** Verificarea vizuală trimestrială îmbunătățește fiabilitatea sistemului de monitorizare
- **Erori instrumente de măsurare:** Asigurarea că instrumentul de măsurare nu afectează în mod semnificativ valoarea reală.
- **Interval de calibrare:** Calibrările pe banc sunt efectuate în condiții de mediu interior, ceea ce este o situație ideală. Se recomandă calibrarea de la cap la cap pentru care limitele pot fi temperatura mediului peste 15 °C și viteza vântului sub 3 m/s [Wichert2001].
- **Cost:** Creșterea rapidă a diferitelor produse comerciale determină creșterea costului total al sistemelor de monitorizare [Ranhotigamage2011].

1.9. Realizări actuale de sisteme de monitorizare fotovoltaice

1.9.1. Sistem de monitorizare fotovoltaic cu modele de predicție a puterii

Un sistem fotovoltaic personalizat a fost dezvoltat la Universitatea din Qatar pentru a monitoriza, analiza și evalua performanța fotovoltaic folosind diverși factori meteorologici [Farid2020]. Studiul își propune să dezvolte achiziții noi de date personalizate pentru sistemele fotovoltaice în condiții climatice extreme, prin utilizarea componentelor standard și îmbunătățite cu analize de date pentru evaluarea și predicția performanței.

Microcontrolere și senzorii sunt utilizați pentru măsurarea parametrilor meteorologici și electrici. Este dezvoltată condiționarea personalizată a semnalului împreună cu plăcile de microcontrolere cu interfață adecvate și transmisie wireless de date către platformele iCloud

IoT. Programul LabVIEW™ a fost folosit pentru a permite accesul omniprezent și procesarea datelor înregistrate prin IoT utilizat.

Acest studiu arată, de asemenea, modul în care utilizarea unor algoritmi ML specifici, cum ar fi rețeaua neuronală artificială (ANN), poate oferi cu succes predicții precise cu o eroare pătrată medie (RMSE) scăzută între puterea prezisă și cea reală. Rezultatele susțin integrarea fiabilă a sistemelor fotovoltaice în rețelele inteligente pentru planificarea și managementul energetic eficient, în special pentru regiunile aride și semi-aride.

Figura 1.5. prezintă cadrul general de achiziție a datelor.

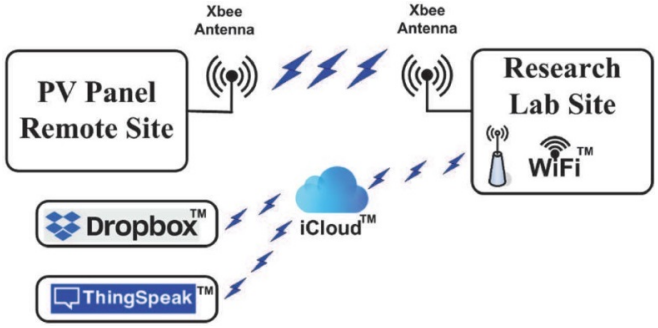


Fig. 1.5. Sistemul general de achiziție de date [Farid2020]

O ilustrare detaliată a diagramei de conectare, care prezintă componentele importante ale amplasamentului la distanță al panoului fotovoltaic este prezentată în Figura 1.6. Șase parametri de mediu și doi electrici și anume; (1) temperatura ambiantă, (2) nivelul de iradiere, (3) viteza vântului, (4) temperatura suprafeței, (5) umiditatea relativă, (6) nivelurile de praf, împreună cu tensiunea și curentul fotovoltaic sunt studiate și alese de autori pentru a oferi cel mai mare impact probabil, contribuind performanța și eficiența panoului fotovoltaic, permițând astfel o fiabilitate mai mare atunci când se aplică ML.

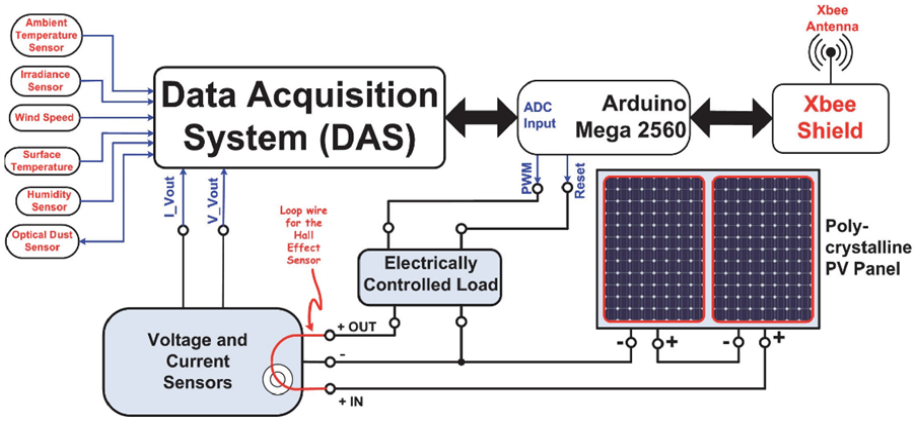


Fig. 1.6. Configurarea sistemului de amplasare la distanță a panoului fotovoltaic [Farid2020]

Figura 1.7. prezintă conectarea simplificată a diferitelor componente pentru a procesa semnalul necesar pentru stocarea redundantă și vizualizare în configurația laboratorului de cercetare. Stația de lucru computerizată folosește programul LabVIEW™ pentru a procesa date care permit vizualizarea datelor recent achiziționate.

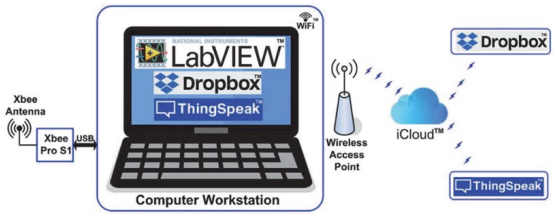


Fig. 1.7. Configurarea sistemului pentru laboratorul de cercetare [Farid2020].

1.9.2. Sisteme de monitorizare fotovoltaice cu controlere PLC

Un controler logic programabil (PLC) sau un controler programabil, sau un automat programabil cu termenul tehnic echivalent în română, face parte dintr-o familie de calculatoare folosite în aplicații comerciale și industriale. Modulele PLC sunt fiabile și eficiente în sincronizarea metodelor, aplicațiilor de control și sistemelor automate. Mai mult, observă starea proceselor precum monitorizarea și relaționează datele achiziționate de la diverși senzori. Operația principală a PLC-ului este de a monitoriza și de a lua o decizie bazată pe modul în care este programat sistemul și cum este controlată ieșirea.

Sistemele bazate pe automate programabile, PLC, sunt implementate în diverse domenii, cum ar fi monitorizare, control și aplicații fotovoltaic. Un mod de configurare a unui sistem de monitorizare fotovoltaică pe bază de PLC este ilustrat în figura 1.8. [Shaheer2021].

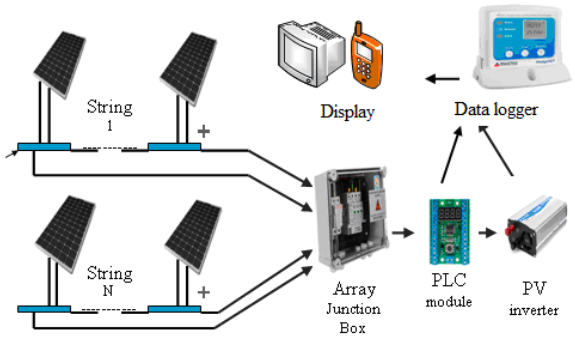


Fig. 1.8. Configurarea unui sistem de monitorizare solar fotovoltaic care implementează un modul de controler PLC [Shaheer2021]

Pentru a automatiza și monitoriza actualele infrastructuri de rețele inteligente la scară mare (SG-Smart Gread) și de mici dimensiuni (SMG-Smart Micro Gread), echipamente

industriale sunt utilizate datorită fiabilității și versatilității lor. Controlerele logice programabile (PLC) sunt combinate cu sistemele de control de supraveghere și achiziție de date (SCADA), responsabile cu achiziționarea și afișarea datelor operaționale.

In acest sens, in [González2019] se aplică un nou concept de abordare a monitorizarii rețelelor inteligente cu surse fotovoltaice de energie. În această lucrare se integrează PLC-uri și platforme Arduino într-un sistem SCADA comun folosind conectivitatea oferită de Open Platform Communications (OPC) după cum se observă în figura 1.9.

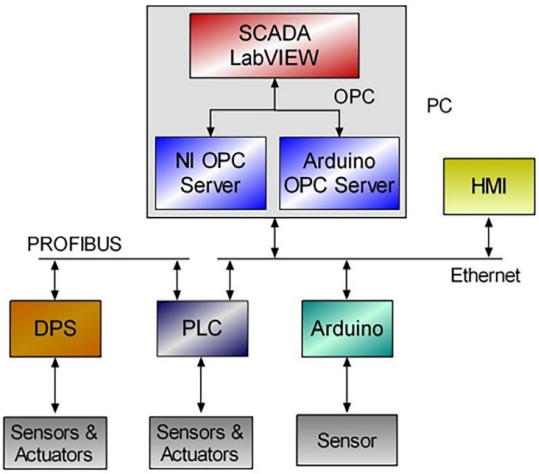


Fig. 1.9. Schema bloc a sistemului de automatizare și monitorizare a unei instalații fotovoltaice incluzând PLC [González2019]

1.9.3. Sistemul de monitorizare fotovoltaic Solarmon-2.0

Un nou sistem de monitorizare a fost proiectat și testat cu succes pe 65 de rețele fotovoltaice din Republica Cehă și alte câteva țări. Denumit Solarmon-2, sistemul vizează măsurarea principalelor parametri și caracteristici ale centralelor solare mari, colectarea, diagnosticarea și prelucrarea datelor.

Întregul sistem este dezvoltat și construit pe o tehnologie specială de colectare a datelor. La rețeaua fotovoltaică este instalat un data logger special BBbox. Loggerul de date este programat pentru protocoalele standard RS485, MODbus și SCADA. Aceasta este soluția cea mai ideală și cea mai rentabilă pentru colectarea datelor. BBbox este capabil să comunice cu multe dispozitive și senzori din instalația fotovoltaică cu un timp de răspuns de la 1–3 s și pentru distanțe de până la 1200 m. Semnalele de date care sunt conectate la BBbox includ ieșiri de la contoarele electrice de pe partea de joasă tensiune (JT) și de înaltă tensiune (ÎT) a transformatorului și ieșiri de la invertoare de orice fel (SMA, Fronius, Kaco, Delta etc.), precum și un sistem de securitate precum senzor de incendiu, senzori de mișcare, senzori metrologici,

termometre, termocupluri, senzori care măsoară direcția și viteza vântului și senzori care măsoară iradierea.

Datele descărcate în BBox de la invertoare, substații și alte dispozitive sunt, în general, procesate, stocate și etichetate corespunzător. Datele sunt trimise printr-un canal SSL securizat către serverul de baze de date Solarmon-2.0. Baza de date poate primi și procesa date de la diferite tipuri de înregistrări de date (figura 1.10.). BBbox poate face schimb de informații cu un alt BBbox.

Interfață de service este concepută mai detaliat pentru tehnicienii de service, care realizează o supraveghere mai cuprinzătoare asupra rețelei fotovoltaice. Modul de service identifică și definește cauzele defectelor erorilor descrise și evenimentele care au avut loc.

Sistemul de monitorizare a ajutat la identificarea și eliminarea erorilor de instalare și a contribuit la funcționarea continuă a rețelelor fotovoltaice. Dacă sistemul de monitorizare indică o putere redusă de ieșire, tehnicienii de service și inginerii au de verificat instalația fotovoltaică la fața locului pentru a remedia erorile.

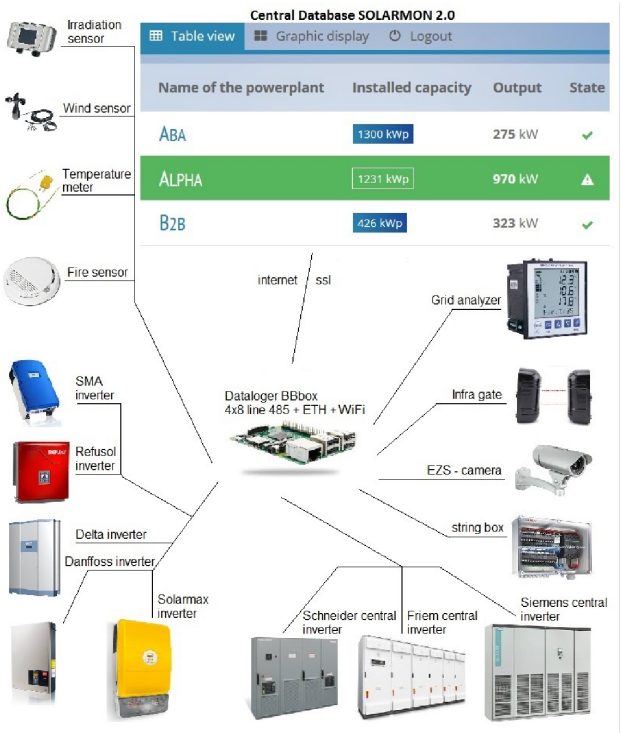


Fig. 1.10. Schema sistemului de monitorizare Solarmon-2.0 [Václav2018]

1.9.4. Sistem de monitorizare fotovoltaică bazat pe comunicații prin linii de alimentare cu energie

Un sistem de monitorizare fotovoltaic trebuie să ofere atât o monitorizare detaliată a fiecărui modul fotovoltaic, cât și o modalitate de acces ușor de utilizat la datele monitorizate.

Pentru a îndeplini aceste nevoi, această lucrare [Han2015] propune un sistem de monitorizare fotovoltaic ușor de utilizat, bazat pe o comunicație cu linie electrică (PLC) cu costuri reduse. Pentru reducerea costurilor, modulul PLC este dezvoltat fără un modem de comunicație.

Sistemul de monitorizare fotovoltaic propus este compus din patru elemente:

- modul PLC slave;
- modul PLC master;
- data logger;
- dispozitiv inteligent.

Fig. 1.11. prezintă arhitectura unui sistem de monitorizare fotovoltaic ușor de utilizat peste un sistem de generare fotovoltaic tipic.

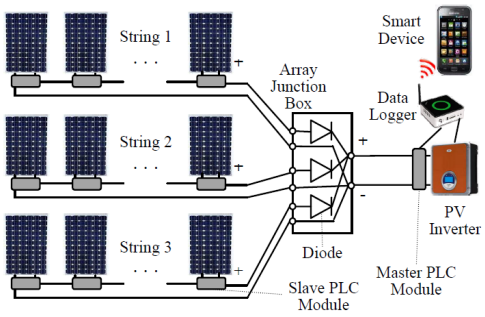


Fig. 1.11. Arhitectura unui sistem de monitorizare fotovoltaic ușor de utilizat, bazat pe module PLC, un data logger și un dispozitiv inteligent [Han2015]

Testarea pe teren a sistemului de monitorizare fotovoltaic propus

Fig. 1.12. prezintă configurația unui test de teren pentru sistem de monitorizare fotovoltaic propus. Sistemul fotovoltaic are două șiruri compuse din opt module fotovoltaice. Modulele PLC slave sunt implementate la fiecare modul fotovoltaic.

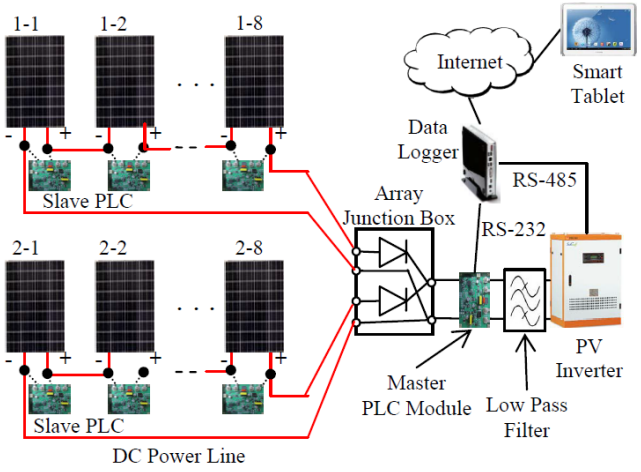


Fig. 1.12. Configurarea testului pe teren pentru sistemul de monitorizare fotovoltaic [Han2015]

Un modul PLC principal este instalat lângă invertorul fotovoltaic. Un filtru trece jos (LPF) este instalat între modulul PLC principal și invertorul fotovoltaic. Înregistrătorul de date este conectat la modulul PLC principal și la invertorul fotovoltaic prin RS-232 și RS-485, respectiv. De asemenea, este conectat la Internet prin Ethernet sau WiFi. O tabletă inteligentă accesează data logger-ul prin intermediul Internetului oricând și oriunde într-o zonă îndepărtată.

Puterea maximă totală a sistemului fotovoltaic instalat este de 6,4 kW. Invertorul fotovoltaic instalat are o capacitate de 10 kW. Figura 1.13.(a) prezintă modulele fotovoltaice instalate pe teren. Figura 1.13.(b) prezintă forma de undă a semnalului primit la modulul PLC principal după filtrare.

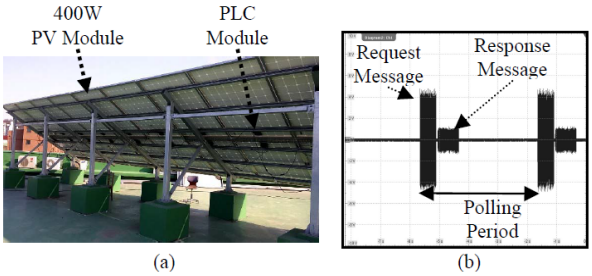


Fig. 1.13. Sistem de monitorizare fotovoltaic instalat. (a) module V cu un modul PLC slave (b) forma de undă a semnalului primit [Han2015]

Astfel, lucrarea propune un sistem de monitorizare fotovoltaic ușor de utilizat, bazat pe o tehnologie PLC cu costuri reduse, fără un modem de comunicație si prin utilizarea schemei de modulare ASK direct pe MCU [Han2015].

1.10. Concluzii

În acest capitol, a fost prezentată o imagine cuprinzătoare a sistemelor de monitorizare fotovoltaice existente raportate în literatura de specialitate în ceea ce privește, în special, utilizarea senzorilor și a sistemelor de achiziție de date [Madeti2017, Ortega2017].

Sistemele de monitorizare fotovoltaice (fotovoltaic) colectează și analizează parametrii măsurați dintr-o instalație fotovoltaică pentru a monitoriza și/sau a evalua performanța acesteia [Farid2020].

Secțiunea de senzori tratează senzorii utilizați pentru parametrii operaționali și metrologici importanți (de exemplu, tensiune, curent, radiație solară, temperatură) împreună cu principiile lor de funcționare în diferite sisteme de monitorizare fotovoltaice [Eke2012, Mukaro 1999].

Secțiunea sisteme de achiziție de date acoperă controlerele utilizate pentru sistemul de achiziție de date, tipurile de metode de transmitere a datelor, stocarea și analiza datelor

[Benghanem1998, Koutroulis2003]. Se consideră că, cunoașterea informațiilor furnizate în această prezentare este crucială pentru dezvoltarea unui sistem de monitorizare fotovoltaic eficient, cu costuri reduse, viabil chiar și pentru instalațiile fotovoltaice la scară mică și medie, fără a compromite performanța dorită [Ranhotigamage2011].

Există un consens că monitorizarea sistemelor fotovoltaice este cea mai bună modalitate de a maximiza performanța sistemelor fotovoltaice, cu un efect direct în raportul perfomanței, RP, și disponibilitatea centralelor fotovoltaice [IEC1998]. Cu cât nivelul de monitorizare este mai complex, cu atât rezoluția sistemului de monitorizare este mai mare și mai ușor de detectat pierderi mici de energie din cauza defecțiunilor și de a identifica componentele defecte [Jonke2013].

În mod ideal, pentru a maximiza RP, toate sistemele fotovoltaice ar trebui monitorizate la nivel de modul și în acest fel, chiar și pierderile mai mici de energie vor fi detectate într-un mod rapid și precis, cu o indicație clară despre care modul sau grupul de module defectează și cauza acesteia [Chouder2010, Rosu2020].

Dintre cele trei modalități de detectare a defecțiunilor în sistemele fotovoltaice, respectiv, la nivel de arie sau matrice de panouri fotovoltaice, la nivel de șir sau rând de panouri sau la nivel de panou individual, ultima este de preferat, în cadrul unui sistem de monitorizare capabil să detecteze defecțiunile individuale ale modulelor fotovoltaice în mod automat [Karatepe2011]. Un astfel de sistem permite reducerea pierderilor de energie și face din energia fotovoltaică o sursă de energie și mai profitabilă și mai eficientă [Houssein2010].

În concluzie, cu dispozitivele actuale de monitorizare viabile din punct de vedere economic există aproximativ 20% din pierderi de energie la sistemele fotovoltaice [Silvestre2004]. Pentru a reduce pierderile de energie și a face din energia fotovoltaică o sursă de energie și mai profitabilă și mai eficientă este necesar un nou sistem de monitorizare capabil să detecteze defecțiunile individuale ale modulelor fotovoltaice într-un mod automat, ieftin și eficient [Siva2017].

În ultimii ani, sistemele de monitorizare fotovoltaice au fost integrate cu platforme wireless care cuprind achiziția de date de la diverși senzori și noduri de rețea pentru transmisia de date wireless [Guerriero2014, Boquete2012]. Ca urmare, au fost dezvoltate diverse tehnologii de monitorizare de ultimă generație pentru aplicațiile fotovoltaice pe baza utilizarii modulelor electronice necesare procesării datelor, protocoalelor de transmisie a datelor și tehnicilor de inteligență artificială (IA) [Shaheer2021, Mellit 2008].

2. CERCETĂRI PRIVIND APLICAREA SISTEMULUI KNX LA MONITORIZAREA SISTEMELOR FOTOVOLTAICE

2.1. Prezentarea sistemului SMART KNX pentru monitorizarea consumului de energie electrică fotovoltaică

2.1.1. Introducere

Sistemele fotovoltaice off-grid reprezintă o soluție vitală pentru autonomia energetică, însă se confruntă cu provocări specifice, precum intermitența producției solare și necesitatea protejării sistemului de stocare (acumulatorii). O gestionare ineficientă a energiei poate duce la pierderi semnificative și la uzura prematură a bateriilor.

Problema fundamentală a sistemelor fotovoltaice este nepotrivirea dintre curba de producție solară și cea de consum a utilizatorilor. În mod tradițional, soluțiile pentru această provocare s-au axat pe două direcții principale: stocarea energiei în acumulatori și Managementul Părții de Cerere (Demand Side Management - DSM).

Studiul implementează o strategie avansată de DSM, adaptată specific pentru constrângerile unui sistem off-grid, unde maximizarea autoconsumului nu este doar un obiectiv economic, ci o necesitate funcțională. Soluția noastră se concentrează pe utilizarea integrală a energiei produse local și pe protejarea investiției în sistemul de stocare.

