



UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
FACULTATEA DE MECANICĂ



Cercetări privind sistemele energetice hibride solar–CHP REZUMAT

Autor: ing. Eduard Enășel

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Gheorghe Dumitrașcu

IAȘI – 2025

UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 18 decembrie 2025 la ora 11:00 în sala MEC I-202, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

“ CERCETĂRI PRIVIND SISTEMELE ENERGETICE HIBRIDE SOLAR-CHP”

elaborată de doamna/ domnul **ENĂȘEL EDUARD** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|--|------------------------|
| 1. (Dr.ing. Hrițcu Eusebiu, Univ. Gheorghe Asachi) | președinte |
| 2. (Prof.univ.em.dr.ing. Dumitrașcu Gheorghe, Univ. Gheorghe Asachi) | conducător de doctorat |
| 3. (Prof.univ.dr.ing. Horbaniuc Bogdan, Univ. Gheorghe Asachi) | referent oficial |
| 4. (Conf.univ.dr.ing. Panaite Carmen Ema, Univ. Gheorghe Asachi) | referent oficial |
| 5. (Șef lucrări.dr.ing. Lupu Ana Georgiana, Univ. Gheorghe Asachi) | referent oficial |

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

*pentru susținerile online se va preciza link-ul și soluția de software

Rezumatul tezei

Teza investighează performanța energetică și economică a sistemelor fotovoltaice autonome și a sistemelor hibride solar-CHP (Combined Heat and Power) destinate alimentării locuințelor rezidențiale în condiții off-grid, cu accent pe funcționarea în climat temperat-continental, caracterizat prin variații sezoniere pronunțate de irradiație și temperatură.

Lucrarea combină o abordare experimentală amplă, desfășurată în condiții reale, cu un cadru numeric dezvoltat în C++, pentru evaluarea producției de energie, a eficienței reale a panourilor PV, a necesarului zilnic al unei locuințe și a modului optim de integrare a unei micro-unități CHP într-un sistem hibrid cu stocare electrică și termică.

1 Introducere

1.1 Fundamentarea tezei și contextul general

Tranziția energetică globală reprezintă una dintre principalele direcții strategice ale secolului XXI, fiind determinată de necesitatea reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră, de limitarea dependenței de combustibilii fosili și de creșterea securității energetice. În acest context, sursele regenerabile de energie, în special energia solară fotovoltaică, au cunoscut o dezvoltare accelerată, atât din punct de vedere tehnologic, cât și al gradului de implementare la nivel rezidențial.

Cu toate acestea, funcționarea sistemelor fotovoltaice autonome este profund influențată de caracteristicile climatice locale, în special de variabilitatea sezonieră a irradiației solare și de efectele temperaturii asupra performanței electrice a modulelor PV. În regiunile cu climat temperat-continental, caracterizate prin ierni lungi, frecvent înorate și cu niveluri reduse de irradiație, sistemele exclusiv solare întâmpină dificultăți majore în asigurarea autonomiei energetice pe tot parcursul anului.

În acest cadru, integrarea surselor complementare de energie devine esențială. Sistemele de cogenerare de mică putere (micro-CHP – Combined Heat and Power) oferă posibilitatea producerii simultane de energie electrică și termică, cu randamente globale ridicate, reprezentând o soluție viabilă pentru completarea aportului solar, în special în sezonul rece. Asocierea dintre sistemele fotovoltaice, unitățile micro-CHP și capacitățile de stocare electrică și termică conduce la dezvoltarea unor sisteme energetice hibride capabile să asigure un nivel ridicat de autonomie, flexibilitate operațională și reziliență energetică în regim off-grid.

Teza de doctorat se înscrie în acest context, abordând problematica performanței reale a sistemelor fotovoltaice și a integrării acestora într-o arhitectură hibridă solar-CHP, fundamentată pe date experimentale obținute în condiții reale de funcționare și pe modelare numerică dedicată.

1.2 Motivația studiului

Deși literatura de specialitate oferă numeroase studii privind performanța modulelor fotovoltaice și a sistemelor de cogenerare, majoritatea analizelor se bazează pe date

standardizate de laborator sau pe simulări realizate în condiții ideale. Aceste abordări nu reflectă în mod fidel comportamentul real al sistemelor energetice în exploatare, în special în condiții climatice variabile și în aplicații rezidențiale off-grid.

Motivația principală a acestei cercetări derivă din necesitatea unei evaluări realiste a performanței energetice a panourilor fotovoltaice, ținând cont de influența simultană a irradiației solare, temperaturii ambientale și caracteristicilor constructive ale diferitelor tehnologii PV. În plus, există o nevoie clară de a analiza modul în care aceste performanțe reale se corelează cu necesarul energetic al unei locuințe și cu funcționarea unui sistem hibrid ce include o unitate micro-CHP și sisteme de stocare.

Un alt element motivațional îl constituie lipsa unor studii integrate care să trateze simultan comparația experimentală între mai multe tehnologii fotovoltaice (amorfă, policristalină și monocristalină), modelarea numerică validată prin date reale și evaluarea funcționării unui sistem solar-CHP într-un scenariu rezidențial specific climatului temperat-continental.

Prin urmare, teza urmărește să reducă decalajul dintre modelările teoretice și comportamentul real al sistemelor energetice, oferind o bază solidă pentru proiectarea și dimensionarea sistemelor hibride rezidențiale off-grid.

1.3 Obiectivele cercetării

Obiectivul general al tezei constă în evaluarea performanței energetice și economice a sistemelor fotovoltaice autonome și a sistemelor hibride solar-CHP destinate alimentării locuințelor rezidențiale în regim off-grid, pe baza unei abordări experimentale și numerice integrate.

Pentru atingerea acestui obiectiv general, au fost definite următoarele obiective specifice:

- proiectarea și realizarea unei platforme experimentale complete pentru testarea panourilor fotovoltaice în condiții reale de mediu;
- analiza comparativă a performanței electrice a trei tehnologii fotovoltaice distincte (amorfă, policristalină și monocristalină), în regim dinamic de iradiație și temperatură;
- determinarea eficienței reale de conversie a modulelor PV, pentru scenarii sezoniere diferite (iarnă și vară);
- dezvoltarea unui model numeric dedicat (C++ Model 1) pentru evaluarea producției zilnice de energie, a costului energiei și a perioadei de recuperare a investiției;
- extinderea modelării prin integrarea unei unități micro-CHP și a sistemelor de stocare electrică și termică (C++ Model 2);
- evaluarea funcționării sistemului hibrid solar-CHP într-un scenariu rezidențial off-grid, adaptat condițiilor climatice locale;
- identificarea unei configurații optime și a unei logici operaționale eficiente pentru managementul energetic al sistemului hibrid.