În acest context, studiul se diferențiază de abordările standard, care se concentrează adesea pe sisteme on-grid (fig. 2.1), unde surplusul de energie este injectat în rețea. Soluția noastră este dedicată în mod specific sistemelor off-grid și abordează o problemă tehnică frecventă: lipsa unei interfețe de comunicare standardizate între invertoarele fotovoltaice și sistemele de automatizare a clădirilor (BMS) bazate pe KNX.



Fig. 2.1. Automatizarea invertorului on-grid [h2]

Contribuția principală este proiectarea și validarea unei arhitecturi de control care integrează invertoare Growatt off-grid într-un sistem de management inteligent bazat pe un controler Schneider Wiser for KNX. S-a ales implementarea sistemului smart KNX deoarece are următoarele caracteristici:

Obiectivul este de a demonstra că, prin monitorizarea precisă a parametrilor și implementarea unei logici de control avansate, se poate atinge un autoconsum de 100% din energia produsă, optimizând în același timp sănătatea sistemului de stocare.

2.1.2. Arhitectura sistemului și metode

Proiectarea sistemului a pornit de la necesitatea de a colecta date precise din puncte cheie ale instalației, în ciuda limitărilor echipamentelor existente.

a) Arhitectura generală

Schema bloc din figura 2.2 oferă o imagine de ansamblu a întregului sistem, principalele componente fiind:

- (1) și (2) sunt contoarele iEM3155 pentru rețea și consumatori;
- (3) este analizorul de 100A pentru baterie;
- (4), (5), (6) sunt analizoarele de 50A pentru fiecare string PV;
- (7) este controlerul Wiser for KNX, care centralizează toate datele.

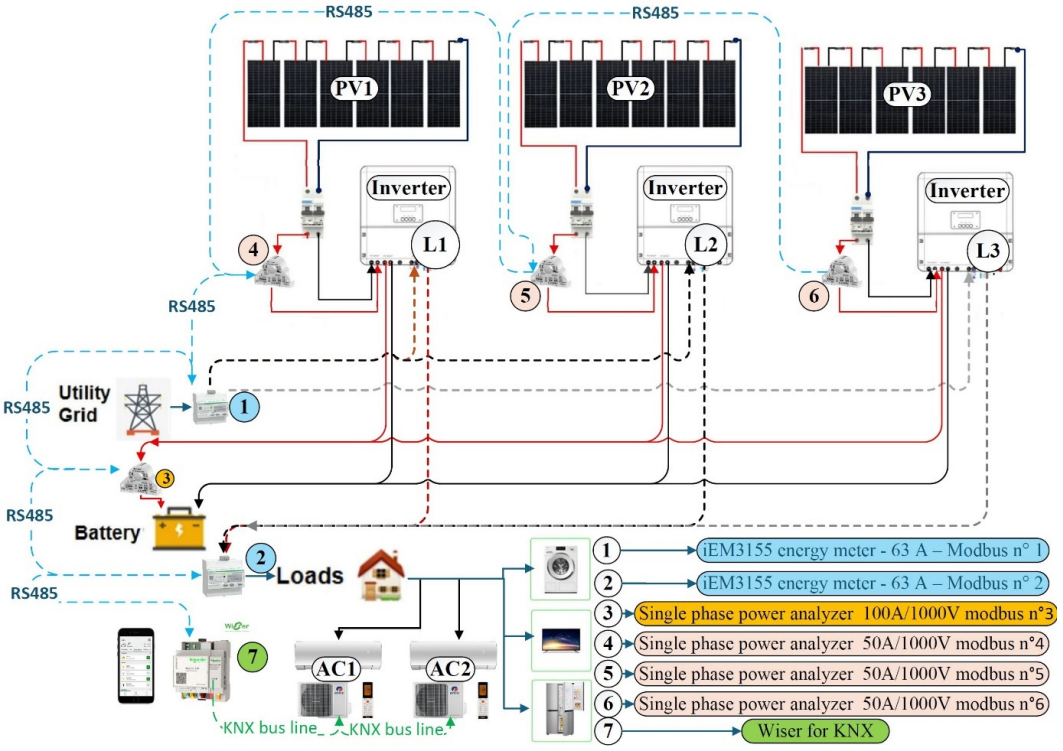


Fig. 2.2. Schema bloc a modului de dispunere a componentelor

Sistemul de control utilizează arhitectura sistemul KNX pentru a supraveghea, controla, conecta circuite și a achiziționa date. Toate datele sunt trimise prin magistrală (bus RS485) către serverul central de date, iar cu ajutorul software SCADA integrat în Wiser for KNX se pot vizualiza în timp real parametrii sistemului și se poate gestiona sistemul în ansamblul său.

După ce sistemul de control procesează datele pe baza funcțiilor logice definite, elementele de execuție vor porni/opri consumatorii, respectiv sistemele de aer condiționat.

b) Componente hardware

Sistemul fotovoltaic off-grid luat în studiu este compus din:

- generator fotovoltaic: 18 panouri PV, împărțite în 3 stringuri de câte 6 panouri fiecare.
- invertoare: trei invertoare monofazate Growatt de 5000W, câte unul pentru fiecare string, formând un sistem trifazat;
- sistem de stocare: banc de acumulatori de 10 kWh la o tensiune nominală de 48V.

2.1.3. Preluarea parametrilor

Pentru a depăși lipsa comunicației directe cu invertoarele s-a implementat o rețea de senzori externi pe o magistrală RS485.

- Monitorizarea C.A.: S-au utilizat două contoare de energie Schneider iEM3155 care permit citirea parametrilor de curent alternativ prin Modbus. Fig. 2.3 detaliază fluxul de date de la aceste contoare:.

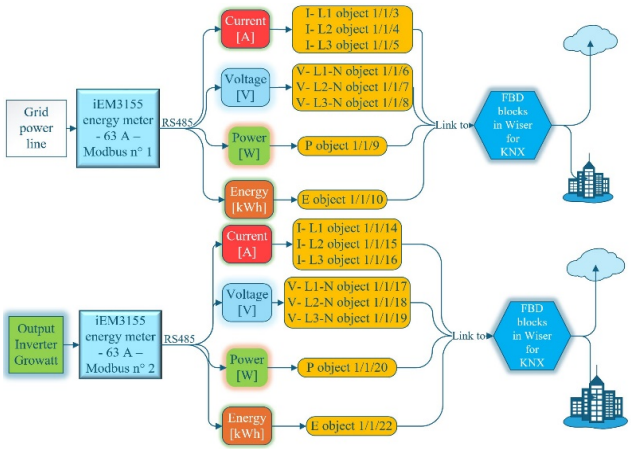


Fig. 2.3. Schema bloc a modului de transmitere date prin RS485 de la contorul de pe intrare/ieșire a invertorului și asocierea lor la obiecte KNX

- Monitorizarea C.C.: Pentru a măsura producția fiecărui string PV și starea acumulatorului, s-au folosit analizoare de putere Finder. Figura 2.2 (4), (5), (6), prezintă un analizor de putere de tip 6M.TA și modul de instalare fizică a acestuia.
- **Rețeaua de comunicație:** Fig. 2.5 ilustrează topologia rețelei RS485, arătând cum toate cele șase dispozitive de măsurare sunt conectate în serie și comunică cu unitatea centrală Wiser for KNX, care acționează ca un gateway Modbus-KNX.

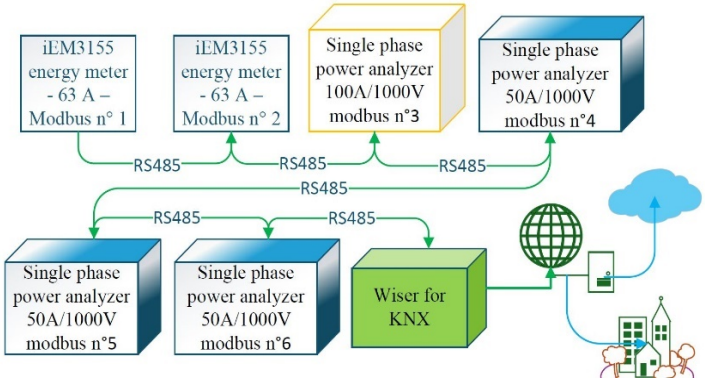


Fig. 2.4. Schema bloc a componentelor și modului de conectare la rețeaua RS485

- **Fluxul de date C.C.**: Figura 2.5 (detaliază modul în care datele de curent continuu de la analizoarele Finder sunt mapate pe obiecte KNX specifice.

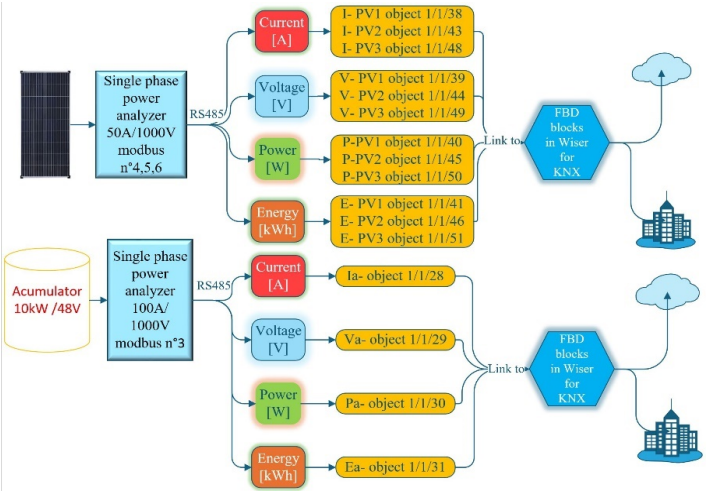


Fig. 2.5. Schema bloc a modului de transmitere date prin RS485 și asocierea lor la obiecte KNX a componentelor: 3, 4, 5, 6

Pentru analizoarele Finder, care nu aveau profiluri preinstalate în Wiser, a fost necesară crearea manuală a unor fișiere .json, un pas tehnic crucial care a permis integrarea acestora.

Pentru dispozitivele 3,4,5,6 au fost create profile utilizând un editor de text obișnuit (Notepad). După scrierea codului specific, fișierul a fost salvat cu extensia *.json.

2.1.4. Context tehnologic și alternative de comunicație

Arhitectura de comunicație aleasă, bazată pe standardul robust KNX pentru automatizarea clădirilor și pe protocolul industrial Modbus pentru achiziția de date, reprezintă o soluție profesională și fiabilă.

Strategia de monitorizare adoptată în această lucrare – utilizarea contoarelor și analizoarelor externe la nivel de sistem și de string . Logica de control și optimizarea autoconsumului

Inima sistemului este logica programată în Wiser for KNX pentru a gestiona inteligent energia. Informațiile colectate de la senzori sunt prelucrate de Wiser for KNX folosind blocuri funcționale (FBD - Function Block Diagram) pentru a implementa logica de control.

a) Calculul autoconsumului de energie fotovoltaică

Autoconsumul de energie fotovoltaică, poate fi definit ca procentul din energie fotovoltaică consumată direct de un utilizator al sistemului fotovoltaic la nivel local. Acesta este un factor foarte important în sistemele fotovoltaice, deoarece este un indicator al cantității de energie în exces stocată în unitatea de stocare a energiei.

Puterea totală a panourilor fotovoltaice (Ppv), un parametru critic pentru decizii, este calculată în timp real prin însumarea valorilor citite de la cele trei stringuri (P-PV1, P-PV2, P-PV3).

b) Logica de comandă a consumatorilor

Managementul inteligent al consumatorilor se bazează pe clasificarea sarcinilor din locuință.

În acest studiu, aparatele de aer condiționat (AC1, AC2) sunt tratate ca sarcini controlabile și reprogramabile. Strategia implementată este o formă de „load shifting” (transfer al sarcinii), unde pornirea acestor consumatori mari este decalată automat în perioadele de producție fotovoltaică maximă pentru a optimiza autoconsumul.

Logica de control pentru pornirea și oprirea automată a sistemelor de aer condiționat (AC1, AC2) este prezentată atât sub formă de schemă logică în Figura. 2.6.

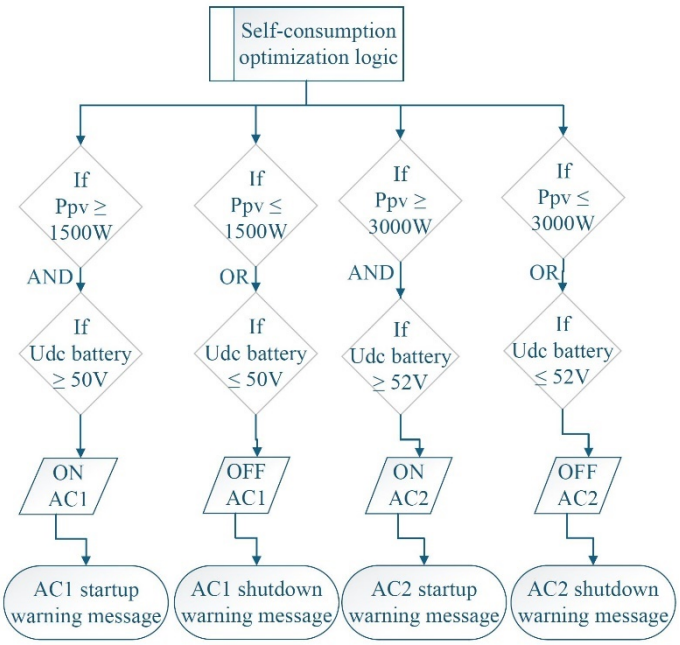


Fig. 2.6. Schema bloc de logică a FBD-ului de pornire/oprire sisteme de aer condiționat

- AC1 pornește doar dacă puterea de la panouri depășește 1500W și tensiunea bateriei este mai mare sau egală cu 50V.
- AC2 pornește la un prag superior, necesitând o putere de peste 3000W și o tensiune a bateriei de cel puțin 52V.

Această strategie cu dublă condiție este fundamentală: nu doar că valorifică surplusul de energie, dar protejează și bateria, prevenind descărcarea acesteia pentru a alimenta consumatori mari atunci când producția solară este insuficientă.

Această strategie cu dublă condiție (putere PV și tensiune acumulator) este esențială pentru sistemele off-grid.

c) Premize, rezultate inițiale și discuții

Sistemul Wiser for KNX are integrată o funcție de înregistrare a datelor (data logger), care permite stocarea și vizualizarea parametrilor sub formă de grafice pe diferite intervale de timp (zi, săptămână, lună).

- Validarea algoritmului este demonstrată în *Capitolul 3*, iar cel mai concludent rezultat este prezentat în graficul comparativ dintre producția PV (albastru) și consumul casei (verde), prezentat în Figura 2.7.

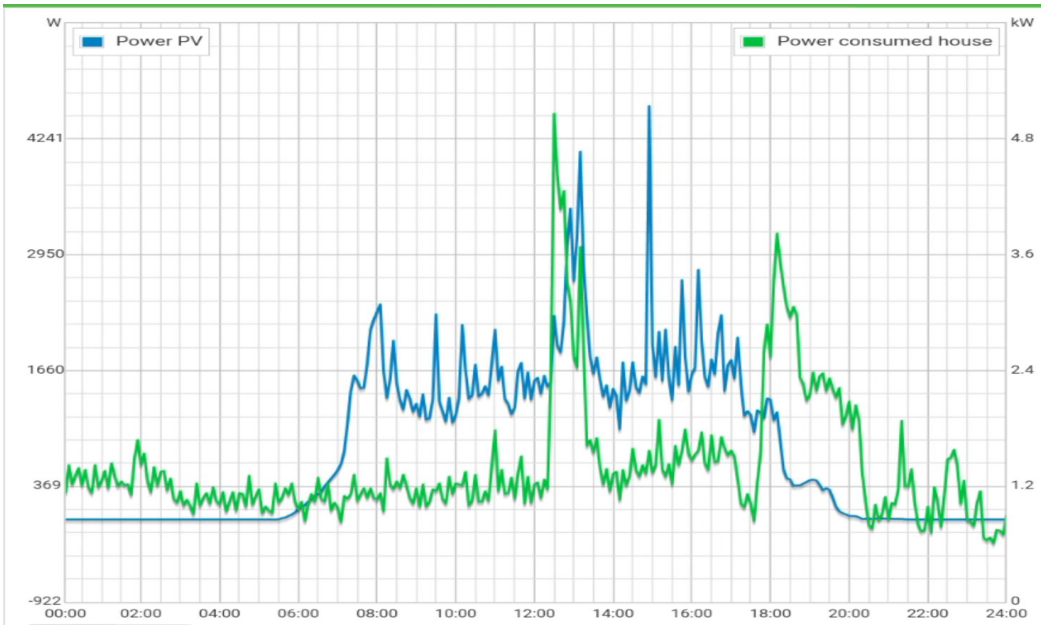


Fig. 2.7. Grafic comparativ dintre producția PV (albastru) și consumul casei (verde)

- Interfața de Vizualizare: Captura de ecran a interfeței SCADA (Human-Machine Interface) din Wiser for KNX prezentată în Figura 2.8,

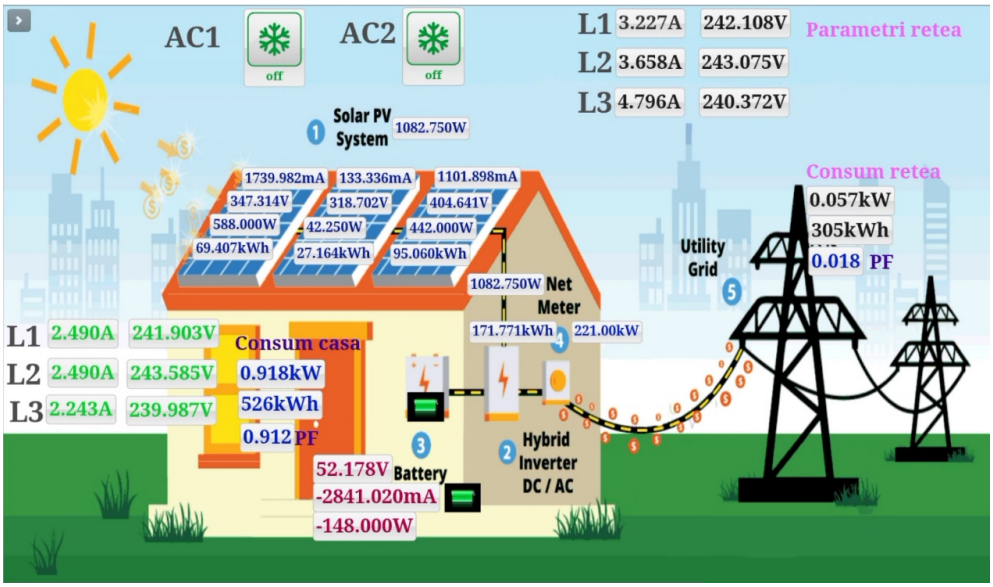


Fig. 2.8. Interfața SCADA (Human-Machine Interface) din Wiser for KNX

Prin această implementare, se poate atinge obiectivul de utilizare a 100% din energia produsă și se poate prelungi durata de viață a bateriilor prin evitarea ciclurilor de descărcare inutile.

2.1.5. Concluzii la capitol

Aplicarea soluțiilor **SMART KNX** la monitorizare sistemelor fotovoltaice demonstrează cu succes fezabilitatea și eficiența integrării unor invertoare off-grid, lipsite de interfețe de comunicare native, într-un sistem de management energetic avansat, bazat pe standardul KNX.

Contribuția fundamentală constă în validarea unui algoritm de control inteligent pentru care au fost folosite formule matematice, s-a calculat puterea totală a panourilor fotovoltaice, ce stă la baza funcționării corespunzătoare a buclelor de reglaj pentru pornire/oprire sisteme de aer condiționat. Rezultatele acestor bucle de reglaj se pot vizualiza graficul din figura 2.7 (validate în *Capitolul 3*) care gestionează consumatorii pe baza producției de energie în timp real și a stării de încărcare a acumulatorilor. Rezultatele inițiale, care arată o corelare directă între curba de producție și cea de consum în perioadele de surplus energetic, validează succesul acestei abordări. În plus, interfața SCADA dezvoltată în Wiser for KNX oferă o vizualizare centralizată și profesională, esențială pentru operarea și monitorizarea completă a instalației.

În concluzie, soluția propusă este o soluție practică și eficientă pentru o problemă tehnică specifică, transformând un ansamblu de echipamente "non-smart" într-un ecosistem energetic inteligent, optimizat și complet controlabil.

3. CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA CONSUMULUI ȘI A FUNCȚIONĂRII SISTEMULUI SMART KNX LA MONITORIZAREA SISTEMELOR FOTOVOLTAICE

Pentru a realiza studiul propus și a oferi soluțiile tehnice cele mai concludente și eficiente, s-a ales ca zi de referință data de 28.07.2025.

Având la bază datele preluate, într-o notă comparativă s-au realizat 4 cazuri de simulare, în vederea identificării eficienței sistemului propus, dar și identificarea celor mai eficiente soluțiilor tehnice de optimizare.

Astfel, s-au analizat și testat următoarele etape:

1. Identificarea și analiza impactului consumului de energie electrică fără a fi utilizate panouri fotovoltaice sau alte surse adiționale;

2. Consumul de energie electrică al casei utilizând producția de energie electrică de la panourile fotovoltaice, fără a avea acumulatori de stocare a surplusului de energie electrică produsă;

3. Consumul de energie electrică utilizând producția de energie electrică de la panourile fotovoltaice și acumulatori cu o capacitate de 10 kWh. Pentru acest scenariu au fost stabilite trei ipoteze de lucru:

a) Ipoteza nr. 1: Sistem de stocare descărcat inițial
b) Ipoteza nr. 2: Sistem de stocare încărcat inițial;
c) Ipoteza nr. 3: Sistem de stocare în regim de rezervă (75%)

4. Maximizarea autoconsumului prin controlul consumatorilor. Pentru acest scenariu, având și rezultatele obținute la punctul nr. 3.1.3 au fost stabilite două ipoteze de lucru:

a) Ipoteza nr. 1: Optimizarea economică prin utilizarea integrală a capacității de stocare (reducerea consumului de energie electrică de la rețea, utilizând producția de energie electrică de la panourile fotovoltaice și capacitatea de stocare a acumulatorilor în procent de 100%, și utilizarea surplusului de energie electrică produsă prin pornirea automată a sistemelor de aer condiționat);
b) Ipoteza nr. 2: Prioritizarea rezilienței prin menținerea unei rezerve de energie de 75% (menținerea acumulatorilor în permanență încărcați la minim 75% și eficientizarea consumurilor prin pornirea automată a sistemelor de aer conditionat).

5. Concluzii.

3.1. Identificarea și analiza impactului consumului de energie electrică fără a fi utilizate panouri fotovoltaice sau alte surse adiționale

Prima etapă a studiului constă în definirea și analiza cantitativă a profilului de sarcină al consumatorului, în absența oricărei surse locale de generație fotovoltaică. Acest scenariu stabilește linia de bază (baseline), reprezentând sarcina energetică etalon pe care sistemul fotovoltaic inteligent, trebuie să o gestioneze. Analiza se bazează pe datele de consum înregistrate la intervale de 5 minute pentru ziua de 28.07.2025.