1.4 Abordare metodologică

Pentru realizarea obiectivelor propuse, teza adoptă o abordare metodologică structurată pe două direcții principale: experimentală și numerică.

Abordarea experimentală constă în realizarea și exploatarea unei platforme de măsurare amplasate în condiții reale, pe acoperișul unei clădiri rezidențiale. Aceasta include trei panouri fotovoltaice reprezentative pentru principalele tehnologii utilizate la scară rezidențială, sisteme de achiziție a datelor pentru parametrii electrici și termici, senzori de irradiație solară și sisteme de stocare și control al sarcinilor. Campaniile experimentale au fost desfășurate pe perioade extinse, acoperind atât sezonul rece, cât și sezonul cald, pentru a surprinde variabilitatea reală a resursei solare.

Abordarea numerică completează studiul experimental prin dezvoltarea unor modele de calcul implementate în limbajul C++, capabile să proceseze datele măsurate și să simuleze funcționarea sistemului energetic la nivel zilnic și sezonier. Modelele dezvoltate permit evaluarea producției integrate de energie, analiza eficiențelor reale, estimarea indicatorilor economici și simularea interacțiunii dintre subsistemele fotovoltaic, CHP și stocare.

Prin combinarea acestor două direcții metodologice, teza asigură o analiză coerentă și validată a sistemelor energetice investigate, oferind rezultate aplicabile direct în proiectarea și optimizarea sistemelor rezidențiale off-grid.

2 Analiza literaturii de specialitate și fundamente teoretice

2.1 Energia și rolul său în societatea modernă

Energia reprezintă un concept fundamental în științele ingineresti și fizice, fiind definită ca abilitatea unui sistem de a efectua lucru mecanic sau de a produce transformări într-un mediu dat. Diferitele forme de energie – termică, electrică, mecanică, chimică, radiantă sau nucleară – se caracterizează prin proprietăți distincte privind stocarea, transferul și conversia, acestea fiind guvernate de legile fundamentale ale fizicii.

Transformările energetice respectă principiul conservării energiei, care afirmă că energia nu poate fi creată sau distrusă, ci doar transformată, precum și a doua lege a termodinamicii, care introduce conceptul de entropie și limitele conversiilor reale. Relația de echivalență masă–energie evidențiază caracterul universal al energiei, iar mecanismele de transfer prin lucru mecanic, căldură și radiație stau la baza funcționării tuturor sistemelor energetice. Exemplele de conversii energetice, frecvent întâlnite în aplicațiile tehnologice, ilustrează versatilitatea și interdependența diferitelor forme de energie.

Dincolo de dimensiunea teoretică, energia constituie un pilon esențial al societății moderne, susținând activitățile economice, infrastructurile critice și nivelul de trai. Creșterea populației, urbanizarea și progresul tehnologic conduc la o cerere energetică în continuă expansiune, într-un context marcat de constrângeri legate de schimbările climatice și de caracterul limitat al resurselor fosile.

În acest cadru, tranziția către sisteme energetice sustenabile, cu emisii reduse și bazate pe surse regenerabile, devine o necesitate strategică. Energia nu mai este doar o problemă tehnică, ci o provocare societală majoră, iar asigurarea accesului la o energie curată, fiabilă și accesibilă reprezintă o condiție esențială pentru dezvoltarea durabilă și echitatea socială.

2.2 Contextul energetic global

Peisajul energetic global a fost dominat, pe parcursul ultimelor decenii, de utilizarea combustibililor fosili, care au asigurat peste 80% din necesarul mondial de energie primară. Petrolul, cărbunile și gazele naturale au constituit baza sistemelor energetice, în special în economii majore precum China, Statele Unite ale Americii și statele din Golf, în ciuda eforturilor progresive de creștere a eficienței energetice și de dezvoltare a tehnologiilor curate.

Până în anul 2020, tranziția către surse regenerabile a avansat într-un ritm insuficient pentru a produce o modificare structurală a mixului energetic global. Pandemia COVID-19 a determinat o scădere temporară a cererii globale de energie și a emisiilor de gaze cu efect de seră, însă această evoluție a fost conjuncturală. Începând cu 2021, consumul energetic a revenit rapid și a depășit nivelurile anterioare pandemiei, fiind însoțit de creșteri semnificative ale prețurilor energiei și de accentuarea sărăciei energetice.

Criza energetică din 2022, generată de conflictul din Ucraina, a evidențiat vulnerabilitatea sistemelor energetice bazate pe combustibili fosili și dependența acestora de factori geopolitici. Creșterea simultană a prețurilor la principalele resurse energetice a afectat securitatea energetică și stabilitatea economică, în special în Europa și în regiunile dependente de importuri.

În perioada post-2023, tranziția energetică globală s-a accelerat, susținută de politici de decarbonizare, reforme strategice și inovații tehnologice. Capacitatea instalată din surse regenerabile a crescut rapid, cu un rol dominant al tehnologiilor fotovoltaice și eoliene, favorizat de reducerea semnificativă a costurilor și de creșterea eficienței panourilor fotovoltaice. Aceste evoluții au consolidat competitivitatea energiei solare la scară globală.

Cadrul politic internațional a fost orientat tot mai mult către atingerea neutralității climatice, prin actualizarea contribuțiilor naționale și integrarea obiectivelor climatice în strategiile energetice. Instrumentele de planificare energetică integrată au devenit esențiale pentru analiza scenariilor de decarbonizare și pentru corelarea deciziilor energetice cu obiectivele pe termen lung.

Au fost promovate soluții energetice distribuite, electrificarea și implicarea consumatorilor ca prosumatori, în special la nivel european. Tehnologii emergente precum hidrogenul verde, noile sisteme de stocare și digitalizarea infrastructurilor energetice au început să joace un rol strategic în creșterea flexibilității și rezilienței sistemelor energetice.

În pofida progreselor înregistrate, emisiile globale de CO₂ asociate sectorului energetic au atins valori record în 2023, determinate în principal de creșterea consumului de cărbune în economiile emergente. Aceste evoluții subliniază dificultățile persistente ale tranziției energetice globale, dar și necesitatea accelerării implementării unor sisteme energetice sustenabile, diversificate și reziliente.

3 Sursele de energie: clasificare și caracteristici

Sursele primare de energie sunt clasificate, în funcție de ritmul de regenerare și sustenabilitatea pe termen lung, în surse neregenerabile și surse regenerabile (RES). Sursele regenerabile, precum energia solară și eoliană, sunt caracterizate prin reînnoire naturală și disponibilitate practic inepuizabilă la scara timpului uman, în timp ce combustibilii fosili

reprezintă resurse finite, cu rate de epuizare mult superioare proceselor de regenerare geologică și cu impact semnificativ asupra mediului.

La nivel global, sistemul energetic a înregistrat o creștere susținută a capacităților regenerabile, care au ajuns să reprezinte peste 40% din capacitatea instalată de generare a energiei electrice. Energia solară și eoliană au contribuit dominant la noile capacități instalate, iar producția de electricitate din surse regenerabile a atins valori apropiate de 30% din totalul global. Cu toate acestea, combustibilii fosili continuă să domine consumul total de energie, reflectând o dependență structurală de infrastructuri energetice cu intensitate ridicată de carbon.

Evoluțiile recente au evidențiat o tranziție graduală a mixului energetic, cu o reducere a ponderii combustibililor fosili în producția de energie electrică. Totuși, proiecțiile indică menținerea acestora ca sursă majoră de energie pe termen lung, în absența unor schimbări substanțiale de politică și investiții. Această inerție sistemică constituie una dintre principalele bariere în atingerea obiectivelor climatice asumate la nivel internațional.

Pentru alinierea la țintele de decarbonizare, este necesară o creștere semnificativă a investițiilor în tehnologii cu emisii reduse, incluzând sursele regenerabile, sistemele de stocare a energiei, modernizarea rețelelor electrice și dezvoltarea combustibililor sustenabili. Nivelul actual al finanțării, deși ridicat, rămâne insuficient pentru atingerea neutralității climatice, fiind necesare investiții anuale substanțial mai mari.

Utilizarea eficientă a resurselor reprezintă o condiție critică pentru sustenabilitatea sistemelor energetice. Risipa de resurse, inclusiv cea asociată lanțurilor alimentare, implică pierderi semnificative de energie încorporată și contribuie indirect la creșterea emisiilor de gaze cu efect de seră. Aceste aspecte subliniază necesitatea unei abordări sistemice, bazate pe eficiență energetică, reducerea pierderilor și tranziția de la modele energetice liniare către sisteme integrate, circulare și reziliente.

3.1 Surse regenerabile de energie

Sursele neregenerabile de energie sunt resurse finite, cu rate de epuizare mult superioare capacității lor de regenerare naturală, incluzând combustibilii fosili (petrol, cărbune, gaze naturale) și combustibilii nucleari. Aceste surse au stat la baza dezvoltării industriale moderne, datorită densității energetice ridicate și capacității de a furniza energie la scară largă și în regim continuu.

Combustibilii fosili reprezintă principala sursă globală de emisii de gaze cu efect de seră, arderea acestora contribuind direct la creșterea concentrațiilor atmosferice de CO₂ și la instabilitatea climatică. Procesele de extracție, rafinare și transport implică pierderi energetice și riscuri semnificative pentru mediu, iar dependența de aceste resurse este amplificată de volatilitatea prețurilor și de factori geopolitici.

Petrolul și cărbunele se caracterizează prin intensitate ridicată a emisiilor, cărbunele fiind combustibilul cu cel mai mare impact climatic per unitate de energie produsă. Gazul natural, deși prezintă emisii mai reduse la punctul de utilizare, are o amprentă climatică dependentă de gestionarea scurgerilor de metan pe întregul lanț de aprovizionare. Energia nucleară oferă producție electrică cu emisii scăzute de carbon în exploatare, însă este asociată cu provocări majore privind siguranța, gestionarea deșeurilor radioactive și costurile ciclului de viață.

Evoluția pe termen lung a concentrației atmosferice de CO₂, evidențiată de Curba Keeling, confirmă impactul cumulativ al utilizării combustibililor fosili. În acest context, caracterul limitat al surselor neregenerabile și costurile de mediu asociate subliniază necesitatea accelerării tranziției către sisteme energetice regenerabile, eficiente și sustenabile.

3.2 Surse regenerabile de energie (energie verde)

Sursele regenerabile de energie provin din procese naturale cu capacitate de reînnoire și se caracterizează prin emisii reduse sau inexistente de gaze cu efect de seră în faza de exploatare. Acestea reprezintă un element esențial pentru sustenabilitatea pe termen lung a sistemelor energetice și pentru reducerea dependenței de resurse finite și poluante.

La nivel global, sursele regenerabile au dobândit un rol tot mai important în producția de energie electrică, atingând aproximativ 30% din total în anul 2023, cu energia solară și eoliană ca principali vectori ai creșterii capacităților instalate. Extinderea acestora este susținută de modularitate, scalabilitate și reducerea progresivă a costurilor tehnologice.

Energia solară permite conversia directă a radiației solare în energie electrică sau termică, oferind emisii zero în exploatare și flexibilitate ridicată de implementare, dar fiind limitată de intermitență și necesitatea stocării sau a surselor complementare.

Energia eoliană valorifică energia cinetică a vântului, oferind producție fără emisii și complementaritate față de solar, cu limitări legate de variabilitatea resursei și impactul local asupra mediului.

Energia hidroelectrică constituie o sursă matură și fiabilă de energie de bază, cu durată mare de viață, dar este asociată cu impact ecologic și vulnerabilitate la variabilitatea hidrologică.

Energia geotermală oferă producție constantă cu emisii scăzute, fiind însă limitată geografic și asociată cu costuri ridicate de exploatare.

Biomasa permite generarea de energie la cerere prin valorificarea materialelor organice, dar necesită gestionare atentă pentru a evita efectele negative asupra mediului și utilizării terenurilor.

Tranziția către surse regenerabile, susținută de sisteme de stocare și infrastructuri inteligente, reprezintă fundamentul dezvoltării unor sisteme energetice curate, reziliente și adaptate cerințelor societății moderne.

4 Surse regenerabile de energie și modalități de valorificare

4.1 Energia eoliană – funcționare și aplicabilitate

Energia eoliană este o sursă regenerabilă matură și scalabilă, cu emisii aproape nule în exploatare și costuri competitive, care joacă un rol esențial în decarbonizarea sistemelor energetice. Dezvoltarea sa a fost susținută de progresele în proiectarea turbinelor, creșterea dimensiunii rotoarelor, utilizarea turnurilor mai înalte și extinderea instalațiilor offshore, unde resursa eoliană este mai abundentă și mai stabilă.

Turbinele eoliene convertesc energia cinetică a vântului în energie electrică, performanța fiind determinată de viteza vântului, densitatea aerului și aria rotorului. Sistemele

onshore oferă costuri reduse și implementare facilă, în timp ce sistemele offshore asigură factori de capacitate superiori, în pofida investițiilor inițiale mai ridicate.

La nivel global, capacitatea eoliană instalată a depășit pragul de 1000 GW, iar costul nivelat al energiei a scăzut semnificativ, atingând valori comparabile cu cele ale surselor convenționale. Strategiile avansate de monitorizare și întreținere predictivă sporesc fiabilitatea și eficiența operațională, consolidând rolul energiei eoliene în mixul energetic global.