Curba de sarcină, ilustrată în Figura 3.1, prezintă dinamica puterii instantanee solicitate de locuință pe parcursul a 24 de ore. Aceasta reflectă tiparul comportamental al utilizatorilor și constituie amprenta energetică a acestora.

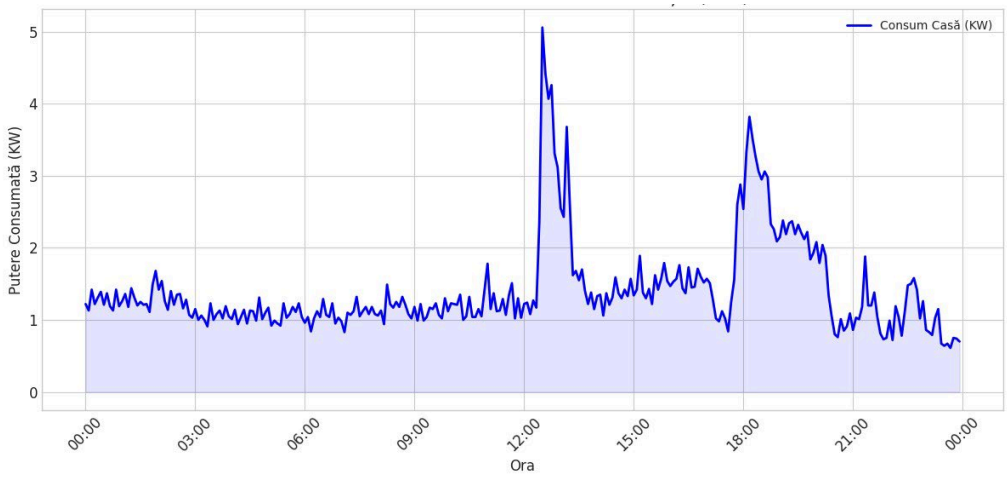


Fig. 3.1. Curba de sarcină a locuinței în data de 28.07.2025

3.2. Consumul de energie electrică al casei utilizând producția de energie electrică de la panourile fotovoltaice, fără a avea acumulatori de stocare a surplusului de energie electrică produsă

Acest al doilea scenariu analizează performanța sistemului fotovoltaic în configurația sa cea mai simplă, în care energia produsă este cuplată direct la consumatorii locuinței, fără a beneficia de un sistem de stocare a energiei (acumulatori). Obiectivul este de a cuantifica gradul de utilizare directă a energiei solare (autoconsumul) și de a determina volumul de energie excedentară care, în absența stocării, este pierdut.

Figura 3.2. ilustrează grafic interacțiunea dintre producție și consum pe parcursul zilei de referință.

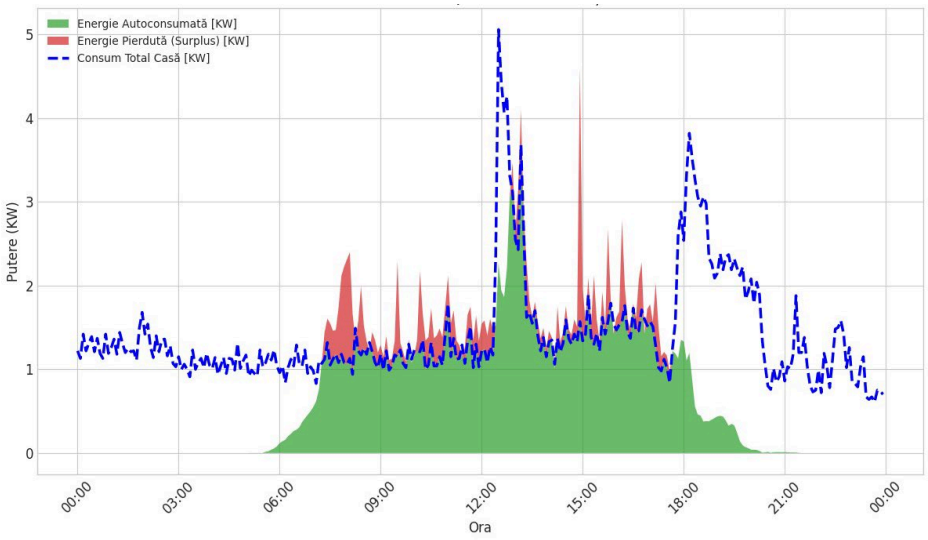


Fig. 3.2. Descompunerea producției fotovoltaice în regim de autoconsum și surplus neutilizat

Suprafața hașurată reprezintă producția totală a sistemului fotovoltaic, descompusă în două componente distincte:

- **Suprafața verde (energie autoconsumată):** Porțiunea din energia solară utilizată direct pentru acoperirea consumului instantaneu al locuinței.
- **Suprafața roșie (energie pierdută):** Surplusul de energie generat în perioada de la amiază, când producția fotovoltaică depășește semnificativ necesarul de consum al casei. În absența unui sistem de stocare, această energie este considerată pierdută.

În concluzie, acest scenariu demonstrează că, deși un sistem fotovoltaic fără stocare aduce beneficii energetice substanțiale prin autoconsumul direct, acesta este intrinsec ineficient din cauza neconcordanței temporale dintre curba de producție și cea de consum. Pierderea a 16.5% din producția zilnică justifică în mod cantitativ necesitatea implementării unor soluții de management energetic – fie prin stocare în acumulatori, fie prin gestiunea inteligentă a sarcinilor pentru a valorifica acest surplus.

3.3. Consumul de energie electrică al casei utilizând panourile fotovoltaice și acumulatori de stocare

Introducerea unui sistem de stocare a energiei (eng. Energy Storage System - ESS) reprezintă o etapă fundamentală în tranziția de la un sistem fotovoltaic simplu la un sistem energetic autonom și eficient.

Analiza ia în considerare constrângerile tehnice impuse de sistemul de management al bateriei (BMS) pentru a proteja celulele și a prelungi durata de viață a acestora:

- **Starea Maximă de Încărcare (SoC Max):** Este limitată **la 93,12%,** corespunzând unei capacități maxime utilizabile de 9,312 kWh.
- **Starea Minimă de Încărcare (SoC Min):** Bateria nu se poate descărca sub **20%** din capacitatea sa nominală, menținând o rezervă permanentă de 2,0 kWh.

Astfel, **plaja de operare zilnică** a bateriei este între 2,0 kWh și 9,312 kWh, având o capacitate efectivă de ciclu de **7,312 kWh.**

a) Ipoteza 1: Sistem de stocare descărcat inițial

Prima ipoteză analizează comportamentul sistemului într-un ciclu complet de funcționare, pornind cu sistemul de stocare la starea sa minimă permisă (SoC = 20%) la începutul zilei. Acest scenariu simulează o zi care urmează unei nopți cu consum ridicat, în care bateria a fost utilizată până la limita sa inferioară. Acumulatorii la ora 00:00 sunt descărcați complet, pentru a vedea cum se comportă într-un ciclu complet.

Comportamentul sistemului în această configurație este ilustrat în figurile 3.3 și 3.4.

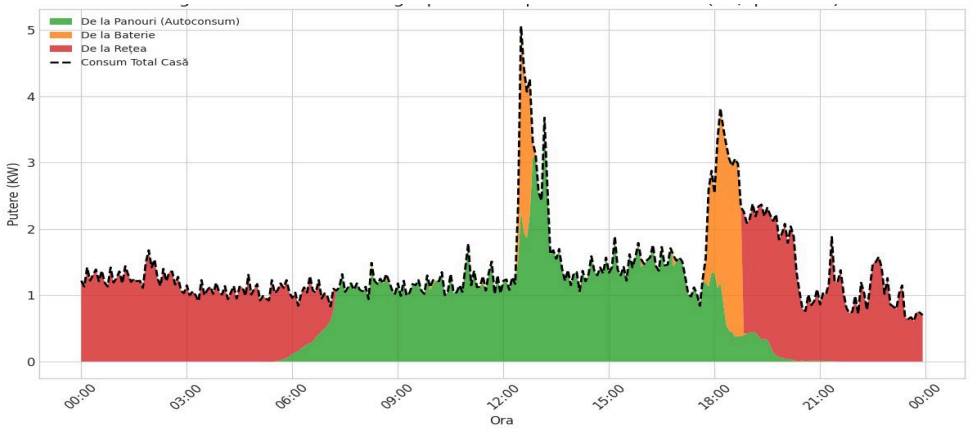


Fig. 3.3. Surse de energie pentru acoperirea consumului (S3, ipoteza 1)

Figura 3.3. descompune consumul total al locuinței (linia neagră punctată) în funcție de sursa de proveniență a energiei. Se poate observa cum, în timpul zilei, consumul este acoperit preponderent de energia solară (suprafața verde). În intervalul de seară și noapte, sistemul utilizează energia stocată în acumulator (suprafața portocalie), diminuând necesarul de la rețea (suprafața roșie) până la epuizarea rezervei stocate.

Figura 3.4. prezintă ciclul de încărcare-descărcare al acumulatorului. Se observă cum starea de încărcare, pornind de la zero, crește în intervalul de producție fotovoltaică excedentară, atingând un maxim de 3.21 kWh.

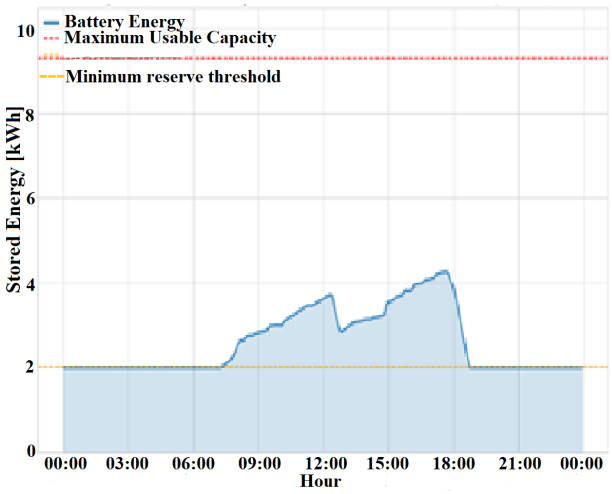


Fig. 3.4. Evoluția stării de încărcare a acumulatorilor (S3, ipoteza 1)

b) Ipoteza 2: Sistem de stocare încărcat inițial

Această a doua ipoteză evaluează performanța sistemului pornind dintr-o stare de disponibilitate energetică maximă. La ora 00:00, acumulatorii sunt încărcați în procent de 100%, având 10 kWh stocați. Se presupune că, la începutul zilei de referință (ora 00:00), sistemul de stocare este complet încărcat (stare de încărcare, SoC = 93,12%), având o rezervă de 9,312 kWh. Un astfel de scenariu este relevant în urma unei zile precedente cu producție solară ridicată și consum redus.

Comportamentul sistemului este substanțial diferit în această ipoteză, așa cum se observă în figurile 3.4. și 3.5.

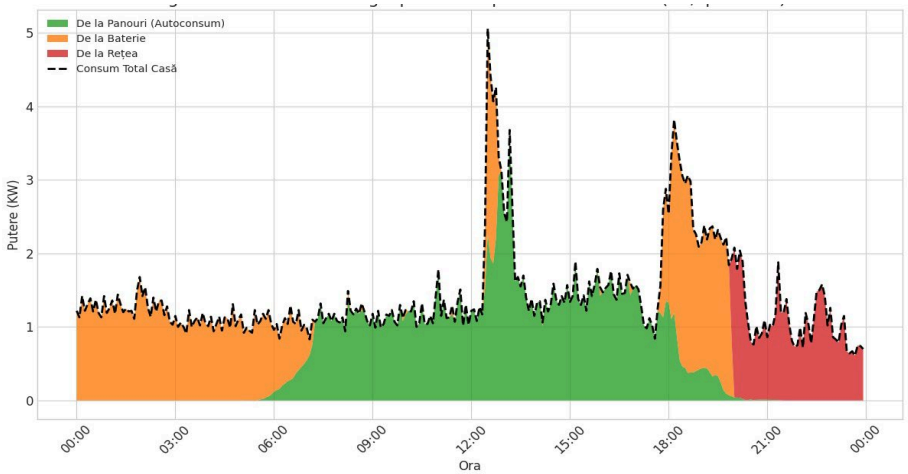


Fig. 3.5. Surse de energie pentru acoperirea consumului (S3, ipoteza 2)

Figura 3.5. ilustrează un beneficiu major: încă de la miezul nopții, consumul este acoperit integral de energia stocată în acumulator (suprafața portocalie). Dependența de rețea se manifestă doar spre finalul zilei.

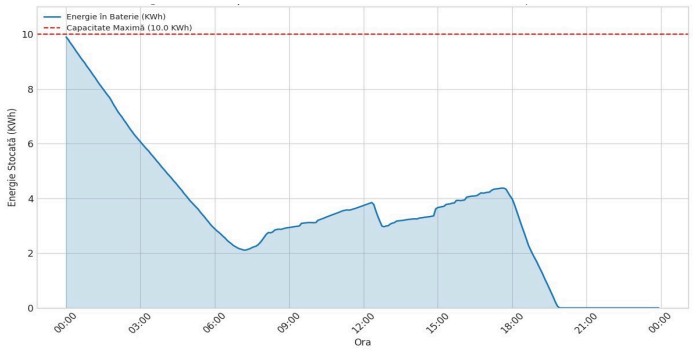


Fig. 3.6. Evoluția stării de încărcare a acumulatorilor (S3, Ipoteza 2)

Ciclul de viață al bateriei, prezentat în Figura 3.6., este distinct. Pornind de la 9,312 kWh, bateria se descarcă pentru a acoperi consumul nocturn. În timpul perioadei de producție solară maximă, starea de încărcare rămâne constantă la un nivel intermediar.

În concluzie, pornirea de la o stare de încărcare completă maximizează independența energetică a sistemului, reducând semnificativ costurile cu energia importată din rețea.

c) Ipoteza 3: Sistem de stocare în regim de rezervă (75%)

Această ipoteză analizează o strategie de management energetic conservatoare, în care prioritatea nu este maximizarea economiilor zilnice, ci asigurarea unei rezerve strategice de energie pentru situații neprevăzute și prelungirea duratei de viață a acumulatorilor. Acumulatorii sunt încărcați în permanență la 75%, fiind utilizați în sistem de backup al casei. Se impun două constrângeri de funcționare:

- **Limita superioară de încărcare:** Acumulatorul nu se poate încărca peste **93.12%** din capacitatea sa nominală, atingând un maxim de **9.312 kWh.**
- **Limita inferioară de descărcare:** Sistemul de stocare nu trebuie să se descarce sub un prag de 75% din capacitatea maximă utilizabilă.

Comportamentul sistemului, sub aceste noi reguli, este simulat și prezentat în figurile 3.6. și 3.7.

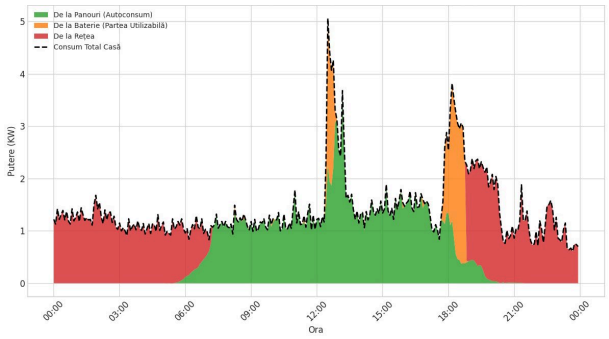


Fig. 3.7. Sursele de energie pentru acoperirea consumului (S3, Ipoteza 3)

Figura 3.7. descompune sursele de energie care acoperă consumul. Se remarcă o contribuție mult mai redusă a bateriei (suprafața portocalie), care intervine pentru o perioadă scurtă de timp seara. În consecință, dependența de rețea (suprafața roșie) este semnificativ mai mare, acoperind atât consumul nocturn, cât și pe cel din prima parte a dimineții.

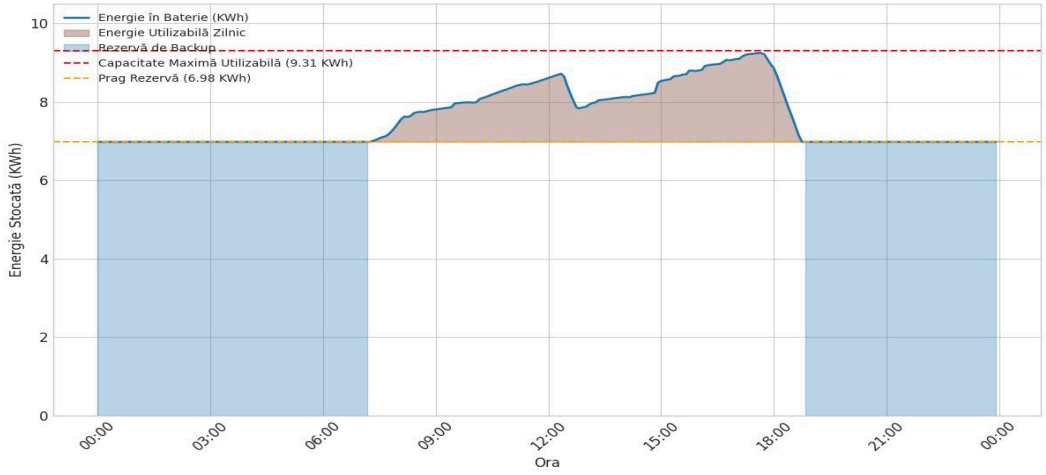


Fig. 3.8. Evoluția stării de încărcare a acumulatorului (S3, Ipoteza 3)

Figura 3.8. este cea mai elocventă pentru această strategie. Aceasta arată cum nivelul de energie din baterie (linia albastră) fluctuează doar în partea superioară a capacității. Bateria se încarcă în timpul zilei până la limita sa maximă de 9.312 kWh, iar seara se descarcă, dar nu mai jos de pragul de siguranță de 6.984 kWh (linia portocalie punctată), care este păstrat intact.

În concluzie, operarea sistemului de stocare într-un regim de rezervă reprezintă un compromis conștient între optimizarea economică zilnică și reziliența energetică.

3.4. Maximizarea autoconsumului prin controlul consumatorilor (controlul activ al sarcinilor)

Acest al patrulea scenariu reprezintă o evoluție conceptuală și tehnologică fundamentală față de strategiile de stocare pasivă a energiei, analizate în detaliu în secțiunile anterioare. *Ipotezele de la punctul 3.4.* explorează o paradigmă superioară: managementul activ al sarcinii (eng. Demand-Side Management - DSM).

Obiectivul strategic al acestui scenariu este de a valorifica la maxim producția fotovoltaică instantanee, în special în momentele de vârf, când generarea depășește atât consumul de bază al locuinței, cât și capacitatea de absorbție a sistemului de stocare. În loc ca acest surplus energetic să fie pierdut acesta este direcționat în mod proactiv către sarcini controlabile, dar non-esențiale. În contextul acestui studiu, aceste sarcini sunt reprezentate de cele două sisteme de aer condiționat (AC1 și AC2).

Pentru a asigura o analiză riguroasă și relevantă, simularea se bazează pe un set de parametri și ipoteze tehnice bine definite, derivate atât din documentația sistemului, cât și din standardele industriei.

- **Definirea Sarcinii Controlabile (sisteme de aer condiționat):**

Logica de control, așa cum este descrisă în arhitectura sistemului, utilizează praguri de putere fotovoltaică pentru a declanșa funcționarea sistemelor de aer condiționat. Pe baza acestor praguri și a datelor din industrie, s-a stabilit consumul de putere nominal al acestor sarcini. Atunci când ambele unități funcționează simultan, sarcina totală adăugată sistemului este de 3.0 kW.

Corelarea tensiunii bateriei cu starea de încărcare (SoC):

Logica de control originală, implementată în controlerul Wiser for KNX, include o condiție de siguranță esențială: pornirea sistemelor de aer condiționat este permisă doar dacă tensiunea bancului de acumulatori depășește anumite praguri (50 V pentru AC1 și 52 V pentru AC2). Această regulă protejează integritatea și durata de viață a bateriei, prevenind ciclurile de descărcare adâncă pentru a alimenta sarcini de putere mare, non-critice. Setul de date utilizat pentru simulare, extras din logger-ul sistemului, nu conține înregistrări ale tensiunii la intervale de 5 minute, ci doar starea de încărcare (SoC) calculată.

a) Ipoteza 1: Optimizare economică prin utilizarea integrală a capacității de stocare

Prima ipoteză *de la punctul 3.4.* analizează o strategie de management energetic orientată spre maximizarea eficienței economice și a autoconsumului zilnic. Obiectivul este de a reduce la minimum dependența de rețeaua electrică prin utilizarea integrală a resurselor locale: energia fotovoltaică și întreaga capacitate de ciclu a sistemului de stocare. În această configurație, bateria operează în plaja sa completă, între starea minimă de încărcare (SoC Min) de 20% și cea maximă (SoC Max) de 93,12%. Surplusul de energie, odată ce bateria este complet încărcată sau în momentele de producție foarte mare, este deviat către pornirea automată a aparatelor de aer condiționat.

a.1) Descrierea și analiza comportamentului sistemului

Analiza dinamică a fluxurilor energetice pentru ziua de referință, 28.07.2025, relevă un comportament complex și eficient al sistemului. La începutul zilei (ora 00:00), se presupune că sistemul de stocare se află la nivelul său minim de operare (20% SoC, echivalentul a 2,0 kWh), simulând o zi care urmează unei nopți cu consum ridicat.

- **Intervalul nocturn și matinal (00:00 - 07:15):** În absența producției solare, întregul consum de bază al locuinței este acoperit exclusiv de la rețeaua electrică publică. Bateria rămâne la pragul său de protecție de 2,0 kWh.
- **Faza de încărcare inițială (07:15 - 10:45):**

Odată cu răsăritul soarelui, producția fotovoltaică începe să crească. Inițial, aceasta acoperă direct consumul de bază al locuinței (autoconsum direct). Pe măsură ce producția depășește consumul, surplusul de putere este direcționat către încărcarea acumulatorului. Rata de încărcare este vizibilă în panta ascendentă a curbei SoC.

- **Activarea primei trepte de management al sarcinii (10:45 - 12:45):**

La ora 10:45, sunt îndeplinite simultan cele două condiții pentru pornirea primului aparat de aer condiționat. Activarea AC1 adaugă o sarcină constantă de 1,5 kW la consumul de bază al casei. Sistemul prioritizează inteligent confortul termic în detrimentul unei încărcări ultra-rapide a acumulatorului.

- **Activarea treptei a doua și maximizarea autoconsumului (12:45 - 14:50):**

În meridianul zilei, producția fotovoltaică atinge apogeul. La ora 12:45, puterea generată depășește pragul superior de 3000 W, iar bateria, continuând să se încarce, depășește pragul de 50% SoC. Aceste condiții declanșează pornirea celui de-al doilea aparat de aer condiționat (AC2), adăugând încă 1,5 kW la consumul total. În acest interval, consumul total al locuinței (bază + AC1 + AC2) ajunge la valori de peste 4-5 kW, urmărind îndeaproape curba de producție fotovoltaică. Aceasta este demonstrația practică a succesului strategiei de "load shifting".