4.2 Energie hidroelectrică – principii, impact și potențial

Energia hidroelectrică este una dintre cele mai vechi și mai mature forme de valorificare a surselor regenerabile, fiind utilizată de peste două milenii, iar pentru generarea de electricitate la scară industrială începând cu sfârșitul secolului al XIX-lea. În prezent, hidroenergia reprezintă o componentă esențială a mixului energetic global, apreciată pentru producția cu emisii scăzute de carbon, fiabilitatea ridicată și capacitatea de a furniza energie de bază și servicii de echilibrare a rețelei.

Principiul de funcționare constă în conversia energiei potențiale a apei stocate la înălțime în energie mecanică și ulterior electrică, prin intermediul turbinelor și generatoarelor. Din punct de vedere tehnologic, sistemele hidroelectrice sunt clasificate în centrale cu acumulare pe bază de baraje, sisteme pe firul apei și centrale cu acumulare prin pompare, aceasta din urmă având un rol strategic în stocarea energiei și managementul vârfurilor de sarcină.

La nivel global, energia hidroelectrică rămâne cea mai importantă sursă de electricitate regenerabilă, asigurând aproximativ 15% din producția totală de energie electrică și peste jumătate din producția regenerabilă. Capacitatea instalată a depășit 1400 GW, cu contribuții majore din partea Chinei, Braziliei, Statelor Unite, Canadei și Rusiei. Din perspectivă economică, proiectele hidroelectrice implică investiții inițiale ridicate, dar beneficiază de costuri scăzute de operare și durate de viață foarte mari, LCOE situându-se printre cele mai reduse valori ale surselor regenerabile.

Pe lângă avantajele energetice, hidroenergia oferă beneficii auxiliare precum reglajul frecvenței, stabilizarea tensiunii și suportul pentru integrarea surselor variabile. Totuși, proiectele de mari dimensiuni pot genera impacturi sociale și ecologice semnificative, incluzând strămutarea comunităților și perturbarea ecosistemelor acvatice. În acest context, dezvoltarea hidroelectrică modernă pune un accent crescut pe criteriile de sustenabilitate, pentru a asigura un echilibru între securitatea energetică, protecția mediului și echitatea socială.

4.3 Energie geotermală – resurse, conversie și perspective

Energia geotermală valorifică căldura internă a Pământului, generată de dezintegrarea radioactivă și de căldura reziduală a formării planetei, oferind o sursă regenerabilă cu producție continuă și independentă de condițiile meteorologice. Conversia energetică se realizează prin tehnologii adaptate temperaturii și adâncimii resursei, incluzând pompe de căldură geotermale, sisteme geotermale stimulate (EGS), circuite închise și geo-structuri energetice.

La nivel global, energia geotermală este exploatată în peste 30 de țări, cu o capacitate instalată ce depășește 16000 MWe, fiind concentrată în regiuni cu gradient geotermal ridicat. Deși ponderea sa în mixul energetic global rămâne redusă, energia geotermală se remarcă prin

factori de capacitate ridicați (70–90%) și emisii directe foarte scăzute, ceea ce o recomandă ca sursă de energie de bază.

Principalele limitări sunt costurile inițiale ridicate, riscurile asociate explorării și potențialele efecte de seismicitate indusă, care influențează competitivitatea economică și acceptarea publică. Cu toate acestea, progresele în tehnologiile EGS, ciclurile binare, digitalizarea și integrarea în sisteme energetice inteligente consolidează rolul energiei geotermale ca element strategic pentru sisteme energetice sustenabile și reziliente.

4.4 Bioenergie – surse, conversie și rol în decarbonizare

Energia din biomasă valorifică resurse organice regenerabile prin procese biochimice și termochimice, oferind o sursă flexibilă de energie regenerabilă, capabilă să furnizeze electricitate, căldură și combustibili. Conversia se realizează prin digestie anaerobă, fermentație și hidroliză enzimatică, respectiv prin piroliză, gazeificare și lichefiere hidrotermală, în funcție de caracteristicile materiei prime și de aplicația energetică vizată.

Biocombustibilii sunt clasificați pe generații, de la cei derivați din culturi alimentare până la sisteme avansate bazate pe biomasă lignocelulozică, alge și biologie sintetică, cu scopul reducerii competiției pentru terenuri și creșterii densității energetice. Integrarea biomasei în sisteme energetice hibride, susținută de optimizare digitală și inteligență artificială, îmbunătățește performanța tehnico-economică și reduce emisiile pe întreg lanțul valoric.

Din perspectivă climatică, biomasa poate avea emisii scăzute sau chiar negative atunci când este combinată cu tehnologii de captare și stocare a carbonului (BECCS), însă impactul său depinde de proveniența materiei prime, utilizarea terenurilor și metodele de conversie.

Limitările principale sunt legate de lanțurile de aprovizionare, acceptarea socială și cadrul de guvernare, ceea ce impune o abordare integrată pentru valorificarea sustenabilă a bioenergiei.

5 Energia solară

5.1 Evoluție istorică și relevanță culturală

Energia solară a evoluat de la utilizări pasive empirice la sisteme energetice avansate, termice și fotovoltaice, reflectând progresul concomitent al cunoașterii științifice și al nevoilor societale. Primele aplicații documentate au inclus adaptarea arhitecturii la traiectoria solară pentru încălzire și iluminat natural, precum și experimente timpurii de concentrare a radiației solare. Secolul al XVIII-lea a marcat fundamentarea utilizării solare termice prin dezvoltarea cuptorului solar, demonstrând posibilitatea captării și stocării căldurii.

Descoperirea efectului fotovoltaic în secolul al XIX-lea a deschis calea conversiei directe a radiației solare în energie electrică, progresul fiind consolidat prin realizarea primelor celule funcționale pe bază de seleniu și, ulterior, prin introducerea celulelor din siliciu cu aplicabilitate practică. În a doua jumătate a secolului XX, energia solară a devenit strategică, fiind adoptată în aplicații spațiale și stimulată de contextul geopolitic al crizelor energetice.

În ultimele decenii, reducerea semnificativă a costurilor, creșterea eficiențelor de conversie și dezvoltarea tehnologiilor avansate, precum celulele tandem și sistemele de stocare termică, au condus la integrarea energiei solare la scară industrială și comercială. Evoluția

istorică a energiei solare evidențiază continuitatea dintre soluțiile timpurii și sistemele hibride actuale, subliniind rolul acestora ca pilon esențial al tranziției energetice durabile.

5.2 Energia solară ca resursă regenerabilă

Energia solară reprezintă o resursă regenerabilă majoră, fundamentată fizic pe procesele de fuziune nucleară din interiorul Soarelui, care generează radiație electromagnetică propagată către Pământ. Deși planeta interceptează doar o fracțiune extrem de redusă din puterea solară totală emisă, această energie este suficientă pentru a susține climatul și biosfera terestră, constituind totodată baza exploatării energetice solare.

Disponibilitatea resursei solare este caracterizată prin constanta solară, cu o valoare medie actualizată de aproximativ 1361 W/m^2 la limita superioară a atmosferei, supusă variațiilor sezoniere determinate de orbita eliptică a Pământului. La nivel terestru, evaluarea potențialului solar se realizează prin indicatori standardizați precum iradiația globală orizontală, iradiația directă normală și iradiația globală înclinată, esențiali pentru proiectarea sistemelor fotovoltaice și solare cu concentrare.

Radiația incidentă este influențată semnificativ de factori atmosferici și geometrici, inclusiv masa de aer, unghiul de incidență solară și variațiile sezoniere ale altitudinii solare. Pentru uniformizarea evaluărilor și a testării performanței sistemelor fotovoltaice, spectrul de referință AM1.5, asociat unei iradiații de 1000 W/m^2 , este utilizat ca standard internațional, permițând comparabilitatea rezultatelor experimentale și de simulare. Distribuția spectrală a radiației solare la sol, dominată de componentele infraroșie și vizibilă, determină în mod direct proiectarea materialelor și eficiența conversiei energetice în aplicațiile solare moderne.

5.3 Potențialul global al resursei solare și variabilitatea acesteia

Energia solară reprezintă cea mai abundentă resursă regenerabilă a Terrei, însă disponibilitatea sa este neuniformă spațial și temporal, fiind determinată de factori geografici, atmosferici și climatici. Din punct de vedere geografic, cele mai ridicate niveluri de iradiere se regăsesc în regiunile subtropicale ale „centurii solare”, unde unghiurile solare favorabile și nebulozitatea redusă conduc la valori anuale ce depășesc $2200 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$, în timp ce latitudinile înalte sunt caracterizate de potențiale semnificativ mai scăzute.

Variabilitatea temporală a iradierii solare este relativ redusă la scară interanuală, cu fluctuații ale GHI de ordinul câtorva procente, dar poate fi semnificativă pe termen scurt din cauza norilor și aerosolilor, afectând prognoza și integrarea în rețea. Proiecțiile climatice indică modificări regionale moderate ale resursei solare, cu impact diferențiat asupra tehnologiilor fotovoltaice și a celor bazate pe radiație directă. Aceste caracteristici impun proiectarea sistemelor solare cu accent pe reziliență, prin integrarea stocării energiei, a prognozei avansate și a flexibilității tehnologice în contextul schimbărilor climatice și al posibilelor intervenții de geoingenierie.

6 Căile de conversie a energiei solare

Energia solară este valorificată prin două rute tehnologice fundamentale:

- conversia termică, care transformă radiația solară în căldură utilizabilă direct sau în cicluri termodinamice;
- conversia fotovoltaică, care realizează conversia directă a luminii în electricitate prin efectul fotovoltaic.

6.1 Conversia solară termică

Conversia solară termică constă în captarea radiației solare și transformarea acesteia în energie termică, utilizată atât în aplicații rezidențiale, cât și industriale. La scară mică, sistemele solare termice sunt clasificate în funcție de circulația agentului termic în instalații cu circulație naturală sau forțată și se bazează în principal pe colectoare plane și colectoare cu tuburi vidate, care oferă randamente ridicate pentru aplicații de joasă și medie temperatură. Performanța acestora a fost îmbunătățită prin acoperiri selective, optimizarea transferului termic și integrarea materialelor cu schimbare de fază în sistemele de stocare.

Pentru aplicații industriale și producția de energie electrică, tehnologiile solare termice concentrate utilizează sisteme optice de concentrare precum colectoarele cilindro-parabolice, concentratoarele parabolice compuse, antenele parabolice și reflectoarele Fresnel liniare, fiecare adaptată unor intervale specifice de temperatură și condiții de iradiere. Integrarea stocării energiei termice, în special prin săruri topite și PCM-uri, conferă sistemelor CSP caracter dispeceerizabil și le permite să contribuie la stabilitatea și flexibilitatea rețelelor energetice. Evoluția capacităților instalate, proiectele hibride de mari dimensiuni și progresele în stocarea termică evidențiază rolul strategic al conversiei solare termice în decarbonizarea aplicațiilor termice și în tranziția energetică globală.

6.2 Conversia solară fotovoltaică

Conversia fotovoltaică constă în transformarea directă a radiației solare în energie electrică prin efectul fotoelectric, realizată în celule solare pe bază de semiconductori cu joncțiune p-n. Absorbția fotonilor generează perechi electron-gol, separate de câmpul electric intern, producând curent electric continuu la bornele dispozitivului.

Performanța conversiei este determinată în principal de energia benzii interzise a materialului semiconductor, siliciul cristalin fiind dominant datorită echilibrului dintre eficiență, stabilitate și maturitate industrială. Tehnologiile fotovoltaice includ siliciul mono- și policristalin, filmele subțiri și materiale emergente, precum perovskitele și celulele tandem, cu potențial de eficiență ridicată.

Randamentul sistemelor depinde atât de proprietățile materialelor, cât și de condițiile de operare, fiind evaluat în condiții standardizate de testare pentru asigurarea comparabilității performanțelor.

7 Celule fotovoltaice, module și arhitecturi de sistem

Tehnologiile fotovoltaice sunt structurate pe trei niveluri funcționale: celula solară, modulul fotovoltaic și sistemul complet, care integrează modulele cu echipamentele electrice și structurile de suport. Performanța globală a instalației rezultă din interacțiunea dintre proprietățile materialelor, arhitectura și interconectarea celulelor, precum și condițiile de operare, influențând direct producția de energie și fiabilitatea pe termen lung.

7.1 Celule solare – structură și funcționare

Celulele fotovoltaice constituie elementul funcțional central al sistemelor PV, realizând conversia directă a radiației solare în energie electrică prin efectul fotovoltaic. În celulele standard din siliciu cristalin, o joncțiune p–n generează un câmp electric intern care separă perechile electron–gol produse prin absorbția fotonilor, permițând apariția fotocurentului în circuit extern.

Performanța este limitată de pierderi optice și de recombinare, motiv pentru care arhitecturile moderne integrează straturi antireflexive, pasivare de suprafață, dopaj selectiv și câmpuri posterioare pentru creșterea tensiunii de circuit deschis și a eficienței.

Comportamentul electric este descris uzual prin modelul echivalent cu o singură diodă, care include fotocurentul, dioda și rezistențele parazite serie și de derivare, fiind utilizat în analiză și simulare. Caracteristica I–V definește parametrii principali de performanță: curentul de scurtcircuit, tensiunea de circuit deschis, punctul de putere maximă și factorul de umplere, care împreună determină eficiența de conversie. În exploatare reală, temperatura este factorul extern dominant: creșterea acesteia reduce în principal tensiunea și puterea, motiv pentru care se utilizează indicatori precum NOCT și coeficientul termic al puterii, iar strategiile de management termic și soluțiile hibride PV/T devin relevante pentru menținerea randamentului energetic anual.