Faza de decelerare și stocare finală (14:50 - 18:30): Pe măsură ce soarele coboară pe cer, producția PV scade. Unitatea AC2 se oprește prima, urmată de AC1, pe măsură ce pragurile de putere nu mai sunt îndeplinite.

Descărcarea nocturnă (18:30 - 23:55): După apusul soarelui, consumul de bază al locuinței este acoperit integral de energia stocată în acumulator. Acesta se descarcă treptat pe parcursul serii și al nopții pentru a asigura autonomia energetică.

a.2) Reperezentare grafica

Comportamentul complex al sistemului în această ipoteză este cel mai bine ilustrat printr-o serie de grafice care descompun fluxurile de putere și evoluția stării de încărcare.

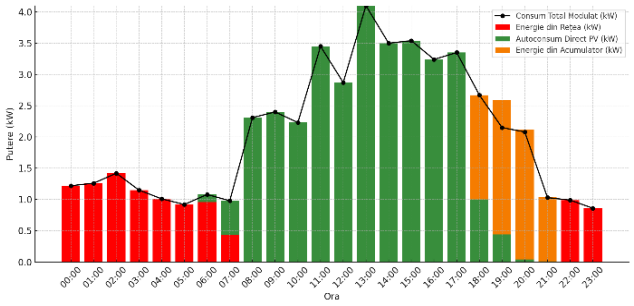


Fig. 3.9. Descompunerea sursei de energie pentru consumul total (S4, Ipoteza 1)

Acest grafic de tip arie suprapusă (fig. 3.9) arată sursele de energie care acoperă consumul total al locuinței (linia neagră punctată), care include acum atât sarcina de bază, cât și consumul variabil al aparatelor de aer condiționat. Suprafața verde reprezintă energia fotovoltaică autoconsumată direct, care domină pe parcursul zilei. Suprafața portocalie indică energia descărcată din acumulator, care acoperă consumul de seară și de noapte. Suprafața roșie, reprezentând energia absorbită de la rețea.

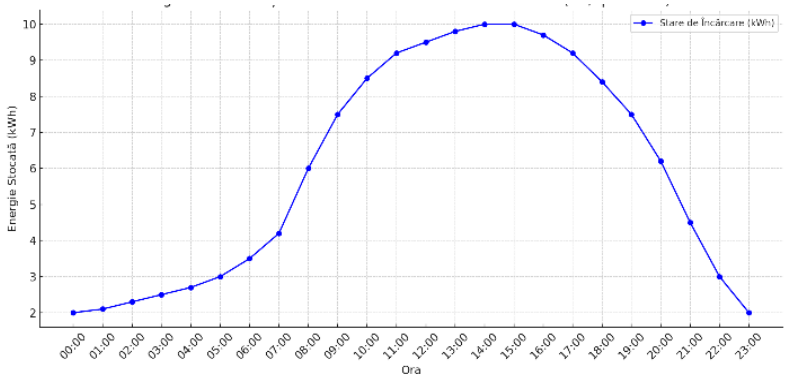


Fig. 3.10. Evoluția Stării de Încărcare a Acumulatorului (S4, Ipoteza 1)

Acest grafic liniar (fig. 3.10) prezintă evoluția energiei stocate în acumulator (în kWh) pe parcursul celor 24 de ore.

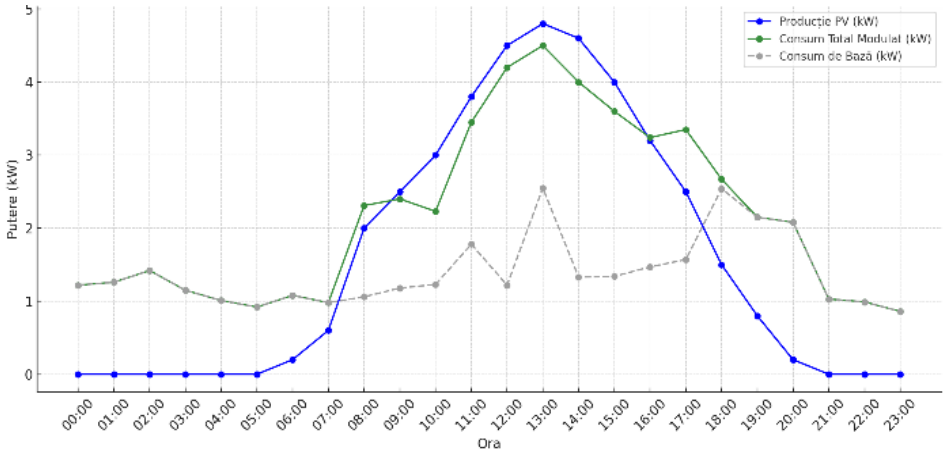


Fig. 3.11. Alinierea Consumului cu Producția prin Control Activ (S4, Ipoteza 1)

Aceasta este figura centrală (fig. 3.11) care validează conceptul de management activ al sarcinii. Sunt suprapuse trei curbe de putere: producția fotovoltaică (albastru), consumul de bază al locuinței (gri punctat) și noul consum total, modulat de sistemul de control (verde).

a.3) Analiza cantitativă și interpretarea rezultatelor

Pentru a evalua riguros performanța acestei strategii, au fost calculați indicatorii energetici cheie pentru întreaga zi de referință. Rezultatele sunt centralizate în tabelul de mai jos 3.1.

Tabelul 3.1. Indicatori de performanță energetică (S4, Ipoteza 1)

Indicator	Unitate	Valoare Calculată
Energie Totală Consumată (Bază + AC)	kWh	46.55
Energie PV Autoconsumată Direct	kWh	17.58
Energie Încărcată în Acumulator	kWh	1.89
Energie Descărcată din Acumulator	kWh	1.89
Energie Absorbită de la Rețea	kWh	27.08
Energie Excedentară Pierdută	kWh	0.00
Grad de Independență Energetică	%	41.83

Interpretarea acestor date oferă o imagine nuanțată a compromisurilor implicate. În primul rând, succesul strategiei este confirmat de indicatorul Energie Excedentară Pierdută, care este de 0.00 kWh. Acest lucru demonstrează că sistemul a reușit să valorifice integral cei 19.47 kWh de energie solară produși.

Un aspect critic este impactul asupra sistemului de stocare. Doar 1.89 kWh din surplusul fotovoltaic au fost stocați în acumulator. Aceasta este o cantitate semnificativ mai mică decât surplusul total disponibil (3.21 kWh în Ipoteza 2), deoarece restul a fost consumat de aparatele de aer condiționat.

În final, Gradul de Independență Energetică este de 41.83%. Deși pare un procent modest, acesta trebuie interpretat în contextul unui consum total mult mai mare. Această ipoteză nu maximizează independența în sens absolut, ci optimizează utilizarea resurselor locale pentru a satisface o cerere de energie crescută (confort termic).

b) Ipoteza 2: Prioritizarea Rezilienței prin Menținerea unei Rezerve de Energie de 75%

A doua ipoteză analizează o strategie de management energetic conservatoare, în care obiectivul principal nu este optimizarea economică zilnică, ci asigurarea unui nivel ridicat de reziliență și siguranță energetică. Această abordare prioritizează menținerea unei rezerve

strategice de energie în acumulatori pentru a face față unor eventuale întreruperi ale rețelei electrice sau unor zile consecutive cu producție solară redusă.

Pentru a atinge acest obiectiv, logica de control impune o constrângere fundamentală: sistemul de stocare nu are voie să se descarce sub un prag de 75% din capacitatea sa maximă utilizabilă.

b.1) Descrierea și analiza comportamentului sistemului

Comportamentul sistemului sub această nouă regulă de operare este substanțial diferit, evidențiind un compromis fundamental între siguranță și eficiență. Se presupune că sistemul pornește ziua cu bateria la capacitatea sa maximă, 9,312 kWh.

- **Intervalul nocturn și matinal (00:00 - 07:15):** Consumul de bază al locuinței este acoperit prin descărcarea acumulatorului. Totuși, descărcarea se oprește în jurul orei 03:00, când nivelul de energie atinge pragul de rezervă de 6,984 kWh. Din acest moment și până la răsăritul soarelui, întregul consum este preluat de rețeaua electrică, pentru a păstra intactă rezerva strategică.
- **Faza de încărcare rapidă și saturație (07:15 - 10:45):** Odată cu apariția producției solare, surplusul energetic (după acoperirea consumului de bază) este direcționat către încărcarea bateriei. Deoarece plaja de operare disponibilă este foarte mică (doar 2,328 kWh), bateria atinge starea sa maximă de încărcare (9,312 kWh) foarte devreme în cursul zilei, în jurul orei 10:30. Din acest moment, sistemul de stocare este saturat și nu mai poate absorbi niciun surplus de energie.
- **Managementul surplusului prin sarcini active (10:45 - 15:00):** Sistemul se bazează acum exclusiv pe pornirea aparatelor de aer condiționat pentru a valorifica surplusul de producție fotovoltaică. AC1 și AC2 pornesc secvențial
- **Apariția energiei pierdute**: O provocare majoră a acestei strategii apare în intervalul de producție maximă (aproximativ 12:45 - 14:55). În acest interval, puterea generată de panourile fotovoltaice depășește consumul total al locuinței, chiar și cu ambele aparate de aer condiționat funcționând la capacitate maximă (consum total de bază + 3,0 kW). Deoarece bateria este deja plină și nu mai poate acționa ca un buffer, acest excedent de putere nu poate fi nici stocat, nici consumat. Prin urmare, acesta este considerat energie pierdută.
- **Faza de seară și noapte** (după 18:30): După apus, sistemul începe să descarce bateria pentru a acoperi consumul. Însă, la fel ca la începutul zilei, descărcarea se oprește odată ce se atinge pragul de 75%, iar rețeaua preia alimentarea pentru restul nopții.

b.2) Reprezentare Grafică

Diferențele de comportament induse de strategia de rezervă sunt clar vizibile în reprezentările grafice.

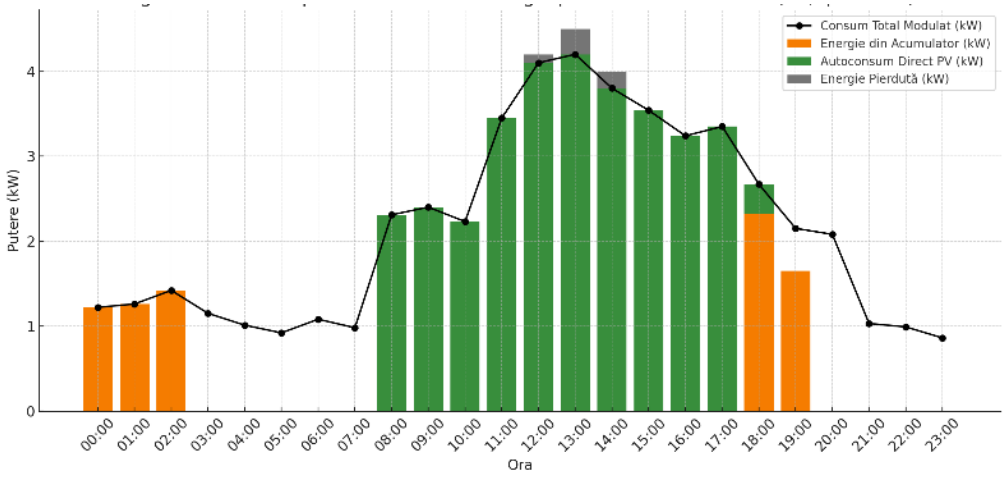


Fig. 3.12. Descompunerea sursei de energie pentru consumul total (S4, Ipoteza 2)

Graficul 3.12. arată o dependență mult mai mare de rețeaua electrică (suprafața roșie) în timpul nopții, deoarece contribuția bateriei (suprafața portocalie) este intenționat limitată.

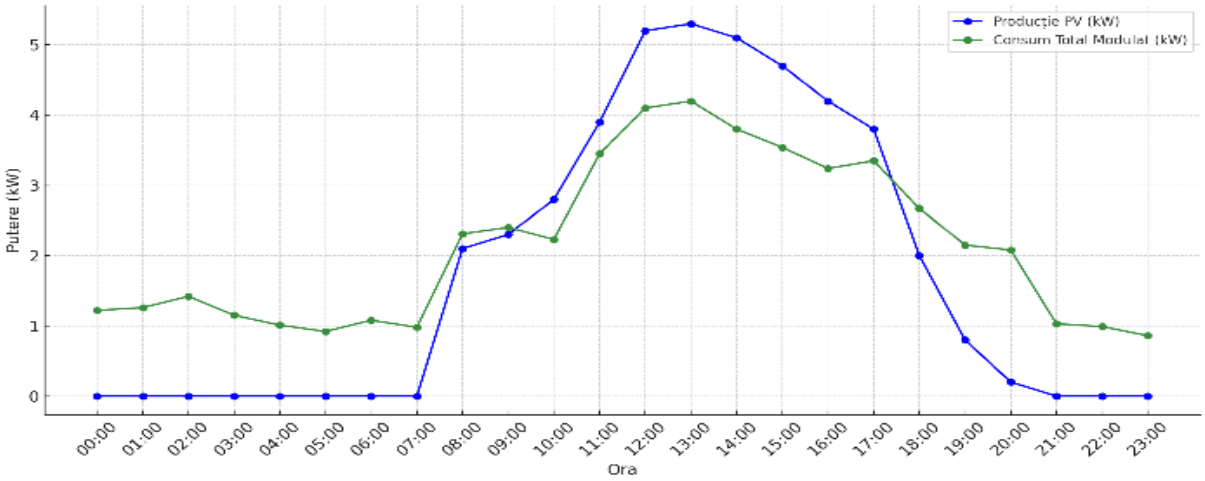


Fig. 3.13. Alinierea și depășirea consumului de către producție (S4, Ipoteza 2)

Similar cu figura 3.12. graficul din figura 3.13 compară producția PV (albastru) cu consumul total (verde).

b.3) Analiza cantitativă și interpretarea rezultatelor

Analiza cantitativă confirmă compromisurile observate în analiza calitativă. "Costul" asigurării rezilienței este cuantificabil în termeni de eficiență energetică și dependență de rețea.

Tabelul 3.2. Indicatori de performanță energetică (S4, Ipoteza 2)

Indicator	Unitate	Valoare Calculată
Energie Totală Consumată (Bază + AC)	kWh	46.55
Energie PV Autoconsumată Direct	kWh	16.52
Energie Încărcată în Acumulator	kWh	2.33
Energie Descărcată din Acumulator	kWh	2.33
Energie Absorbită de la Rețea	kWh	27.70
Energie Excedentară Pierdută	kWh	0.62
Grad de Independență Energetică	%	40.50

Primul și cel mai important rezultat este reapariția Energiei Excedentare Pierdute, care se ajunge la 0.62 kWh.

Energia Absorbită de la Rețea este de 27.70 kWh, o valoare ușor mai mare decât în ipoteza precedentă. Aceasta se datorează faptului că, deși rezerva de 75% a fost disponibilă, aceasta nu a fost utilizată, iar sistemul a trebuit să apeleze la rețea pentru a acoperi deficitul nocturn.

În consecință, Gradul de Independență Energetică scade la **40.50%.**

b.4) Analiză comparativă și recomandări strategice

Analiza detaliată a celor două ipoteze *de la punctul 3.4*., completată cu rezultatele cazurilor anterioare, permite o evaluare comparativă completă a diferitelor strategii de management energetic.

Sinteza comparativă

Tabelul de mai jos centralizează indicatorii de performanță cheie pentru cele mai relevante cazuri studiate, de la configurația de bază fără stocare, la strategiile avansate de stocare și control activ al sarcinilor.

Tabelul 3.3.: Sinteza comparativă a cazurilor de management energetic

Indicator	C2 (Fără Stocare)	C3, Ip.1 (Stocare 100%)	C3, Ip. 3 (Stocare 75% Rezervă)	C4, Ip. 1 (Control AC + Stocare 100%)	C4, Ip. 2 (Control AC + Stocare 75% Rezervă)
Energie Absorbită de la Rețea (kWh)	17.64	14.42	15.31	27.08	27.70
Energie Pierdută (kWh)	3.21	**0.00**	0.88	**0.00**	0.62
Grad de Independență (%)	47.96%	**57.45%**	54.84%	41.83%	40.50%
Consum Total (kWh)	33.90	33.90	33.90	46.55	46.55

- **Analiza comparativă a acestor date relevă câteva concluzii esențiale:**

1. **Impactul Stocării**: Trecerea de la punctul 3.2. (fără stocare) la punctul 3.3, Ipoteza 1 (stocare 100%) reprezintă cel mai mare salt de performanță. Energia pierdută este complet eliminată (de la 3.21 kWh la 0.00 kWh), energia absorbită de la rețea scade cu peste 3 kWh, iar gradul de independență crește cu aproape 10 puncte procentuale. Aceasta demonstrează că integrarea unui sistem de stocare este cea mai eficientă primă măsură pentru optimizarea unui sistem fotovoltaic off-grid.
2. **Compromisul rezervă vs. eficiență**: Comparând 3.3, Ip. 1 cu 3.3, Ip. 3 (și 3.4, Ip. 1 cu 3.4., Ip. 2), se observă clar "costul" menținerii unei rezerve. În ambele cazuri, strategia de rezervă de 75% reintroduce pierderi de energie (0.88 kWh și, respectiv, 0.62 kWh) și crește dependența de rețea, reducând gradul de independență.
3. **Impactul managementului activ al sarcinii (DSM):** punctul 3.4, deși elimină pierderile de energie în Ipoteza 1, crește semnificativ consumul total (de la 33.90 kWh la 46.55 kWh) și, implicit, dependența de rețea pentru acoperirea consumului nocturn.
4. **Sinergia și ineficiența:** Cea mai puțin performantă strategie avansată este la punctul 3.4. Ip. 2 (Control AC + Rezervă 75%). Aceasta combină dezavantajele ambelor abordări: un consum total ridicat datorită AC-urilor și o capacitate redusă de a gestiona surplusul datorită rezervei.

Recomandări Strategice

Pe baza acestei analize comparative, se pot formula recomandări clare, adaptate la profilul și prioritățile utilizatorului final:

- Pentru optimizare economică și maximizarea autoconsumului: Strategia optimă este cea de la punctul 3.4, Ipoteza 1 (Control AC + Stocare 100%). Această abordare asigură că fiecare watt-oră produs de sistemul fotovoltaic este fie consumat direct, fie stocat, fie utilizat pentru confort termic, eliminând complet pierderile.
- Pentru reziliență și autonomie maximă: Strategia recomandată este cea de la punctul 3.3, Ipoteza 1 (stocare 100%).
- Pentru un echilibru între siguranță și cost: O abordare hibridă, care nu a fost simulată, dar poate fi implementată de sistemul KNX, ar putea implica o rezervă dinamică.

În concluzie, studiul demonstrează că nu există o singură strategie universală "perfectă". Soluția optimă este dependentă de context și de obiectivele specifice ale utilizatorului.

3.5. Concluzii la capitol

Aplicarea soluțiilor **SMART KNX** la monitorizare sistemelor fotovoltaice demonstrează cu succes fezabilitatea și eficiența integrării unor invertoare off-grid fără interfețe de comunicare native într-un sistem de management energetic avansat, bazat pe standardul KNX. Prin utilizarea unei rețele de senzori externi Modbus și a logicii flexibile oferite de controlerul Wiser for KNX, s-a realizat o soluție de automatizare robustă și performantă.

Algoritmul de control implementat gestionează în mod inteligent consumatorii pe baza producției de energie în timp real și a stării de încărcare a acumulatorilor, asigurând maximizarea autoconsumului și protejarea componentelor critice ale sistemului.

Interfața SCADA dezvoltată în Wiser for KNX oferă o vizualizare centralizată și profesională, specifică sistemelor de automatizare a clădirilor. Această abordare se distinge prin gradul ridicat de integrare și robustețe, în comparație cu alte soluții de vizualizare, cum ar fi aplicațiile pentru dispozitive mobile sau portalurile web personalizate dezvoltate pe platforme open-source, care, deși flexibile, pot necesita un efort mai mare de dezvoltare și întreținere. Capacitatea de a afișa simultan starea consumatorilor, producția pe fiecare string și parametrii bateriei într-o singură interfață HMI (Human-Machine Interface) validează eficiența platformei KNX ca un centru de comandă complet pentru managementul energetic rezidențial.

4. MONITORIZAREA PARAMETRILOR ELECTRICI ȘI TERMICI AI PANOURILOR FOTOVOLTAICE INTEGRATE ÎN FAȚADE VENTILATE

Pentru a realiza un sistem de monitorizare a parametrilor electrici și termici ai unor panouri fotovoltaice termice integrate în fațade ventilate, a fost construit în laborator un stand de cercetare compus din fațada ventilată în care s-au integrat panouri fotovoltaice și simulator solar. Studiu a urmărit mai multe etape:

1. Alegerea și testarea sistemului de iluminat pentru simularea radiației solare.

2. Proiectarea, construcția și testarea simulatorului solar.

3. Execuția și testarea simulatorului hibrid PV/fațadă ventilată.

4. Proiectarea sistemului de achiziții date și integrarea lui în sistemul smart KNX al standului de cercetare.

5. Arhitectura sistemului smart KNX de achiziții date, control automatizare și metode.

6. Cercetare experimentală - panouri fotovoltaice integrate în fațadă ventilată.

Principalul obiectiv al studiului este realizarea unui sistem de monitorizare al panourilor fotovoltaice integrate în fațadă ventilată ce permite vizualizarea în timp real a tuturor parametrilor electrici și termici, ce ulterior pot fi integrați in sistemul BMS al clădirii cu scopul de a crește eficiența energetică a panourilor fotovoltaice cât și valorificarea căldurii acumulate în aceste fațade ventilate.

Pentru cercetare s-a ales temperatura de intrare de 20ºC și s-au creat 6 cicluri de funcționare astfel:

1. Ventilare naturală 1;
2. Ventilare forțată 1;
3. Ventilare naturală 2;
4. Ventilare forțată 2;
5. Ventilare naturală 3;
6. Ventilare forțată 3.

4.1. Alegerea si testarea sitemului de iluminat pentru simularea radiației solare

Simulatoarele solare folosesc atât lămpi fluorescente, cât și corpuri de iluminat cu led ca element principal [h5], [Muhammad2018], [In2020].

În urma unei cercetări de piață și analizei mai multor tipuri de simulatoare solare s-a ales o lampă OSRAM fluorescentă cu vapori de mercur de înaltă presiune, model Ultra Vitalux, aceasta oferind un echilibru, atât din punct de vedere a calității parametrilor, cât și economic, pentru a simula radiația solară. rezoluție spectrală: 1 nm).

4.2. Proiectarea, construcția și testarea simulatorului solar

a) Testarea intensitații radiației luminoase

În prima etapă s-a măsurat distribuția radiației incidente pe contur închis produse de o lampă. S-au pornit măsuratorile din centru, ulterior s-a trecut din partea stânga de la P1 la P8 în sensul acelor de ceasornic și s-a urmat conturul pe diferite diametre de la 10 la 35 cm.

Aceste măsurători au fost efectuate cu ajutorul solarimetrului portabil marca Sonel, model IRM-1. Cu ajutorul acestor măsurători au fost generate hărțile izometrice din figura 4.1, acestea fiind utilizate pentru a stabili poziția lămpilor pe simulatorul solar.

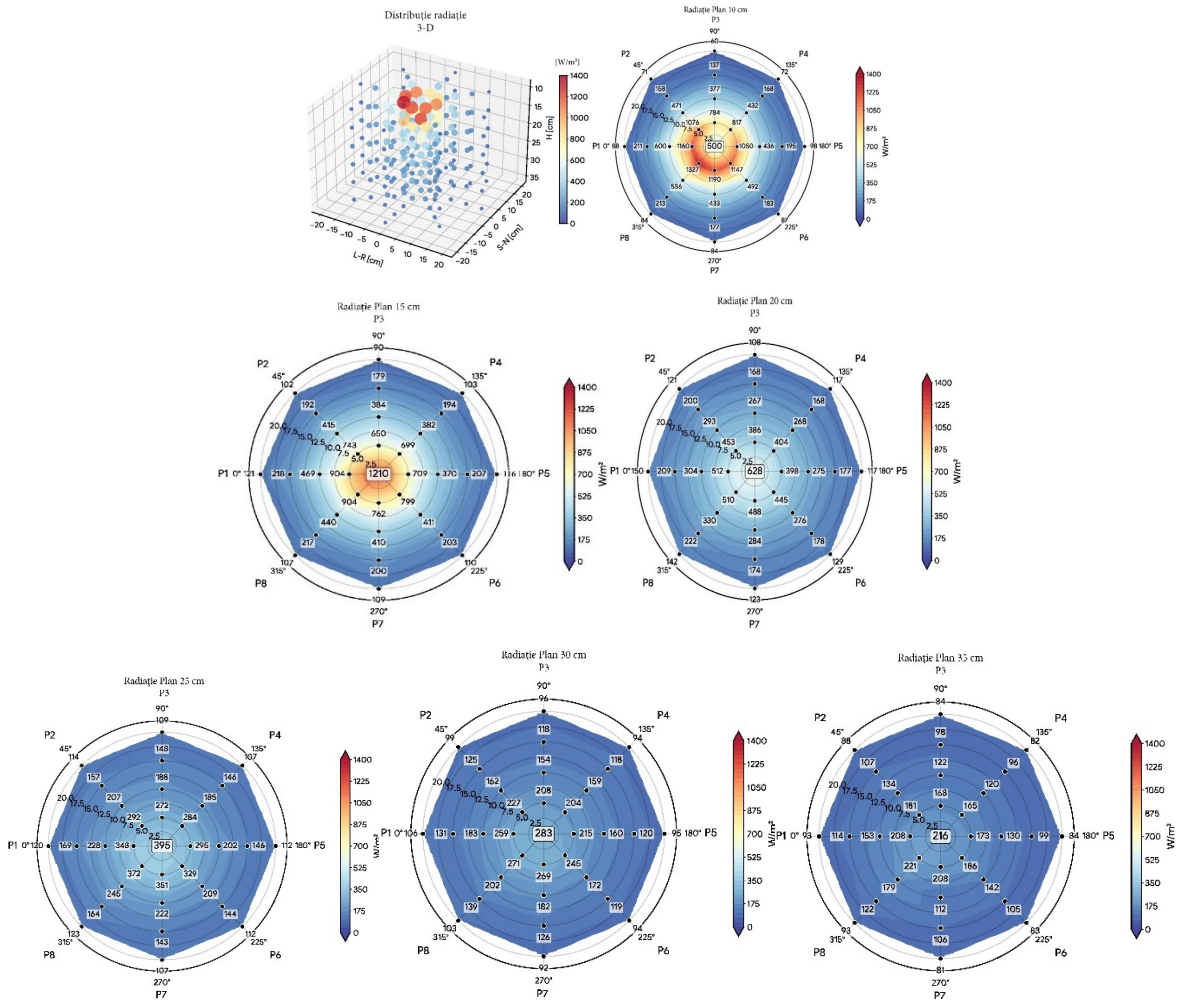
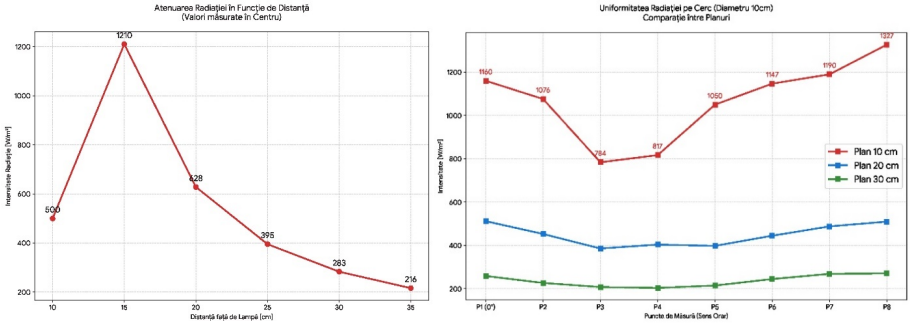


Fig. 4.1. Rezultatele radiației măsurate în funcție de planul și distanța față de centru lămpii

În Figura 4.2. sunt reprezentate graficele unde se poate observa nivelul de iluminare receptat de o suprafață, la diferite distanțe față de lampă.



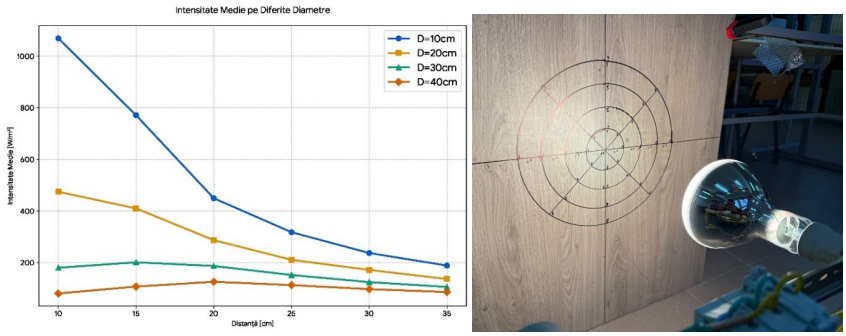


Fig. 4.2. Graficele fluxului luminos emis de lampă

Folosind aceste informații a urmat proiectarea și execuția simulatorului solar.

b) Proiectarea simulatorului solar

Pentru a realiza acest simultor s-a folosit cadrul unui vechi simulator solar utilizat pentru studiul fațadelor ventilate, fiind echipat inițial cu 12 lămpi.

Pentru a proiecta acest simulator s-a folosit Autodesk Autocad fiind utilizată o licența educațională [h13].

c) Execuția simulatorului solar

Vechiul cadru al simulatorului solar era echipat inițial cu 12 lămpi și cablat pentru a fi folosit la o priza normală de 230V. După cum se observă în figura 4.3 a), s-au adăugat încă 9 lămpi ajungând astfel la un simulator ce emite o cantitate de radiație luminoasă mai mare și mai uniformă. Se realizează astfel un simulator solar (conform figurii 4.3 b), d)), capabil sa ilumineze eficient atât panourile fotovoltaice, cât și partea de geam a simulatorului hibrid - fațadă ventilată echipată cu panouri fotovoltaice.

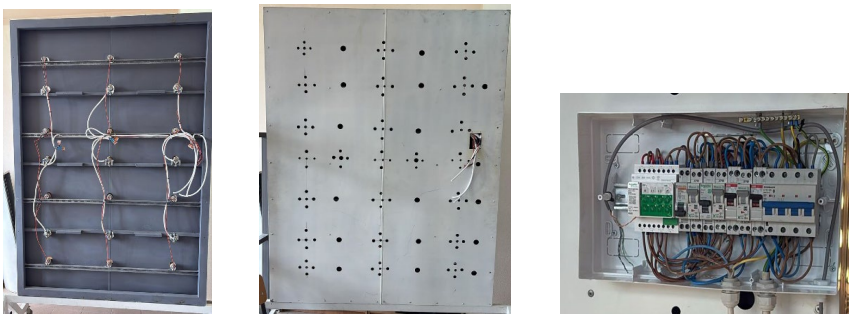


a) b) c) d)

Fig. 4.3. Etape execuție simulator solar: a) simulator vechi, b) simulator nou, c) detaliu lămpi, d) simulator nou cu lămpi pornite

c) Cablarea și comanda iluminatului simulatorului solar

Deoarece curentul inițial I1 = 12,76A a crescut la I2= 29,77A, curent mult mai mare decât cel pe care să îl poată suporta o priza normală de 230V/16A, s-a recablat simulatorul solar de la schema pe 230V pe schema de 400V realizându-se tabloul electric din figura 4.4. c). S-au redistribuit sarcinile pe cele 3 faze și au rezultat astfel P-L1,L2,L3 = 2100W și un curent IL1=IL2=IL3= 9,92A.



a) b) c)

Fig. 4.4. Etape de execuție simulator solar: a) detaliu cablare internă, b) panou spate perforat pentru a permite o ventilare mai bună a cablajului, c) tablou comandă și forță simulator solar

Pentru comanda pornirii iluminatului simulatorului solar, cât și a ventilatorului integrat pe tubulatura evacuării simulatorului hibrid PV-fațadă ventilată s-a utilizat releul smart KNX produs de: Schneider.

Schema întregului ansamblu compus din simulator solar și simulator hibrid PVT/fațadă ventilată este reprezentată în figura 4.5.

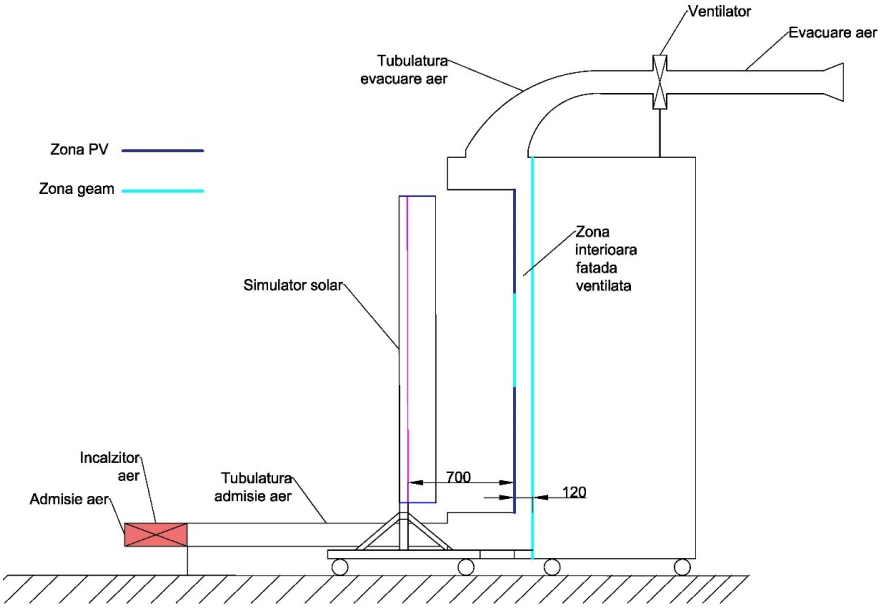


Fig. 4.5. Reprezentare stand de cercetare cu panouri fotovoltaice integrate în fațada ventilată

4.3. Execuția și testarea simulatorului hibrid PV/ fațadă ventilată

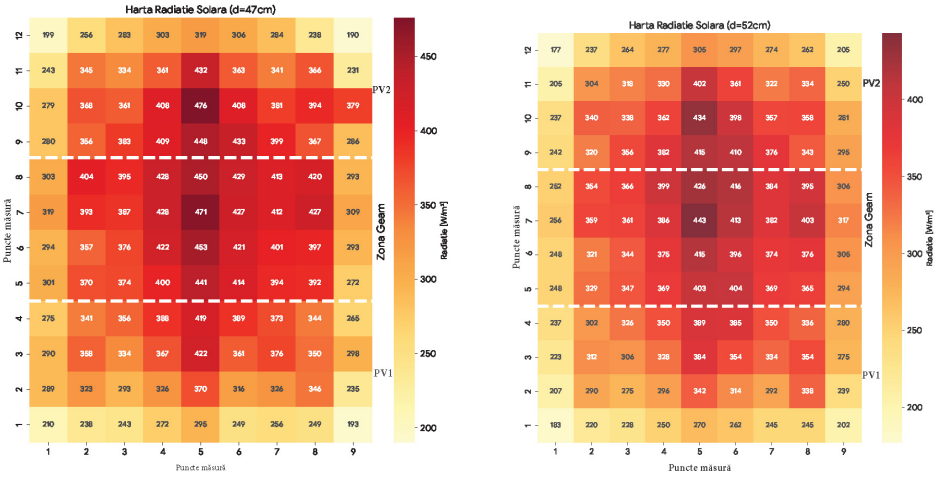
În primă etapa s-a construit un cadru din aluminu cu geam din termopan de dimensiuni 1500 x 610 x 50mm, ce va permite luminii să pătrundă în fațada ventilată simuland o fereastra. Aceasta fereastră a fost încadrată între 2 panouri fotovoltaice produse de Enjoy Solar, model Eco Line ES160P36 [h10].

S-a realizat astfel o secțiune de studiu de fațadă ventilată hibridă, ce prezintă o zonă expusă la radiația simulatorului solar, cu dimensiunile de 150cm lătime x 200cm înălțime, un interspațiu de 12cm și un perete de sticla, în partea din spate ce permite observarea componentelor și senzorilor de temperatură. În partea de jos, pe zona de admisie, au fost montate patru prize de măsură, iar în partea de sus, pe zona de evacuare, patru prize, unde se pot introduce senzorii de viteză ai aerului cu ajutorul unor presetupe PG21.

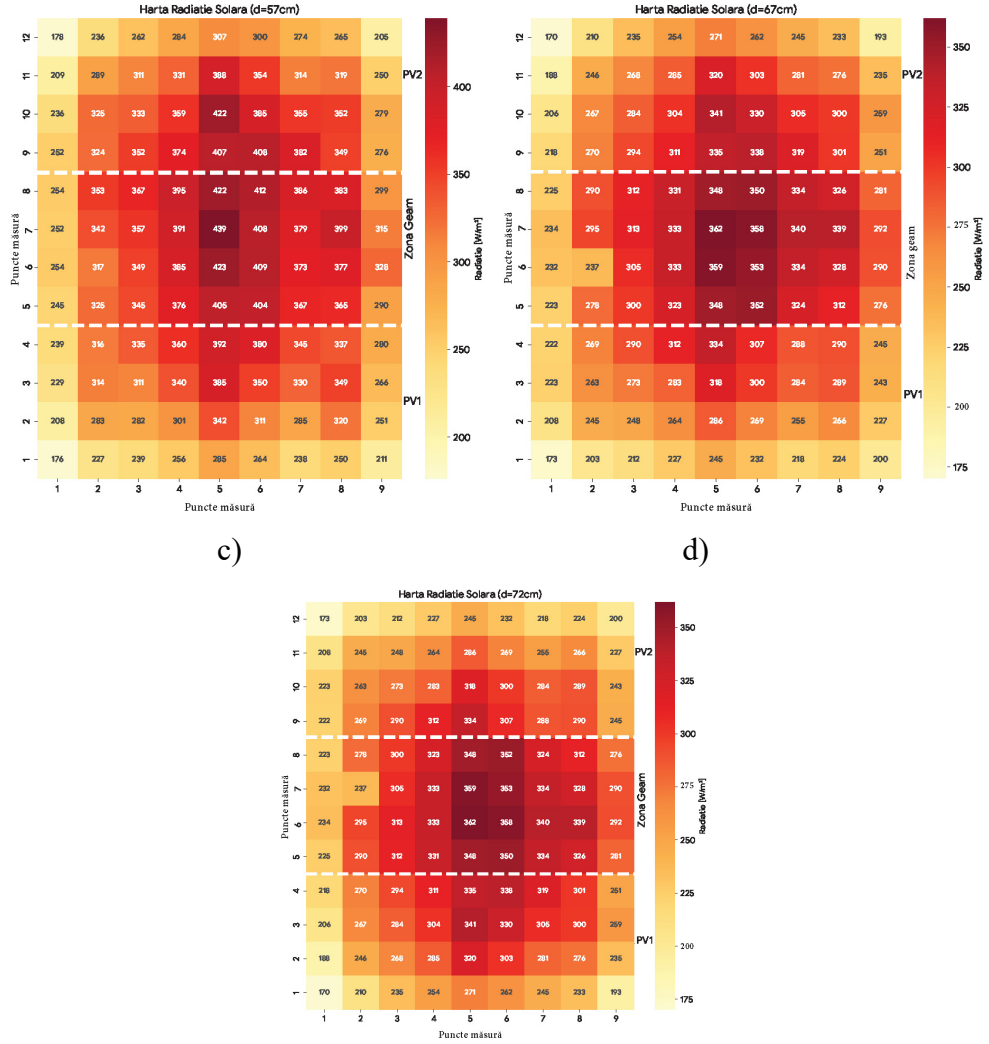
a) Testarea simulatorului hibrid PVT/ fațadă ventilată

Pentru a testa eficiența simulatorului solar pe fatada ventilata, s-a măsurat intensitatea radiației luminoase produsă de lămpi pe întreaga suparafață a fațadei ventilate hibride, respectiv pe cele 12 rânduri și 9 coloane. S-a măsurat intensitatea radiației luminoase în centrul fiecărei celule în parte, obținând astfel 108 puncte de măsură.

S-au efectuat diverse măsurători și s-au convenit următoarele distanțe ale lămpilor față de fațada ventilata hibridă: astfel, pentru d1 = 47 cm, d2 = 52 cm , d3 = 67 cm, d4 = 72 cm, s-au realizat hărți de radiație solară ce pot fi vizualizate în figura 4.6.



a) b)



c) d)

e)

Fig. 4.6. Valorile radiației măsurate la a) d1 = 47 cm, b) d2 = 52 cm, c) d3 = 57, d) d4 = 67 cm, e) d5 = 72 față de simulatorul solar

În figura 4.7, se poate observa graficul variației medii a radiațiilor generate de simulatorul solar și măsurate pe suprafața fațadei hibride în funcție de distanță.

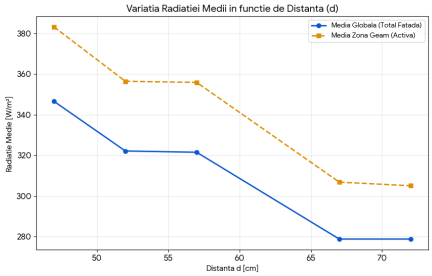


Fig. 4.7. Graficul variației medii a radiațiilor generate de simulatorul solar și măsurate pe suprafața fațadei hibride în funcție de distanță

4.4. Proiectarea sistemului de achiziții date și integrarea lui în sistemul Smart KNX al standului de cercetare

4.4.1. Senzori si aparate utilizate

a) Senzori utilizați și aparate utilizate pentru măsurarea parametrilor termici

Pentru a măsura parametrii term, ici ai standului de cercetare s-au folosit Cameră termoviziune HIKMICRO Pocket2 Termoanemometru Testo 405i, Anemometru cu elice Testo 410 i.

b) Senzori și aparate utilizate pentru a măsura parametrii electrici

Pe durata desfășurării experimentelor s-au utilizat diverse aparate și echipamente pentru a măsura parametrii electrici ai panourilor fotovoltaice integrate în fațada ventilată, respectiv:

- Analizor de rețea monofazat Modbus tip 6M.TA capabil să efectueze măsurători True-RMS pentru C.A. și C.C. [h4].

c) Aparatura de achiziții date

Pentru parametrii termici valorile senzorilor PT1000 au fost înregistrate cu ajutorul următoarelor dispozitive:

- Data Logger MS5D;
  - Data Logger MS6D dotat cu 16 intrări pentru sonde PT1000; la acesta au fost conectate 14 sonde ce monitorizează temperaturile aerului la intrare și ieșire din fațada ventilată (sondele AT1, AT2-AT13), cât și temperatura din laborator conectat la canalul 15. Toate aceste date din aceste Data Logere sunt descărcate într-un calculator pe care este instalat un soft de monitorizare, cu ajutorul căruia se pot urmări în timp real valori. Întreaga arhitectură, modul realizare a conexiunilor și comunicația cu calculatorul sunt prezentate în Figura 4.8.

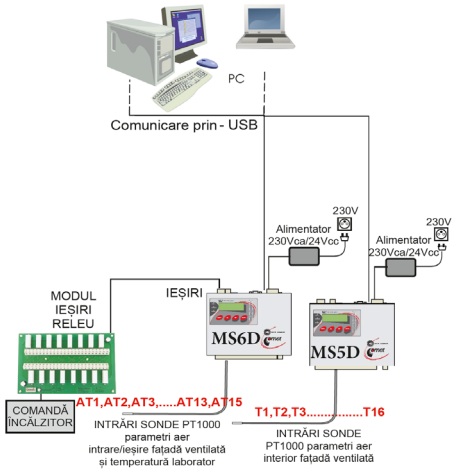


Fig. 4.8. Arhitectura sistemului de monitorizare cu înregistratoare de date MS5D, MS6D

- Controler KNX pentru măsurarea temperaturii cu 8 canale PT1000 produs de Arcus-eds model SK08-T8[h11]. S-

Pentru măsurarea temperaturii din laborator s-a integrat, în sistemul KNX, un termostat KNX produs de MDT, model SCN-RT1GW.01[h12]. Pentru a verifica precizia măsurării temperaturii de acest termostat s-a folosit aparatul de măsură Fluke 743B De asemenea, temperatura din laborator este măsurată și de Data Logger MS6D la care s-a conectat, la canalul 15, o sonda PT1000.

4.4.2. Proiectarea sistemului smart KNX de achiziții date

Proiectarea sistemului de achiziții date Smart KNX a pornit din necesitatea de a colecta date din punctele cheie ale standului de cercetare, posibilitatea de a integra mai multe tipuri de aparate diferite de tip Data Logger în același sistem, de a crea o interfață grafică Scada ce permite vizualizarea tuturor parametrilor, stocarea acestora, vizualizarea de la distanță a acestor, crearea unor funcții smart și comanda de la distanță a anumitor echipamente ale standului de cercetare.

a) Arhitectura generală:

Schema bloc din Figura 4.10. oferă o imagine de ansamblu a întregului sistem de achiziții date Smart KNX. Se poate observa clar rolul fiecărui component, sistemul cuprinzând:

* (5) și (6) controlere KNX de temperatură ce monitorizează temperatura panourilor fotovoltaice PV1 și PV2;
* (7) controler Wiser for KNX, care centralizează toate datele colectate;
* (8) și (9) analizoare de rețea monofazate 50A Modbus ce monitorizează parametrii CC ai panourilor fotovoltaice PV1 și PV2;
* (10) analizor de rețea monofazat Modbus 50A ce monitorizează parametrii CC ai acumulatorilor (15);
* (11) analizor de rețea monofazat Modbus 50A ce monitorizază parametrii CC pe intrarea intrarea invertorului (14);
* (12) analizor de rețea monofazat Modbus 50A ce monitorizază parametrii CA pe ieșirea invertorului (14);
* (18) și (19) Data Logger MS5D și MS6D ce monotorizează temperaturile de admisie, evacuare aer și temperatura interioara a fatadei ventilate;
* (20) termostat KNX MDT ce monitorizează temperatura din laborator.