7.2 Proiectarea modulelor fotovoltaice și arhitecturile de sistem

Performanța și fiabilitatea sistemelor fotovoltaice sunt determinate nu doar de conversia la nivel de celulă, ci și de proiectarea modulului și de arhitectura de sistem, care stabilesc interacțiunea cu invertoare, stocare și rețeaua electrică. La nivel de modul, interconectarea celulelor (preponderent în serie) definește caracteristicile electrice, iar umbrirea sau defectele pot induce nepotriviri de curent și puncte fierbinți; diodele de bypass și topologiile avansate de interconectare cresc toleranța la neuniformități.

Modulele sunt laminate multistrat (sticlă frontală, încapsulare, celule, ramă, cutie de conexiuni și cablare), iar selecția materialelor influențează transmisia optică, disiparea termică, bariera la umiditate, rezistența mecanică și durabilitatea. Standardizarea formatelor (60/72 celule) este completată de soluții precum half-cut și module bifaciale, care reduc pierderile rezistive și pot crește randamentul în condiții reale, inclusiv prin valorificarea iradiției pe fața posterioară. Modulele hibride PV/T extind funcționalitatea prin recuperarea căldurii reziduale, crescând randamentul energetic total și limitând supraîncălzirea celulelor.

La nivel de sistem, configurațiile off-grid, conectate la rețea și hibride implică strategii diferite de conversie, control și stocare (inclusiv reglatoare PWM/MPPT și controlere inteligente), influențând flexibilitatea și toleranța la defecte. Optimizarea amplasamentului prin orientare azimutală, unghi de înclinare, controlul umbririi și reducerea pierderilor de nepotrivire rămâne esențială pentru maximizarea producției anuale și a stabilității operaționale.

7.3 Strategii de răcire pentru îmbunătățirea performanței celulelor PV

Strategiile de răcire urmăresc controlul temperaturii celulelor fotovoltaice pentru limitarea pierderilor de randament și a degradării termice, contribuind la stabilitatea operațională și la creșterea producției electrice.

Metodele sunt grupate în răcire pasivă, răcire activă și soluții bazate pe materiale cu schimbare de fază (PCM), inclusiv configurații cu PCM pur și PCM îmbogățit cu aditivi.

Răcirea pasivă utilizează mecanisme fără consum energetic (convecție naturală, radiație și conducție), fiind atractivă prin fiabilitate și mentenanță redusă. Implementările includ ventilarea naturală optimizată, montajul fotovoltaic flotant (care beneficiază de efectul termic al apei), disipatori cu aripioare și tuburi termice, capabile să evacueze eficient căldura prin transfer de fază într-un circuit etanș, cu îmbunătățiri raportate ale puterii/eficienței în funcție de geometrie și condițiile de instalare.

Răcirea activă crește coeficientul de transfer termic prin circulație forțată (aer sau lichid), imersiune în fluide sau dispozitive termoelectrice. Deși poate reduce substanțial temperatura și permite valorificarea căldurii în arhitecturi PV/T, introduce consum energetic auxiliar, complexitate, cerințe de mentenanță și constrângeri de fiabilitate (pompe/ventilatoare, etanșări, costuri). Răcirea termoelectrică oferă control fin al temperaturii, dar este limitată de eficiența energetică și cost, fiind relevantă mai ales pentru aplicații de nișă.

Răcirea pe bază de PCM realizează o amortizare termică quasi-izotermă prin absorbția căldurii latente în intervalul de topire (30–55 °C), urmată de solidificare nocturnă și regenerarea capacității de stocare. Performanța depinde de alegerea punctului de topire, contactul termic și creșterea conductivității prin aripioare, spume metalice sau nano-aditivi (de exemplu, grafit/grafen, CuO). Integrarea PCM în sisteme PV/T poate stabiliza termic atât celulele, cât și agentul termic, însă aplicarea pe scară largă este limitată de masa suplimentară, de riscul saturării PCM în perioade de iradiere prelungită și de considerente de cost și durabilitate a compozitelor.

7.4 Mecanisme de degradare și performanța pe termen lung

Modulele fotovoltaice, inclusiv cele integrate în sisteme hibride fotovoltaic–termice, se degradează progresiv sub acțiunea factorilor de stres fizici, chimici și climatici, cu impact direct asupra producției de energie, fiabilității și rentabilității. Mecanismele dominante includ degradarea indusă de potențial electric și degradarea indusă de lumină, precum și uzura interconectărilor și creșterea rezistenței electrice interne sub acțiunea ciclurilor termice, în timp ce radiația ultravioletă, umiditatea și ciclurile de îngheț–dezgheț, respectiv sarcinile dinamice de vânt accelerează îmbătrânirea materialelor și apariția defectelor, precum delaminările, microfisurile, coroziunea și punctele fierbinți.

Degradarea pe termen lung este cuantificată prin rata anuală de pierdere a performanței, cu valori mediane sub 1% pe an pentru tehnologiile mature, iar garanțiile de performanță și protocoalele extinse ale Comisiei Electrotehnice Internaționale reflectă tranziția către durate de viață proiectate de 25–30 de ani. Creșterea durabilității este realizată prin selecția atentă a materialelor, utilizarea încapsulanților rezistenți la radiații ultraviolete și umiditate, adoptarea straturilor posterioare robuste, optimizarea metalizării și a straturilor de pasivare împotriva degradării induse de potențial, precum și prin măsuri la nivel de sistem, cum ar fi schemele de împământare și strategiile de recuperare a degradării induse de potențial, care reduc ratele anuale de degradare la aproximativ 0,3–0,4% pentru modulele fotovoltaice moderne.

8 Tehnologii solare hibride de energie și sisteme de stocare

Integrarea sistemelor fotovoltaice cu cogenerarea, trigenerarea și stocarea energiei permite creșterea eficienței globale și a fiabilității prin reducerea intermitenței resursei solare. Configurațiile hibride asigură furnizarea coordonată de energie electrică și termică, iar performanța lor depinde de alegerea tehnologiei de stocare și de implementarea unor strategii de management energetic care optimizează fluxurile și adaptarea la cererea de consum.

8.1 Sisteme de cogenerare (CHP)

Cogenerarea de energie electrică și termică (CHP) este o soluție de conversie energetică de înaltă eficiență, bazată pe producerea simultană de electricitate și căldură utilă din aceeași sursă de combustibil, prin recuperarea energiei termice care, în centralele convenționale, ar fi disipată ca pierdere. Prin valorificarea integrată a fluxurilor energetice, CHP poate atinge eficiențe globale de ordinul 80–90%, net superioare producerii separate, reducând consumul de combustibil, emisiile și pierderile din transport și distribuție.