Valiza sistemului Smart KNX de achiziții date și control (Figura 4.9.) este echipată cu următoarele echipamente:

- Controler MPPT produs de Victron energy, model MPPT 75/15 [h13] .
- Invertor sinusoidal pur produs de Victron energy, model Phonix 24/250 [h11]

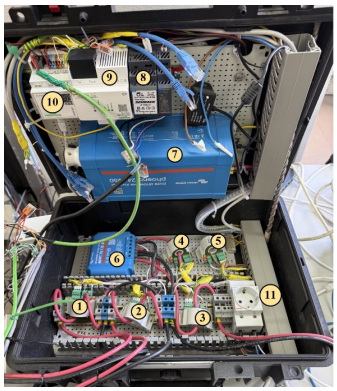


Fig. 4.9. Valiză sistem Smart KNX de achiziții date și control automatizare, complet echipată

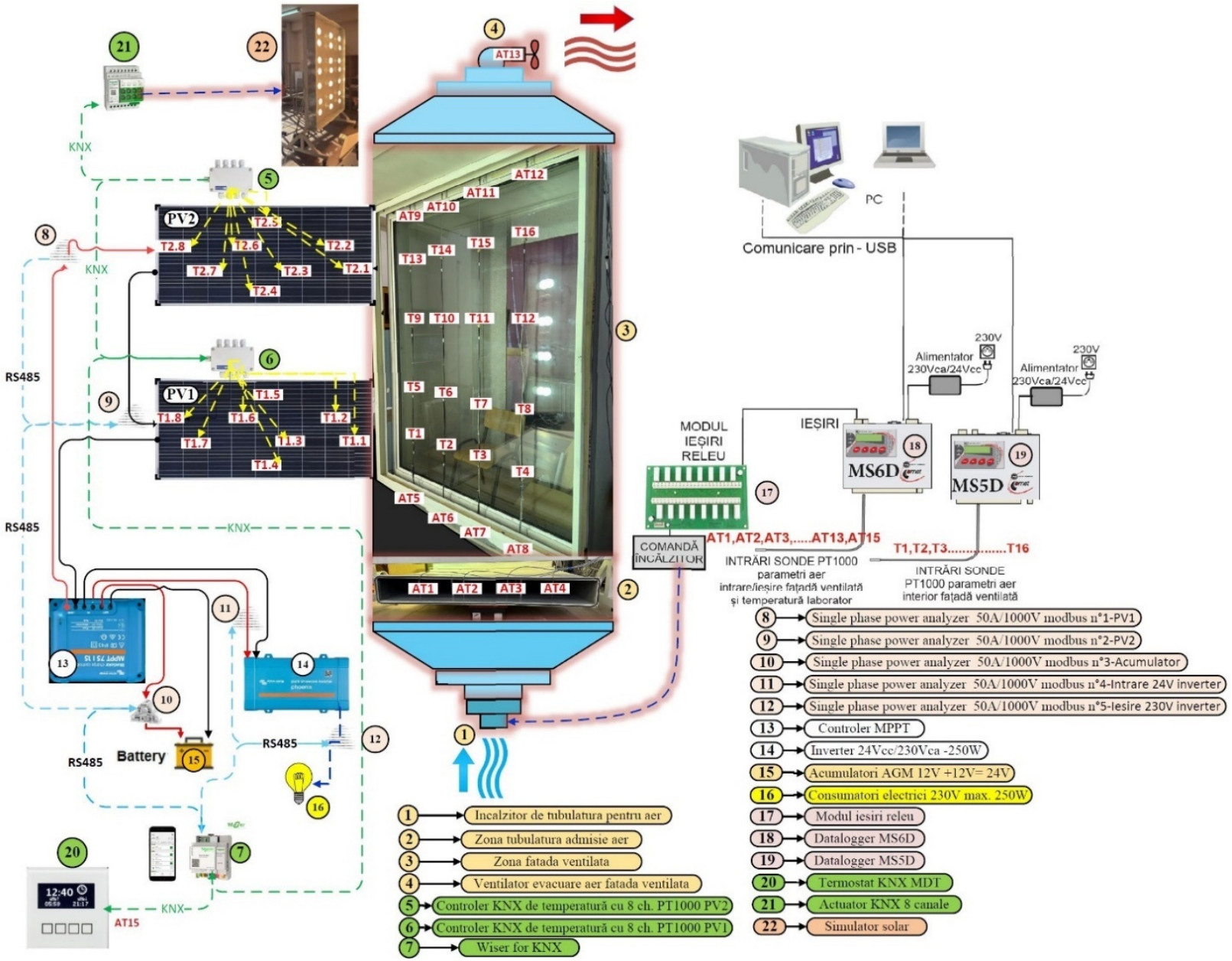


Fig. 4.10. Schema bloc a modului de dispunere a componentelor standului de cercetare

b) Preluarea datelor

Datele de la senzorii externi au fost preluate prin intermediul magistralei RS485 în felul urmator:

- pentru **Monitorizarea C.A.** s-a utilizat un analizor de rețea monofazat (figura 4.29) ce permite citirea parametrilor de curent alternativ prin Modbus. Figura 4.11 detaliază fluxul de date de la analizorul de rețea monofazat.

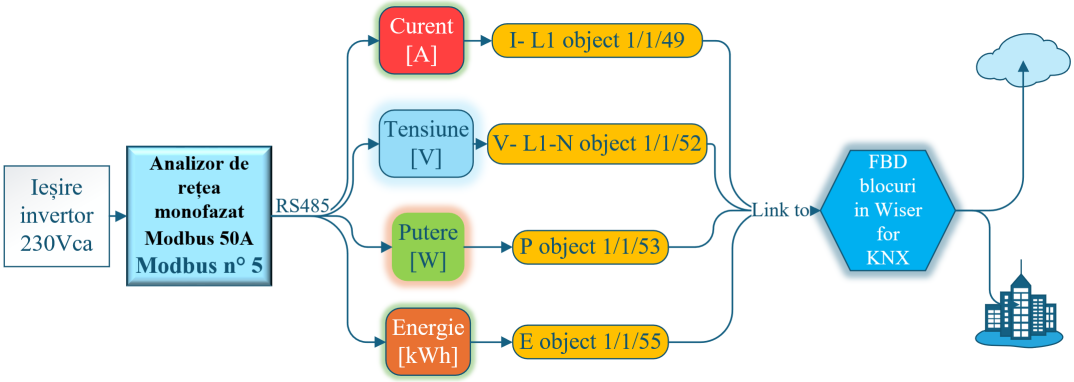


Fig. 4.11. Schema bloc a modului de transmitere date prin RS485 de la analizorul de rețea monofazat de pe ieșire a invertorului și asocierea lor la obiecte KNX

În Figura 4.12. se poate vedea marcat cu (5) analizorul de rețea monofazat și se poate observa cum este montat pe conductoarele ce alimentează priza marcată cu (11) din care se alimentează echipamentele folosite în cercetare.

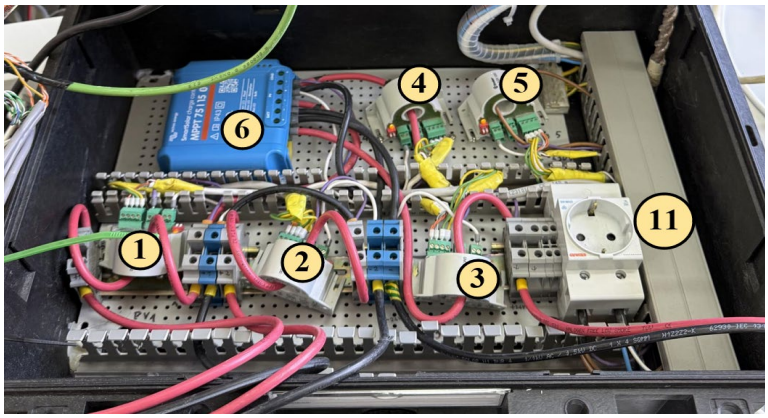


Fig. 4.12. Modul de amplasare a analizoarelor de rețea în valiza de achiziții date

- **Monitorizare C.C.**: pentru a măsura parametrii electrici ai fiecărui panou fotovoltaic PV1, PV2 și starea acumulatorului, s-au folosit analizoare de rețea Finder. În Figura 4.30. se pot identifica:
  - analizorul de putere de tip 6M.TA marcat cu (1) care măsoară parametrii panoului PV1;
  - analizorul marcat cu (2) care măsoară parametrii panoului PV2;

- analizorul marcat cu (3) care măsoară parametrii acumulatorilor;
- analizorul marcat cu (4) care măsoară parametrii de intrare în invertorul marcat cu (7) din Figura 4.12. Tot in figura 4.12. se poate observa modul de instalare fizică a acestora.

Figura 4.13. detaliază modul în care datele de curent continuu de la analizoarele Finder de pe panourile fotovoltaice și acumulator sunt mapate pe obiecte KNX specifice. De exemplu, puterea de la primul panou fotovoltaic PV1 (I-PV1) este asociată obiectului KNX 1/1/1, iar puterea acumulatorului (Pa-obIect) este asociată obiectului 1/1/30.

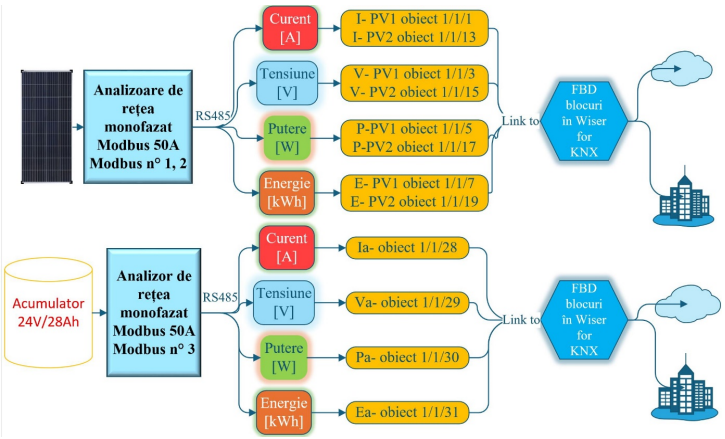


Fig. 4.13. Schema bloc a modului de transmitere date prin RS485 de la analizorul de rețea monofazat de pe panourile PV1 și PV2 și asocierea lor la obiecte KNX

Pentru a măsura parametrii electrici de ieșire ai controlerului MPPT și intrare ai invertorului, s-a folosit analizorul de rețea Finder, care este marcat cu (4) în figura 4.12.

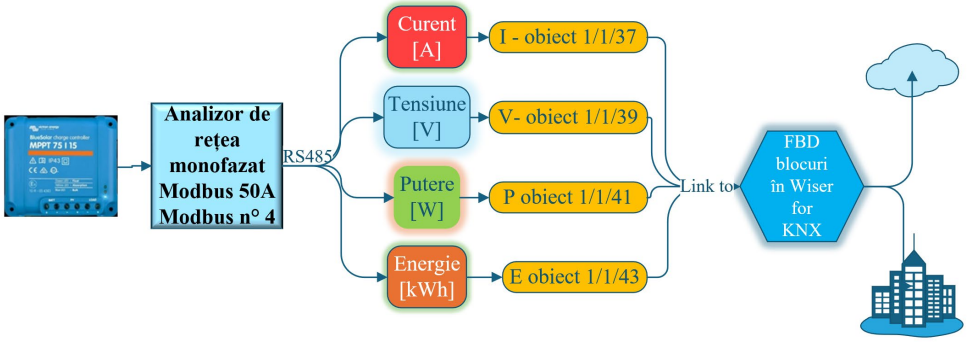


Fig. 4.14. Schema bloc a modului de transmitere date prin RS485 de la analizorul de rețea monofazat de pe iesirea controlerului MPPT și asocierea lor la obiecte KNX

Figura 4.14. detaliază modul în care datele de curent continuu de la analizorul Finder măsoara parametrii electrici de ieșire ai controlerului MPPT și de intrare ai invertorului (7). Acești parametri sunt mapati pe obiecte KNX specifice.

Aceaste mapări detaliate sunt trimise spre blocurile FBD din Wiser for KNX și sunt esențiale pentru monitorizarea parametrilor și logica de control.

Pentru a putea citi valorile trimise prin Modbus RS485 de dispozitivele (1), (2), (3), (4), (5) a fost creat un profil JSON.

S-a ales standardul de comunicatie robust KNX [S. Sowa2018] și protocolul Modbus RS485 [G.K. McMillan1999] pentru achiziția de date deoarece reprezintă o soluție profesională, fiabilă. Controlerul Wiser for KNX poate integra o gama variată de protocoale de comunicație.

S-a folosit funcția FBD de adunare pentru a afla puterea totala a panourilor , cât și a tensiunilor.

Aceste formații vor fi afișate în pagina web Scada a controlerului Wiser for KNX sau pe aplicația de mobil.

Un alt parametru esențial pentru studiu ce a necesitat introducerea unei formule de calcul este calculul randamentelor panourilor fotovoltaice [Green1982, M.A.].

Pentru a calcula randamentul în timp real al fiecarui panou fotovoltaic PV1, PV2, cât și diferența dintre aceste două randamente, s-au folosit mai multe operații matematice cum ar fi înmulțiri, împarțiri și scăderi.

Pe parcursul experimentelor s-a urmărit setarea timpilor unor procese de încălzire până la o anumită valoare a temperaturii care este considerată stabilizată pentru un anumit timp (temporizare la anclanșare), de exemplu 30 de minute. Ulterior se intervine cu ventilarea forțată până se obține o anumită valoare de temperatură ce este stabilă pentru un anumit timp (temporizare la declanșare). Automatizarea va opri ventilatorul și se vor crea cicluri de funcționare.

Pentru a realiza acestă funcție care monitorizează valorile tuturor temperaturilor de pe panourile fotovoltaice s-a scris un cod complex în limbaj LUA, încărcat pe Wiser for KNX. În funcție de temperatura cea mai mare se declanșează rularea scriptului ce face aceste comenzi.

Scriptul preia valorile temperaturilor de pe cele două panouri fotovoltaice.

Scriptul citește valoarea maximă a panourilor fotovoltaice, compară valoarea maximă cu valoare scrisă în Scada și dacă condiția este îndeplinită, pornește temporizarea la anclanșare a relului ce comandă ventilatorul și realizează oprirea acestuia când condiția de stop este îndeplinită.

c) Interfața de vizualizare a datelor

În controlerul Wiser for KNX s-au realizat mai multe tipuri de vizualizări precum:

- *interfața SCADA (Human-Machine Interface)* din Wiser for KNX prezentată în figura 4.15. afișează vizual temperaturile maxime și minime de pe fiecare panou

fotovoltaic, producția fiecărui panou PV1, PV1, consumul total al standului de cercetare și starea bateriei (tensiune, putere, curent), respectiv randamentele fiecarui panou fotovoltaic.

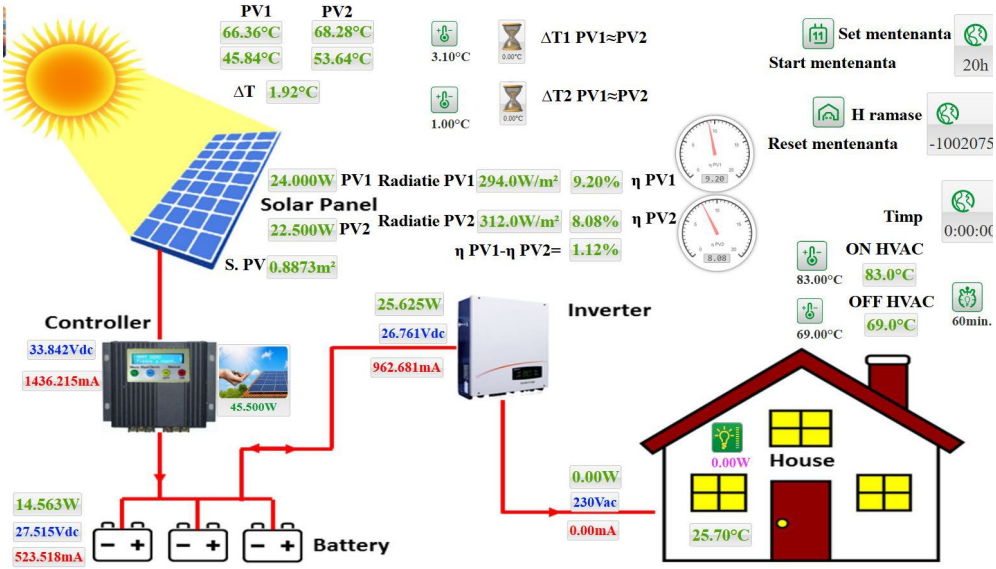
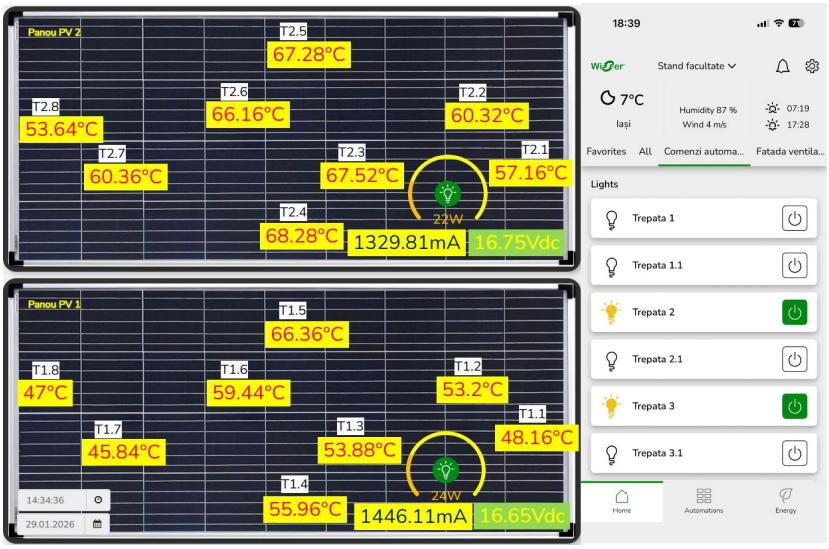
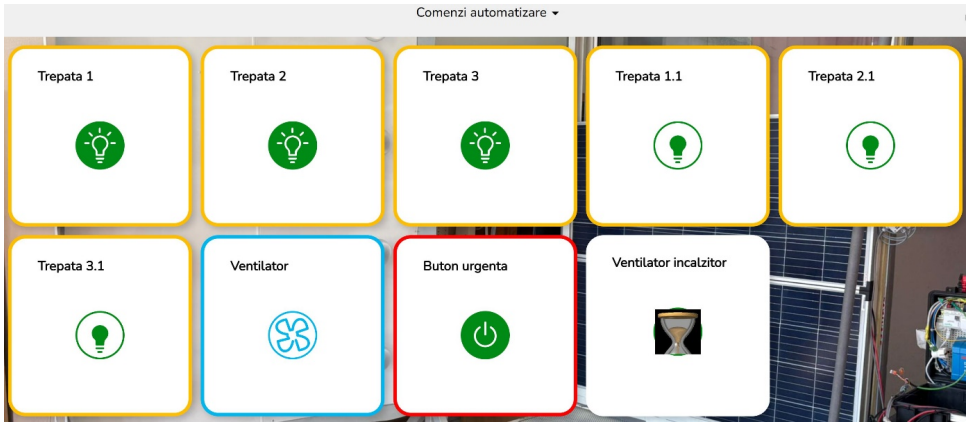


Fig. 4.15. . Interfața Scada de vizualizare a parametrilor și setarea HVAC

- *interfața Touch din Wiser for KNX* este prezentată în figura 4.16. În aceasta interfață se poate vizualiza de exemplu (figura 4.16. a)) valoarea în timp real temperaturile, exact în zonele unde sunt instalate sondele PT1000, puterea fiecărui panou în parte, se pot porni/opri lămpile simulatorului solar (figura 4.16. b), c)), se poate vizualiza starea ventilatorului pornit/oprit, cât și un buton de urgență care oprește tot sistemul (lămpile, ventilatorul), funcție foarte utilă în cazul unei avarii sau defecțiuni ce impune oprirea tuturor proceselor în regim de urgență.



a) b)



c)

Fig. 4.16. Interfața Scada de vizualizare a) temperaturi panouri fotovoltaice PV1, PV2, b) aplicația pentru mobil, c) aplicație Touch comenzi lumini, ventilator și buton urgență

4.5. Rezultate experimentale - panouri fotovoltaice integrate în fațadă ventilată

4.5.1. Introducere

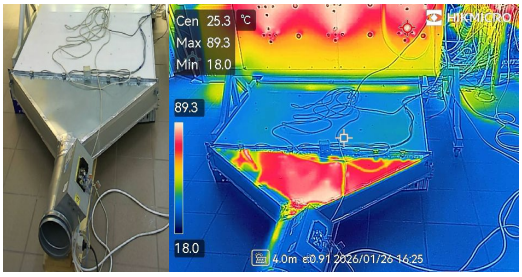
Sistemul de monitorizare s-a axat pe studiul comportamentului panourilor fotovoltaice integrate în fațada ventilata în diferite condiții de temperatură, la admisia fațadei ventilată, la evacuarea fațadei ventilate, cu diferite tipuri de ventilări cum ar fi: ventilare naturală, respectiv ventilare forțată cu 3 trepte de viteză de aer.

Pentru această ipoteză de cercetare s-au stabilit mai mulți pași pentru a obține rezultatele dorite:

1. Analiza parametrilor termici ai fațadei ventilate și ai panourilor fotovoltaice integrate în fațadă;
2. Analiza parametrilor electrici;
3. Analiza puterii electrice versus puterea termica;
4. Analiza curbelor caracteristice panourilor fotovoltaice P-V, P-I, I-V.

S-au realizat măsurători ale parametrilor electrici caracteristici panourilor fotovoltaice, ale temperaturilor de admisie/evacuare din interiorul fațadei ventilate, cât și temperaturilor de pe panourile fotovoltaice.

Modificarea temperaturilor de pe admisia fațadei ventilate s-a realizat cu ajutorul încălzitorului. Pentru a cupla încălzitorul la tubulatura de admisie a fațadei ventilate s-a realizat o reductie (figura 4.17.). Comanda încălzitorului pentru diferite temperaturi s-a realizat cu ajutorul Data logger MS6D care comandă un contactor cu ajutorul modulului ieșire releu.



a) b)

Fig. 4.17. . a) Reducție încălzitor a) ansamblu complet încălzitor cuplat la reducție și conectarea acestuia la tubulatura de admisie aer fațadă ventilată b) încălzitor pornit

Ventilarea forțată se realizează cu ajutorul ventilatorului (4) (figura 4.10.).