Sistemele CHP sunt flexibile ca scară (de la micro-cogenerare până la instalații de peste 1 MW), ca unitate motrică și ca tip de combustibil. Tehnologiile uzuale includ soluții bazate pe ardere (motoare cu ardere internă, turbine cu gaz, microturbine, motoare Stirling), soluții electrochimice (pile de combustie) și soluții pe cicluri termice (turbine cu abur), cu domenii diferite de eficiență, maturitate și aplicații. Performanța este caracterizată de raportul căldură–putere, de eficiențele electrică și termică și de adaptabilitatea la sarcini variabile, fiind influențată de combustibil și de strategia de control. Integrarea stocării termice contribuie la creșterea flexibilității și la optimizarea funcționării, în special în configurații hibride, unde este necesară echilibrarea dintre producție și cererea de căldură.

8.2 Sisteme de stocare a energiei în configurații hibride solar–CHP

Dezvoltarea accelerată a sistemelor de stocare a energiei (ESS) reflectă rolul lor strategic în integrarea pe scară largă a surselor regenerabile și în creșterea flexibilității, rezilienței și securității infrastructurilor energetice moderne. Prognozele indică o extindere rapidă a capacității globale de stocare până în 2030, susținută de scăderea costurilor, maturizarea tehnologică și politici favorabile tranziției energetice.

Din perspectiva principiului fizic de funcționare, ESS se clasifică în mai multe grupe majore (**Figura 8.2**).

Sistemele electrochimice reprezintă cea mai dinamică categorie, dominate de bateriile litium-ion, completate de tehnologii emergente precum bateriile sodiu-ion, sodiu–sulf, metal–aer, în stare solidă și bateriile cu flux, caracterizate prin densitate energetică ridicată, flexibilitate de scalare și rol central în aplicații staționare și de rețea.

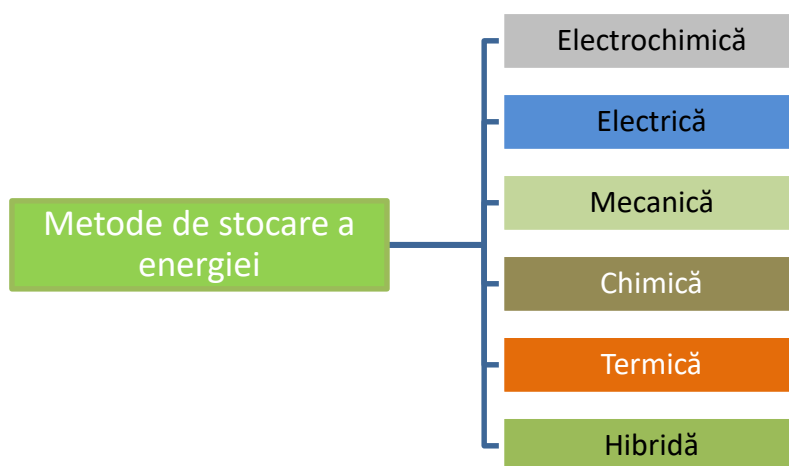


Figura 8.1 Clasificarea principalelor metode de stocare a energiei (ESS)

Stocarea electrică, prin condensatori, supercondensatori și sisteme SMES, oferă densități de putere foarte mari și timpi de răspuns de ordinul milisecundelor, fiind adecvată pentru stabilizarea rapidă a rețelelor și calitatea energiei, dar limitată energetic.

Sistemele mecanice – în special hidrocentralele cu acumulare prin pompare, stocarea gravitațională, CAES și volanții – asigură stocare pe durate orare până la sezoniere, cu durate de viață foarte lungi și costuri nivelate reduse, constituind coloana vertebrală a stocării la scară mare.

Stocarea chimică transformă energia electrică în vectori energetici precum hidrogenul, gazul sintetic sau combustibilii solari, permițând stocare pe termen lung și utilizare multi-sectorială, în pofida eficiențelor ciclice mai scăzute.

Stocarea termică completează acest tablou prin soluții de căldură sensibilă, latentă și termochimică, esențiale pentru decarbonizarea încălzirii, integrarea cogenerării și creșterea flexibilității sistemelor energetice.

Sistemele hibride de stocare combină tehnologii complementare pentru a separa funcțiile de putere și energie, optimizând performanța globală, durata de viață și eficiența economică în aplicații moderne de micrețea și rețea inteligentă.

9 Sisteme hibride de energie solar-CHP

9.1 Concept și principii de funcționare

Sistemele hibride solar-CHP combină surse solare cu unități de cogenerare pentru producerea coordonată de energie electrică și termică, asigurând eficiență ridicată și continuitate în alimentare. Energia solară este valorificată prioritar, iar unitatea CHP completează dinamic deficitul energetic și recuperează căldura reziduală, sporind randamentul global al sistemului. Prin strategii de control adaptative și integrarea stocării electrice sau termice, aceste arhitecturi oferă stabilitate operațională și flexibilitate sporită în aplicații rezidențiale, comerciale și de micrețea.

9.2 Componentele sistemului și opțiuni de configurare

Un sistem hibrid solar-CHP este structurat pe patru subsisteme: conversia energiei solare (PV, solar termic sau PV/T), unitatea micro-CHP, stocarea (electrică și/sau termică) și un EMS central, care coordonează fluxurile pentru maximizarea eficienței și a autoconsumului.

Ramura solară furnizează prioritar electricitate și/sau căldură (45–150 °C, funcție de colector), iar PV/T crește randamentul electric prin răcire și recuperează simultan căldură utilă, îmbunătățind bilanțul exergic. Unitatea CHP (ICE, microturbine, Stirling, PEMFC/SOFC) funcționează ca tampon controlabil, completând deficitul solar și livrând căldură recuperabilă către TES, cu un compromis între răspuns dinamic, η_e și cerințe de combustibil. Stocarea combină uzual TES (apă/PCM, respectiv opțiuni termochimice emergente) cu baterii Li-ion, iar în configurații specifice, cu rezerve de H₂ pentru CHP pe bază de pile de combustie, extinzând autonomia.

Managementul energetic este ierarhic (control local–supraveghere–predictiv/MPC), iar topologiile variază de la cuplări paralele simple la arhitecturi „energy-hub” integrate, unde optimizarea predictivă reduce consumul de combustibil și costurile operaționale și crește flexibilitatea sistemului.

9.3 Aplicații și contexte de implementare

Sistemele hibride solar-CHP din clasa 1–250 kW_e sunt implementate în clădiri și microrețele pentru creșterea autosuficienței, reducerea vârfurilor de sarcină și integrarea surselor regenerabile, prin combinarea generării solare cu cogenerare controlabilă și stocare.