Acest experiment a fost realizat la temperatura din laborator care este constantă, de aproximativ 20ºC. S-a urmărit preluarea cu exactitate a tuturor parametrilor termici (temperaturi, viteze de aer) și electrici (tensiuni, curenți, puteri, randamente) ai experimentului.

Experimentul este împărțit în mai multe cicluri de funcționare între anumite ore specifice. În primă etapă s-au calculat puterile termice pentru aceste intervale de timp.

4.5.2. Analiza parametrilor termici ai fațadei ventilate și ai panourilor fotovoltaice integrate în fațadă

a) Calculul puterii termice

Formula utilizată pentru puterea termică instantanee:

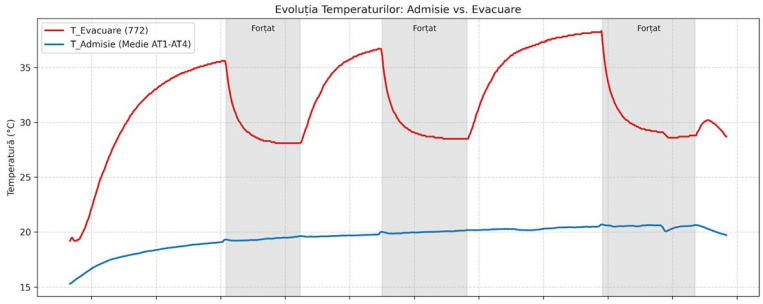
$$Q_{th} = \rho * A * v * c_p * \Delta T \qquad (4.11.)$$

Unde:

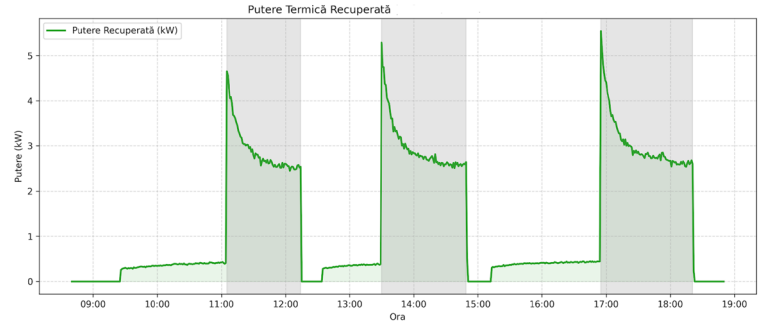
- ρ (densitate aer) ≈ 1.2 kg/m^3;
- A (aria secțiunii conductei) = π * $(0.11)^2$ ≈ 0.038 m^2 (pentru diametrul D=220mm);
- v = viteza aerului [m/s];
- c_p = (căldura specifică) ≈ 1005J/(kg* K);
- ΔT = Diferența dintre temperatura de evacuare și cea de admisie.

În urma analizei parametrilor termici a rezultat graficul din figura 4.40. unde se pot observa ușor cele 3 trepte de ventilare forțată ce duc la cresterea puterii termice absorbite din fațada ventilată.

În figura 4.18. se poate observa: a) variatia temperaturii aerului evacuat, b) puteri temice la diferite trepte de ventilare



a)



b)

Fig. 4.18. a) Variatia temperaturii aerului evacuat, b) Puteri temice la diferite trepte de ventilare

Vitezele aerului de evacuare din fațadă au fost măsurate cu ajutorul anemometrul Testo (senzorul 772).

Figura 4.19 prezintă puterilor termice în funcție de vitezele de evacuare a aerului din fațadă, măsurate de anemometrul Testo (senzorul 772) pentru diferite cicluri de funcționare.

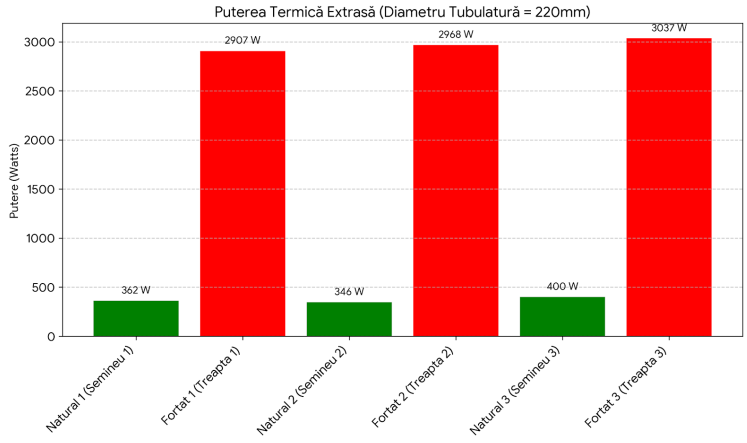


Fig. 4.19. Comparații ale puterilor termice în funcție de vitezele de evacuare a aerului din fațadă

Analizând parametrii termici din interiorul fațadei ventilate, folosind senzorii de temperatură T1-T16, a rezultat harta termică din figura 4.20. pentru fiecare ciclu de funcționare.

- .

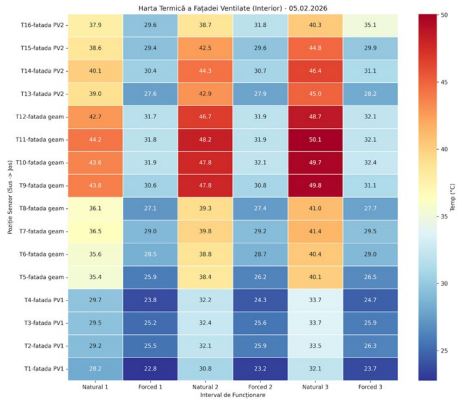


Fig. 4.20. . Harta termică din interiorul fațadei ventilate

Această reprezentare confirmă că fațada funcționează ca un imens radiator solar stratificat, iar ventilația forțată este esențială pentru a preveni supraîncălzirea zonei superioare și pentru a valorifica energia acumulată.

4.5.3. Analiza parametrilor electrici

a) Calculul parametrilor electrici

Toate aceste calcule ale puterilor, randamentelor, sunt calculate direct în Wizer for KNX cu formulele generate cu ajutorul funcțiilor FBD și a scripturilor scrise în acesta, ceea ce ajută foarte mult la analiza parametrilor, putând extrage date deja calculate.

Analiza parametrilor termici arată efectul răcirii asupra puterilor, randamentelor și a tensiunilor, demonstrând astfel că panourile funcționează mai bine la rece.

S-au putut observa și variații ale parametrilor pe cele 6 cicluri de funcționare astfel:

- Randament (η): În momentul trecerii de la ventilație naturală la forțată (ora 11:05), randamentul mediu a crescut de la 8.43% la 8.98%. Aceasta este o creștere relativă a performanței de aproximativ 6.5%.
- Tensiune (U): Tensiunea medie pe panouri a crescut de la ~16.8 V (în regim natural, panouri fierbinți) la ~17.4 - 17.5 V (în regim forțat, panouri răcite). Creșterea tensiunii este direct responsabilă pentru surplusul de putere electrică.

4.5.4. Analiza puterii electrice versus puterea termică

Acesta este rezultatul cel mai evident al analizei:

- Sistemul produce aproximativ 48,4 W energie electrică.
- Sistemul produce (recuperează) peste 3038 W energie termică.
- Factorul de multiplicare este de 62,77 x.

Pentru fiecare 1 Watt de energie electrică generat, fațada livrează 62,77 Wați de căldură în sistemul de ventilație.

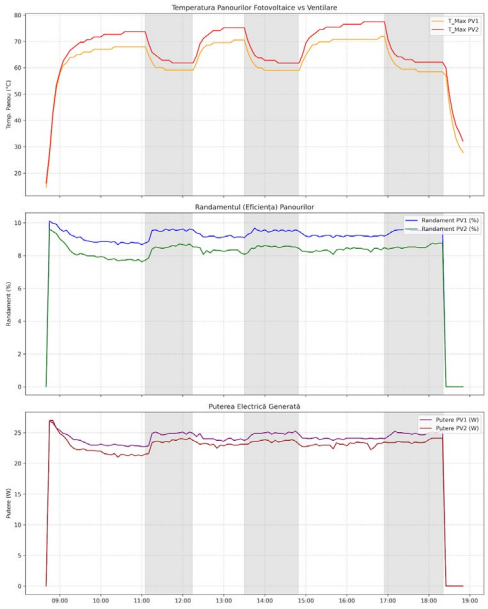
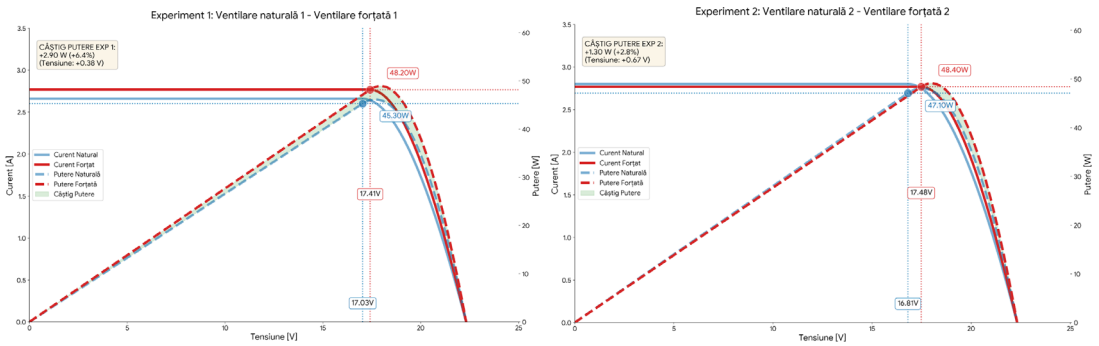


Fig. 4.21. Parametri electrici, putere, randament și temperaturi pe diverse cicluri de Funcționare

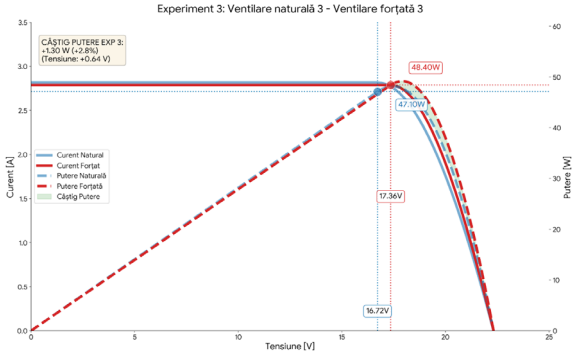
4.5.5. Caracteristice ale panourilor fotovoltaice P-V, P-I, I-V

Analiza parametrilor electrici stocați în Wiser for KNX este utilă pentru a trasa curbele caracteristice panourilor fotovoltaice P-V, I-V, P-I. Astfel se obține o imagine de ansamblu completă în care se poate evidenția efectul temperaturii asupra curbelor, cum sunt acestea influențate și se poate evidenția efectul benefic al ventilării forțate.

În urma analizei parametrii specifici panourilor fotovoltaice au rezultat graficele din figurile 4.22.



a) b)



c)

Fig. 4.22. Grafic comparativ: a) experiment 1, b) experiment 2, c) experiment 3

a) Analiza Efectului răcirii asupra caracteristicilor I-V și P-V

Analiza comparativă a celor trei seturi de măsurători experimentale (marcate în grafice ca *Experiment 1, 2 și 3*) demonstrează influența directă a temperaturii de operare asupra parametrilor de ieșire ai panoului fotovoltaic. Prin suprapunerea curbelor caracteristice obținute în regim de **ventilare naturală** (reprezentate cu albastru) cu cele obținute în regim de **ventilare forțată** (reprezentate cu roșu), se pot extrage concluzii clare privind eficiența sistemului de răcire (figurile: 4.22).

➢ **Deplasarea Punctului de Maximă Putere (MPP)**

Așa cum se observă în toate cele trei grafice comparative, activarea răcirii forțate determină o migrare a Punctului de Maximă Putere (MPP) către dreapta și în sus.

b) Interpretarea Curbei de Putere (P-V) și Câștigul Energetic

Curbele de putere (liniile punctate din grafice) evidențiază un câștig net de performanță. Zona marcată cu **verde** între curba roșie și cea albastră reprezintă surplusul de energie recuperat prin eliminarea căldurii excesive.

- **Experimentul 1** a înregistrat cel mai mare salt de putere, de la 45,30 W la 48,20 W, reprezentând o creștere procentuală de **6.4%**. Această valoare ridicată sugerează că panoul se afla într-o stare termică critică (temperatură foarte ridicată) înainte de activarea ventilării.
- **Experimentele 2 și 3** au arătat o consistență remarcabilă, cu câștiguri de putere de **2.8%** (+1.30 W) și respectiv **2,7%** (+1.28 W). Faptul că aceste valori sunt aproape identice indică stabilitatea sistemului de răcire și capacitatea sa de a menține panoul într-un regim termic optim constant.

➢ **Modificarea Factorului de Umplere (Fill Factor)**

Vizual, curbele roșii (forțat) prezintă o formă mai „dreptunghiulară” în zona caracteristicii I-V comparativ cu cele albastre. Acestea indică o îmbunătățire a Factorului de Umplere (FF). Răcirea reduce rezistența de serie a celulelor (care crește odată cu temperatura), permițând extragerea unei puteri mai mari fără a avea o cădere de tensiunea la borne [Green].

Câștigul de putere de aproximativ 6.4% (Exp 1) și 2.8% (Exp 2, 3) nu este doar rezultatul unei tensiuni mai mari, ci și al unei conversii mai eficiente, conform principiilor descrise în fizica semiconductorilor [Gren1982].

4.6. Analiza numerică a metodelor de îmbunătățire a eficienței panourilor fotovoltaice termice prin sisteme de răcire activă

1. Introducere

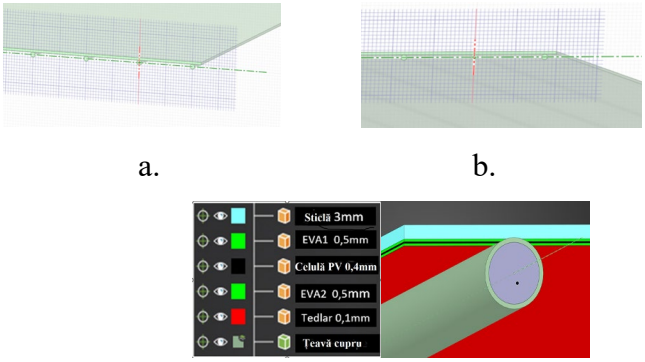
Utilizarea sistemelor fotovoltaice (PV) pentru conversia radiației solare în energie electrică este una dintre cele mai răspândite soluții de energie regenerabilă [Hu J2016, Yau YH2016 , Markvart T.2000].

În pofida acestor beneficii, eficiența sistemelor PV este limitată semnificativ de factori climatici, în special de temperatura de operare a suprafeței [Da Silva RM2010]. Parametrii externi precum radiația solară, temperatura ambiantă și viteza vântului influențează direct starea termică a panoului [Elbreki A.M.]. Energia solară absorbită care nu este transformată în electricitate se disipă sub formă de căldură, ducând la scăderea randamentului și la degradarea prematură a celulelor [Pomares-Hernandez C.2021, Tahar M.2022]. Din acest motiv, optimizarea sistemelor prin răcire activă este imperativă pentru a asigura viabilitatea economică a investițiilor în energie solară [Reddy S.R.2015].

2. Metodologia cercetării și modelarea numerică

Prezenta analiză utilizează simularea numerică pentru a evalua distribuția temperaturii pe un panou PV cu dimensiuni standard (2000 x 1000 mm), sub o radiație solară constantă de 1000 W/m². Modelarea a fost realizată folosind suita software Ansys (Fluent și SpaceClaim) versiunea Student (figura 4.23), respectând stratificarea reală a panoului: sticlă frontală, straturi de încapsulare EVA, celule PV și folie de protecție Tedlar [Pomares-Hernandez C., Tahar M.]..

Pentru eficientizarea calculului, s-a definit un strat omogen ("PV layer") cu proprietăți medii determinate prin mediere ponderată: conductivitate termică 14,44 W/m°C, densitate 2447,11 kg/m³ și căldură specifică 885,73 J/kg°C. Au fost studiate trei configurații principale.



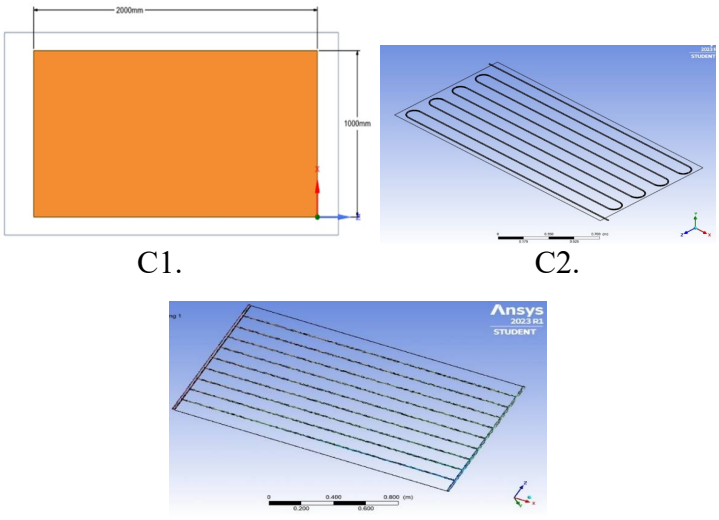
a. b.

c.

Fig. 4.23. Reprezentarea 3D a modelului numeric a. vedere de sus, b. vedere de jos, c. straturile componente ale panoului PV

Au fost analizate trei configurații constructive pentru a determina distribuția optimă a fluidului de răcire (figura 4.24):

1. **C1:** Panou fără răcire (control).
2. **C2:** Răcire cu serpentină (9 tuburi de cupru conectate în serie).
3. **C3:** Răcire cu distribuitor/colector (tuburi paralele conectate la două magistrale).



C1. C2.

C3,

Fig. 4.24. Detalierea geometriilor de răcire pentru configurațiile C1, C2 și C3.

3. Rezultate: Analiza Distribuției Termice

Performanța sistemului nerăcit (C1): În absența unui management termic, panoul atinge temperaturi critice. Simularea a indicat o temperatură medie de operare de 88,4°C, ceea ce reduce eficiența electrică la doar 71,47% față de valorile nominale. La temperatura maximă înregistrată (112,3°C), pierderile de putere depășesc 60% (figura 4.25).

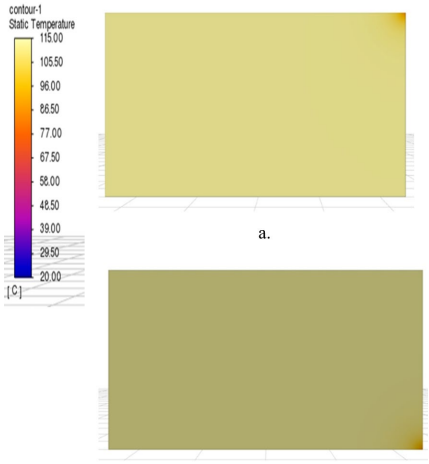


Fig. 4.25. . a. Față; b. Vedere de jos a panoului fotovoltaic în simularea numerică fără răcire

Sistemul cu serpentină (C2): Această metodă reduce temperatura medie până la 31,5°C la viteze mari ale fluidului (0,9 m/s), restabilind eficiența la 98,15% din valoarea STC. Totuși, s-a observat o distribuție neuniformă a temperaturii pe suprafață, ceea ce generează stres termic inegal între celulele fotovoltaice (figura 4.26).

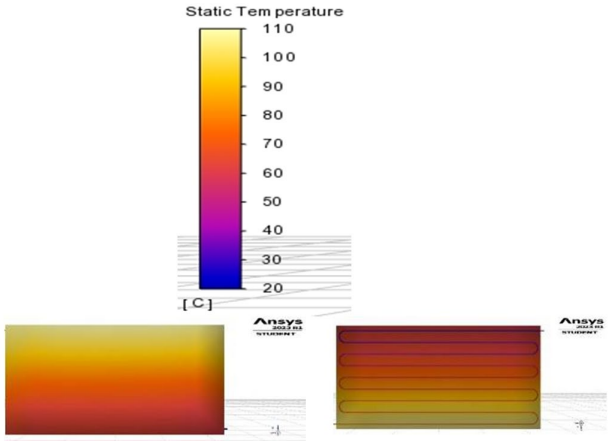


Fig. 4.26. Sistem fotovoltaic cu răcire serpentină, cu circulația agentului de răcire la 0,1...0,9 m/s

Sistemul distribuitor/colector (C3): Analiza indică faptul că arhitectura C3 asigură cea mai bună uniformitate termică. Chiar și la viteze reduse ale agentului de răcire, sistemul menține temperatura maximă sub 85°C. La viteza de 0,9 m/s, eficiența se stabilizează la 97,84%, oferind un profil termic echilibrat care protejează integritatea materialelor componente (figura 4.27).

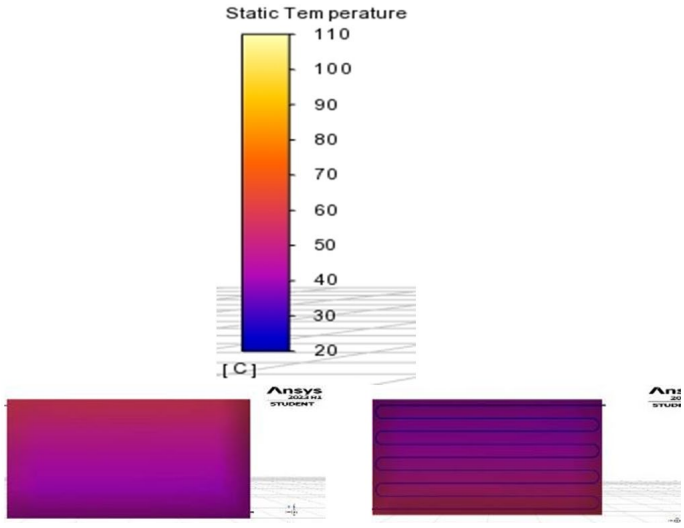


Fig. 4.27. Sistem fotovoltaic cu răcire prin distribuitor/colector, cu circulația agentului de răcire la 0,1...0,9 m/s

4. Concluzii la capitol

În urma analizei puterii electrice versus puterea termică, s-a constatat că din punct de vedere energetic, pentru ziua de studiu de 5 Februarie, fațada s-a comportat primar ca un **colector solar termic de aer** extrem de eficient, producția electrică fiind un beneficiu secundar (dar care a fost ajutat și optimizat de procesul de răcire).

Această analiză confirmă că fațada funcționează ca un imens radiator solar stratificat, iar ventilația forțată este esențială pentru a preveni supraîncălzirea panourilor fotovoltaice în special a panoului fotovoltaic PV2 situat la partea superioară, dar și pentru a valorifica energia acumulată.

Sistemul demonstrează o sinergie excelentă. Pentru a încălzi clădirea, recuperarea căldurii de la panouri ajută panourile să producă mai mult curent electric**.**

Sistemul smart KNX de achiziții de date sa dovedit a fi o soluție fiabila și moderna de înregistrare, prelucrare și stocare a datelor oferind o interfață SCADA intuitivă în care sunt afișate toate valorile esențiale ale unui sistem de monitorizare fotovoltaic.

Cercetarea confirmă că managementul termic activ este vital pentru performanța sistemelor fotovoltaice în regim real de funcționare. Sistemul tip **distribuitor/colector (C3)** reprezintă soluția optimă pentru integrare, deoarece previne îmbătrânirea prematură a celulelor prin uniformizarea temperaturii. Mai mult, energia termică recuperată prin acest proces transformă panoul într-un sistem hibrid PV/T, capabil să furnizeze simultan energie electrică și agent termic, reducând astfel amprenta de carbon și consumul de combustibili fosili [Kannan N.2016, Reddy S.R.2015].

5. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

a. Concluzii finale

Studiile desfășurate în cadrul tezei de doctorat aduc contribuții importante în domeniul sistemelor de monitorizare a panourilor fotovoltaice, un subiect de interes în ultimii ani.

În partea referitoare la *Stadiul actual al cercetarii* în domeniul monitorizării sistemelor fotovoltaice sunt prezentate date din literatura de specialitate privind sistemele de monitorizare fotovoltaice, utilizarea senzorilor și a sistemelor de achiziție de date.

În studiul de caz prezentat în *Capitolul 2, Cercetări privind aplicarea sistemului SMART KNX la Monitorizarea Sistemelor Fotovoltaice*, s-a reușit transformarea sistemului fotovoltaic off/grid dintr-un sistem non smart într-un sistem smart KNX ce a fost integrat în sistemul smart KNX al unei locuințe, realizându-se astfel o observare clară și analiză a tuturor parametrilor monitorizați prin interfata creată de tip SCADA. Contribuția principală constă în proiectarea și validarea unei arhitecturi de control ce permite integrarea invertoarelor Growatt off-grid într-un sistem de management inteligent bazat pe utilizarea unui controler Schneider Wiser for KNX.

Întregul sistem poate fi extins și poate integra și alte surse de căldură convenționale.

În cadrul cercetării experimentale din *Capitolul 3. Cercetări privind optimizarea consumului și a funcționării sistemului* s-au realizat 4 cazuri de simulare, în vederea identificării eficienței sistemului propus, dar și identificarea celor mai eficiente soluțiilor tehnice de optimizare.

Inițial s-a identificat și analizat impactul consumului de energie electrică fără a fi utilizate panouri fotovoltaice.

Ulterior s-a analizat consumul de energie electrică al casei utilizând producția de energie electrică de la panourile fotovoltaice, însă fără a avea acumulatori de stocare a surplusului de energie electrică produsă. În urma simulării s-a constatat că deși un sistem fotovoltaic fără stocare aduce beneficii energetice substanțiale prin autoconsumul direct, acesta este ineficient din cauza neconcordanței temporale dintre curba de producție și cea de consum, pierderea a 16.5% din producția zilnică justificând necesitatea implementării unor soluții de management energetic – prin stocare în acumulatori sau prin gestiunea inteligentă a sarcinilor pentru a valorifica surplusul.

După introducerea unui sistem de stocare a energiei (eng. Energy Storage System - ESS), respectiv integrarea unui banc de acumulatori cu o capacitate nominală de 10 kWh a fost analizat consumul de energie având trei ipoteze de lucru. Utilizarea unui sistem de stocare

descărcat inițial a eliminat pierderile, a crescut gradul de utilizare a producției locale la 100% și a redus semnificativ dependența de rețeaua publică, atingând un grad de independență energetică de peste 57% pentru ziua analizată. În al doilea caz, sistemul de stocare încărcat inițial reduce semnificativ costurile cu energia importată din rețea, dar această strategie introduce riscul pierderii producției fotovoltaice excedentare dacă aceasta nu poate fi stocată. Utilizarea unui sistem de stocare în regim de rezervă (75%) asigură o eficiență energetică mai scăzută (reapariția surplusului pierdut) și coconsum mai mare din rețea, însă asigură o rezervă substanțială de energie pentru situații critice și contribuie la protejarea pe termen lung a acumulatorilor.

S-a studiat comportamentul sistemului fotovoltaic și s-a creat logica de funcționare a controlului autoconsumului prin controlul smart al celor trei sisteme de aer condiționat.

În cadrul cercetării experimentale din *Capitolul 4. Panouri fotovoltaice PVT integrate în fațada ventilată*, datele sintetizate în grafice confirmă ipoteza de lucru: eficiența conversiei fotovoltaice este invers proporțională cu temperatura celulei. Sistemul de ventilare forțată a reușit să extragă mai multă căldură, a răcit panoul PV, fapt ce a dus la creșterea tensiunii de operare cu valori între 0,38 V și 0.67 V și puterea totală cu până la 6.4%.

Astfel în urma experimentelor s-a constatat că sistemul experimental fatadă ventilată PVT a produs un minim de putere electrică de 45,3W și o putere termică minimă de 362W pentru ventilarea naturală și un maxim putere electrică de 48,4W și o putere termică de 3038W datorită ventilarii forțate. Se demonstrează astfel, că odată cu răcirea forțată a panourilor fotovoltaice, randamentul, producția electrică cât și cea termica cresc în mod exponențial, creșterea cea mai mare înregistrându-se pe partea de producție de energie termică.

Studiul evidențiază un fapt bine cunoscut, cel al efectului de seră și al efectului de șemineu.

O fațadă ventilată fără sistem de monitorizare pe timpul iernii poate fi utilă deoarece efectul de seră contribuie la reducerea pierderilor de căldură din clădire, și poate scădea costul încălzirii. Pe timpul verii efectul ar fi exact invers, astfel efectul de seră ar supraîncălzi clădirea, obligând ca locatarii să folosească aerul condiționat pentru a restabili confortul și a compensa supraîncălzirea produsă de fațada ventilată.

Această căldură acumulată în fațada ventilată are efect negativ și asupra panourilor fotovoltaice reducându-le eficiența, și prin urmare necesitatea unei ventilări controlate de sistemul smart KNX este esențială pentru creșterea eficienței panourilor fotovoltaice și pentru reducerea costurilor facturilor pentru încălzire/răcire. Dacă panourile fotovoltaice sunt răcite

suplimentar cu un sistem de serpentine instalate pe spatele panoului fotovoltaic prin care sa circule apa așa cum s-a demonstrat numeric în [Popovici2024], rezultă o producție fotovoltaică mai eficientă, iar căldura extrasă printr-un astfel de sistem distribuitor colector poate fi folosită la preîncălzirea apei ce ulterior este introdusă în schimbătorul ce poate încălzi apa caldă menajeră.

b. Contributii personale

Partea de **Contribuții personale** cuprinde studiu privind intergarea unui sistem smart KNX pentru managementul și monitorizarea consumului de energie electrică fotovoltaică, respectiv analiza parametrilor panourilor fotovoltaice PVT integrate în fațada ventilată. Sunt prezentate rezultatele și concluziile obținute pe parcursul desfășurării experimentelor și studiului de caz. Activitățile de cercetare cuprind teste experimentale și analize numerice desfășurate în cadrul Laboratorului de Instalații Electrice al Facultății de Construcții și Instalații din Iași, respectiv un studiu de caz realizat în cadrul unei locuințe private din localitatea Păun, județul Iași.

1. Elaborarea unei analize cuprinzătoare a sistemelor de monitorizare fotovoltaice existente, raportate în literatura de specialitate, în ceea ce privește, în special, utilizarea senzorilor și a sistemelor de achiziție de date.

În urma acestei analize s-au constatat următoarele:

- Sistemele de monitorizare fotovoltaice colectează și analizează parametrii măsurați dintr-o instalație fotovoltaică pentru a asigura funcționarea fiabilă și stabilă, dar, în același timp, țin evidența diferiților indici de producere a energiei electrice și aparițiile defecțiunilor. Monitorizarea sistemelor fotovoltaice este cea mai bună modalitate de a maximiza performanța acestora.
- În mod ideal, pentru a maximiza RP, toate sistemele fotovoltaice ar trebui monitorizate la nivel de modul și în acest fel, chiar și pierderile mai mici de energie vor fi detectate într-un mod rapid și precis.
- În ultimii ani, sistemele de monitorizare fotovoltaice au fost integrate cu platforme wireless care cuprind achiziția de date de la diverși senzori și noduri de rețea pentru transmisia de date wireless.

2. Cercetarea și validarea unei arhitecturi de control care integrează invertoare Growatt off-grid într-un sistem de management inteligent bazat pe un controler Schneider Wiser for KNX.

Cercetările intreprinse au abordat următoarele aspecte cu contribuții proprii:

- s-a proiectat, instalat și configurat sistemul smart KNX;
- grafica din interfața SCADA de vizualizare a tuturor parametrilor măsurați;
- în urma studierii parametrilor măsurați s-a scris un cod de programare în limbaj LUA pe controlerul Wiser for KNX ce realizează atât analiza parametrilor, cât și operații matematice; ulterior realizază buclele de reglaj ce comandă în mod smart cele două sisteme de aer condiționat;
- s-a creat fișier de tip .json ce permite integrarea echipamentelor (traductori) ce comunică prin mod bus RS485 cu sistemul smart KNX;
- s-a creat data logger în controlerul Wiser for KNX ce permite obținerea unui istoric salvat al măsurătorilor, ce poate genera grafice și posibilitatea de a exporta aceste valori măsurate într-un fișier de tip .csv.

3. Studii şi cercetări de optimizare a consumului şi funcţionării sistemului de alimentare fotovoltaică a unei locuinţe

Adoptarea unei rețele de senzori externi cu interfață Modbus și a logicii flexibile oferite de controlerul Wiser for KNX (Schneider Electric LSS100100) a condus la obținerea unei soluții de automatizare robuste și performante.

4. Contribuţii la monitorizarea parametrilor electrici şi termici ai panourilor fotovoltaice integrate în faţade ventilate

Se pot menționa următoarele contribuții rezultate din cercetarea întreprinsă la această tema:

- s-a proiectat simulatorul solar și s-au integrat panourile fotovoltaice în fațada ventilată;
- s-a creat în interfața SCADA o grafică de vizualizare intuitivă ce oferă utilizatorului final posibilitatea de a vizualiza în timp real toți parametrii esențiali (U, I, P, t^o, t^o_{min}, t^o_{max}, Δt,...);
- s-a creat o interfața grafică intuitivă ce realizază afisarea în timp real a tuturor parametrilor captați de senzorii de măsură (tensiune, curent, putere, temperatură), cât și a valorilor parametrilor calculați cu ajutorul formulelor de calcul matematice scrise în codul de programare LUA de pe controlerul Wiser for KNX (putere totală PV, tensiune totală PV, randamente ale panourilor PV);
- s-a creat în controlerul Wiser for KNX aplicația web ce permite vizualizarea interfeței SCADA prin 2 moduri, local, în rețea, direct prin browser si prin cloud, folosind aplicația de mobil Wiser for KNX.

- s-a implementat cea de-a treia cale de comunicație securizată folosind un router Ruijie [h15] ce realizează o conexiune Reyee SD-WAN. Acest link securizat a facilitat execuția de la distanță a unor operațiuni care, în mod normal, ar fi necesitat prezența fizică. Datorită acestei soluții, mentenanța sistemului a devenit mult mai eficientă.
- s-a scris un cod de programare în limbaj LUA ce realizează funcții de analiză matematica și operații matematice esențiale pentru buna funcționare a buclelor de reglaj de pe controlerul Wiser for KNX, în urma studierii parametrilor măsurați;
- s-a integrat în vizualizarea grafică posibilitatea de a urmări în timp real randamentul panourilor fotovoltaice, a puterii electrice generate de fiecare panou PV, cât si a puterii totale a celor două panouri fotovoltaice; Pentru a realiza toate acestea s-a scris un cod de programare în limbaj LUA pe controlerul Wiser for KNX;
- s-a creat un fișier de tip .json ce permite integrarea echipamentelor (traductori), ce comunică prin mod bus RS485 cu sistemul smart KNX;
- s-au realizat bucle de reglare ce comandă în mod smart ventilatorul;
- s-a creat un data logger în controlerul Wiser for KNX, ce permite obținerea unui istoric salvat al măsurătorilor, poate genera grafice și posibilitatea de a exporta aceste valori măsurate într-un fișier de tip .csv.

Lista lucrărilor științifice

O parte din activitatea de cercetare științifică a fost consemnată în cadrul a două referate de cercetare științifică, iar rezultatele de bază au fost obtinute si diseminate prin intermediul a cinci lucrări științifice, dintre care două sunt articole în reviste cotate ISI **WoS** si trei au fost prezentate si incluse in volum la conferințe internaționale, doua fiind indexate **WoS**.

C.-G. Popovici , G. Filipescua , N.-C. Chereches, S.-V. Hudișteanu, E.-F. Țurcanu, Ana Diana Ancas , Marina Verdeș, **Rosu PV,** 2024 *Numerical Simulation of Improving the Efficienty of Photovoltaic Thermal Panels* JOURNAL OF APPLIED ENGINEERING SCIENCES 14 (1), pp. 81-88

Roșu PV, Adrian-Traian Plesca, 2020 *Optimizing the Operation of Photovoltaic Panel* Systems 2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), pp. 318-321. **WoS**

Roșu PV, Alexandru, C.C., S. Hudişteanu, C. Chereches, E. Turcanu, Olaru R, 2025 *Comparative analysis of energy management strategies in an off-grid photovoltaic system with storage and active load control* 2025 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL AND ENERGY SYSTEMS, SIELMEN, pp.702-706

Roșu PV, Alexandru, C.C., S. Hudişteanu, C. Chereches, E. Turcanu, Olaru R, 2025 *Design and implementation of a KNX energy management system for optimizing self-consumption in off- grid photovoltaic systems* 2025 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL AND ENERGY SYSTEMS, SIELMEN, pp.679-684

Gherasim, I; Galatanu, CD; (...); Anghel, L **Roșu, PV** 2025 *The Effect of Spectrum-Enhanced Artificial Light on Students' Cognitive Activities* 2025 SUSTAINABILITY 17(18), **ISI-WoS, F.I. 3,3**

Roșu PV, Alexandru, C.C., E. Turcanu, 2026 *Current status of methods and strategies in photovoltaic monitoring systems* trimis spre evalurare la Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Secția: Electrotehnică, Energetică, Electronică.

Perspective de dezvoltare ulterioară

Pe baza celor două soluții smart KNX, executate și testate, pot fi dezvoltate diverse aplicații în care să fie utili zate aceste bucle de reglaj, precum integrarea stațiilor de încărcat mașini electrice a căror putere de încărcare poate fi modulată în funcție de producția fotovoltaică, de consumul clădirii și alți parametri electrici.

Studiul poate fi continuat cu cercetarea unor schimbătoare de căldură ce pot prelua energia termică de la evacuarea sistemului de ventilare a fațadelor ventilate și transferarea acesteia spre un boiler de acumulare apă caldă menajeră.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

[Al-Ali2010] Al-Ali A.R., Zualkernan I, Aloul F., A mobile GPRS-sensors array for air pollution monitoring. IEEE Sens J 2010;10(10):1666–71.

[Anwari2011] Anwari M, Dom MM, Rashid MI. Small scale fotovoltai.c monitoring system software design. Energy Proc 2011;12:586–92.

[Benghanem2010] Benghanem M. A low cost wireless data acquisition system for weather station monitoring. Renew Energy 2010;35(4):862–72.

regulation techniques for non integrated flat PV modules mounted on building top. Energy and Buildings 2015, 86, 692-697.

[Di Napoli2014] Di Napoli, F., Guerriero P., d'Alessandro V., Daliento S. A Power Line Communication on DC bus with photovoltaic strings. In: Renewable Power Generation Conference RPG, 3rd 2014;pp. 1–6. IET; 2014.

[Elbreki AM2016], Alghoul MA, Al-Shamani AN, Ammar AA, Yegani B, Alsanossi , Aboghrara M, Rusaln MH, Sopian K, *The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: a critical review*, 2016,Renew Sustain Energy Rev ,57:602–47.

[Farid2020] Farid Touati et al., Photo-Voltaic (fotovoltaic) Monitoring System, Performance Analysis and Power Prediction Models in Doha, Qatar, In book: Renewable Energy, May 2020.

[Firth2010] S. K. Firth, K. J. Lomas and S. J. Rees, A simple model of fotovoltaic system performance and its use in fault detection, Solar Energy, vol. 84, pp. 624-635, 2010.

[Galli2011] Galli S, Scaglione A, Wang Z., For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid. Proc IEEE 2011;99(6):998–1027.

[Gherasim, I2025]; Galatanu, CD; (...); Anghel, L **Rosu, PV** 2025 *The Effect of Spectrum-Enhanced Artificial Light on Students' Cognitive Activities* 2025 SUSTAINABILITY 17(18)

[González2019] González, I., & Calderón, A. J. (2019). *Integration of open source hardware Arduino platform in automation systems applied to Smart Grids/Micro-Grids*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 36, articolul 100557.

[Hu2016] Hu Xiaosong, Li Shengbo, Yang Yalian. Advanced machine learning approach for lithium-ion battery state estimation in electric vehicles. IEEE Trans Transp Electrification 2016;2(2):140–9.

[Hu J2016] Chen W, Yang D, Zhao B, Song H, Ge B, *Energy Performance of ETFE cushion roof integrated photovoltaic/thermasystem on hot and cold days,* 2016, Appl Energy,173:40–51.

[Huang2011] Huang, B. J., et al. (2011). *Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker*.

[Hudisteanu2026] Hudisteanu S.V, Chereches N.C., (2026), Instalatii electrice fotovoltaice pentru cladiri, Ed. Univ. Tehnice Iasi, ISBN 978-973-621-580-3

[In2020] In Sung Jung, Jaeho Choi, Deb Kumar Shah, and M. Shaheer Akhtar, "Development and Characterization of Solar Simulator for Solar Cells," *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, vol. 15, no. 6, pp. 720-724, August 2020.

[Jonke2013] Jonke P., Eder C., Stöckl J., Schwark M. Development of a module integrated photo-voltaic monitoring system. InIndustrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE;pp. 8080–84; 2013.

[Kannan, N.2016], Vakeesan, D, *Solar energy for future world—A review*, 2016, Renew. Sustain. Energy Rev. 62, 1092–1105. [CrossRef].

[Liu2010] Liu J., Zhao B., Wang J., Zhu Y., Hu J., Application of power line communication in smart power consumption. In: Power Line Communications and Its Applications (ISPLC) IEEE International Symposium on 2010;pp.303–07; 2010

[Madeti2017] S.R. Madeti, S.N. Singh, Monitoring system for photovoltaic plants: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67 (2017) 1180–1207.

[Matsumoto2016] Matsumoto, Y., Norberto, C., & Asomoza, R. (2016). *Three-year PV system performance in Mexico City*.

[Mitchell2015] Mitchell B. How fast is a Wi-Fi Network? 25/06/2015. Available from:

[Natkaniec2013] Natkaniec M, Kosek-Szott K, Szott S, Bianchi G., A survey of medium access mechanisms for providing QoS in ad-hoc networks. IEEE Commun Surv Tutor 2013;15(2):592–620.

[Ortega2017] Ortega E. et al., Study of Photovoltaic Systems Monitoring Methods, 44rd IEEE Photovoltaic Specialists Conferenc, June 2017 At: Washington.

[Ortega2017] Ortega, E., et al. (2017). *Study of Photovoltaic Systems Monitoring Methods*.

[Pomares-Hernández C. 2021] Zuluaga-García, E.A.; Escorcia Salas, G.E.; Robles-Algarín, C.; Sierra Ortega, *J. Computational Modeling of Passive and Active Cooling Methods to Improve PV Panels Efficiency*, 2021, Appl. Sci. , 11, 11370.

[Popovici2024] Popovici C.G, G. Filipescu , N.-C. Cherecheș, S.-V. Hudișteanu, E.-F. Țurcanu, Ana Diana Ancas , Marina Verdeș, **P. V. Roșu**, NUMERICAL SIMULATION OF IMPROVING THE EFFICIENTY OF PHOTOVOLTAIC THERMAL PANELS, JOURNAL OF APPLIED ENGINEERING SCIENCES, 2024, 14(1), pp.81-88. **WoS**

[**Roșu2020**] **Petru Valentin Rosu**, Adrian-Traian Plesca, Georgel Gabor, Gabriel Chiriac, *Optimizing the Operation of Photovoltaic Panel Systems,* 11th Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2020), pp. 318-321. **WoS**

[Roșu2022] *Sistemele fotovoltaice și monitorizarea lor. Stadiul actual al metodelor și strategiilor de monitorizare în sisteme fotovoltaice,* referat științific, Universitatea "Gh. Asachi", Iaşi, 2022.

[Roșu2022] *Studiul unor metode și tehnici noi de monitorizare a sistemelor fotovoltaice pentru aplicații specifice* referat științific, Universitatea "Gh. Asachi", Iaşi, 2022

[**Roșu2025**a] **P.V. Roşu**, C.C. Alexandru, S. Hudişteanu, C. Chereches, E. Turcanu, R. Olaru, *Comparative analysis of energy manage ment strategies in an off-grid photovoltaic system with storage and active load control*, 15th International Conference on Electromechanical and Energy Systems-SIELMEN | 2025 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL AND ENERGY SYSTEMS, SIELMEN, pp.702-706. **WoS**

[**Roșu2025b**] **P.V. Roşu**, C.C. Alexandru, S. Hudişteanu, C. Chereches, E. Turcanu, R. Olaru**,** *Design and Implementation of a KNX Energy Management System for Optimizing Self-Consumption in Off-Grid Photovoltaic Systems*, 15th International Conference on Electromechanical and Energy Systems-SIELMEN. **WoS**

[Roșu2026] Roșu PV, Alexandru, C.C., E. Turcanu, 2026 *Current status of methods and strategies in photovoltaic monitoring systems* trimis spre evalurare la Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Secția: Electrotehnică, Energetică, Electronică.

[S. Sowa2018] S. Sowa, "Increasing the energy efficiency of hybrid RES installations using KNX system," in Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation, 2018, pp. 387-394.

[Tahar, M.2022], Rosli, N., *Simulation Study of Cooling System for Photovoltaic Panel Using Ansys M.S.M*, 2022, Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology (JMMST) vol. 6, issue 2, 26 – 33.

[Vergura2009a] Vergura S, Acciani G, Amoruso V, Patrono GE, Vacca F. Descriptive and inferential statistics for supervising and monitoring the operation of fotovoltaic plants. IEEE Trans Ind Electron 2009;56(11):4456–64.

[Yau YH2016] Lim KS. *Energy analysis of green office buildings in the tropics-Photovoltaic system*. Energy Build 2016; 126:177–93

[Zidani2012] Zidani C, Benyoucef B, Madini N. Exergetic assessment of transmission–concentrated solar energy systems via optical fibres for building applications. Int J Energy 2012;11(2):216–28.