În sectorul rezidențial, literatura indică faptul că performanța tehnico-economică depinde critic de dimensionarea câmpului PV și a stocării termice: configurațiile micro-CHP (Stirling/ORC/ICE sau PEMFC) cu TES (căldură sensibilă/PCM) pot depăși 70% autoconsum, pot reduce emisiile până la 40% și pot atinge amortizări sub 15 ani, însă cu un CAPEX cu 10–20% mai ridicat decât soluțiile separate.

În clădiri comerciale și instituționale, avantajul principal este combinația dintre optimizarea costurilor (limitarea puterii de vârf, reducerea cheltuielilor anuale cu 15–25%) și creșterea rezilienței, inclusiv funcționare insulară pentru sarcini critice prin EMS. În zone izolate/insulare, integrarea multi-sursă (PV/eolian) cu CHP pe biomasă sau SOFC și stocare hibridă (baterii, TES, H₂) poate reduce drastic consumul de motorină (până la > 90%), crește ponderea regenerabilelor peste 90% și atinge eficiențe globale de ordinul 85–90%, cu penalizarea unor investiții inițiale mai mari (\approx 20–30%), justificate de securitatea energetică și reducerea emisiilor.

9.4 Studii comparative de performanță și optimizare

Literatura recentă demonstrează maturizarea sistemelor hibride solar-CHP, depășind faza demonstrativă și oferind analize tehnico-economice și studii de optimizare pentru aplicații variate, de la clădiri rezidențiale și instituționale până la microrețele izolate și situri industriale.

Rezultatele sintetizate indică, în mod consistent, creșteri ale eficienței electrice și exergetice de ordinul 3–7%, reduceri semnificative ale consumului de combustibil, ale emisiilor de CO₂ și ale costului nivelat al energiei, precum și îmbunătățiri ale rezilienței operaționale. Metodele avansate de control, în special controlul predictiv și învățarea prin

Capitolul descrie proiectarea și implementarea unei platforme experimentale integrate pentru caracterizarea performanței a trei tehnologii PV (siliciu amorf, policristalin și monocristalin) în condiții reale de funcționare.

Modulele sunt montate pe un cadru cu înclinare și azimut reglabile, iar iradiația incidentă este măsurată cu un piranometru co-aliniat geometric cu panourile, calibrat față de un instrument de referință. Parametrii electrici (tensiune și curent) și temperaturile de funcționare sunt achiziționați sincron, utilizând senzori dedicați (inclusiv RTD PT100 cu amplificare 0–10 V), condiționare de semnal și eșantionare periodică, cu stocare locală în format .CSV și marcaje temporale RTC. Arhitectura hardware separă fiecare ramură PV prin controlere MPPT și baterii individuale pentru a evita interferențele între tehnologii și pentru a asigura integritatea datelor.

Metrologia este susținută prin calibrare multipunct a canalelor de tensiune, curent, temperatură și iradiație, coeficienții fiind integrați în firmware pentru corecție în timp real și reducerea post-procesării.

Stabilitatea achiziției este consolidată prin cablare ecranată, împământare unificată și măsuri de reducere a interferențelor (ex. pull-up rezistor pe magistrala I²C), precum și prin protecții electrice cu siguranțe pe ramuri. În plus, un subsistem de sarcină programabil, controlat cu ESP32 și sarcini rezistive comutate prin relee, menține descărcarea controlată a bateriilor pentru a preveni intrarea controlerelor MPPT în regimuri de limitare și a permite urmărirea continuă a punctului de putere maximă. În ansamblu, platforma furnizează un set de date coerent și reproductibil, adecvat pentru validarea modelelor și pentru extrapolarea ulterioară către scenarii de simulare și optimizare.

10.2 Ipoteze și limite de simulare

Subcapitolul definește cadrul metodologic de evaluare a performanței fotovoltaice printr-o analiză pe bază de scenarii, orientată către comparații tehnologice neutre între module monocristaline, policristaline și amorf. În locul unei analize strict sezoniere continue, performanța este caracterizată în funcție de niveluri discrete de iradiație reprezentative, selectate din două campanii experimentale (iarna: 5 noiembrie 2024–14 februarie 2025; vara: 1 iunie–31 august 2025) realizate în Bacău, România. Iradiația este măsurată cu un piranometru co-aliniat cu panourile și calibrat, iar temperaturile măsurate pe partea posterioară a modulelor sunt utilizate ca indicator termic direct relevant pentru comportamentul electric..

Pentru fiecare sezon, datele sunt agregate integrativ la scară zilnică: iarna pe ferestre de ≈ 8 h, iar vara pe o fereastră extinsă 06:00–21:00 (≈ 15 h), menținând eșantionarea la 6 s și asigurând o acoperire largă a regimurilor operaționale (de la ≈ 100 W/m² la > 1000 W/m²). Prelucrarea standardizată (putere instantanee $V \cdot I$, energie prin integrare temporală, iradiație medie zilnică) permite comparabilitatea între scenarii și integrarea modulară a rezultatelor în etapele ulterioare de modelare PV–CHP.

Sunt formulate ipoteze de simplificare pentru a izola efectele dominante: MPPT ideal, pierderi electrice interne neglijabile ($< 2\%$), eficiență constantă a bateriilor (85%), comutare ideală a sarcinilor, absența degradării componentelor și lipsa unei modelări termice explicite (temperatura fiind introdusă prin măsurare). Incertitudinea globală a lanțului de măsurare, rezultată din rezoluția ADC, neliniarități, derapaje de calibrare și zgomot, este estimată

conservator la $\pm 5\%$, valoare considerată adecvată pentru comparațiile relative ale analizei scenariilor.

10.3 Indicatori de performanță și criterii de evaluare

Acest subcapitol definește cadrul de evaluare a performanței fotovoltaice și descrie implementarea numerică a **C++ Model 1** ca instrument central de analiză. Sunt introduși indicatori standardizați pentru caracterizarea performanței instantanee și cumulative a subsistemelor PV (putere, energie zilnică, irradiație medie și eficiență reală), aplicați în mod coerent atât în analiza experimentală, cât și în etapele de simulare, asigurând comparabilitatea între tehnologii și scenarii sezoniere.

Modelul numeric este implementat într-o arhitectură modulară orientată pe clase, fiecare clasă reprezentând un bloc funcțional al sistemului energetic (clădire, cerere energetică, sistem PV). **Figura 10.2 (Schema blocurilor funcționale ale C++ Model 1)** ilustrează structura generală a modelului și fluxurile de date dintre componente. Variabilele de intrare sunt derivate exclusiv din măsurători experimentale (energie PV zilnică, irradiație medie, temperatură, arie activă), importate din fișiere .CSV, ceea ce permite integrarea directă și transparentă a datelor reale în procesul de simulare.

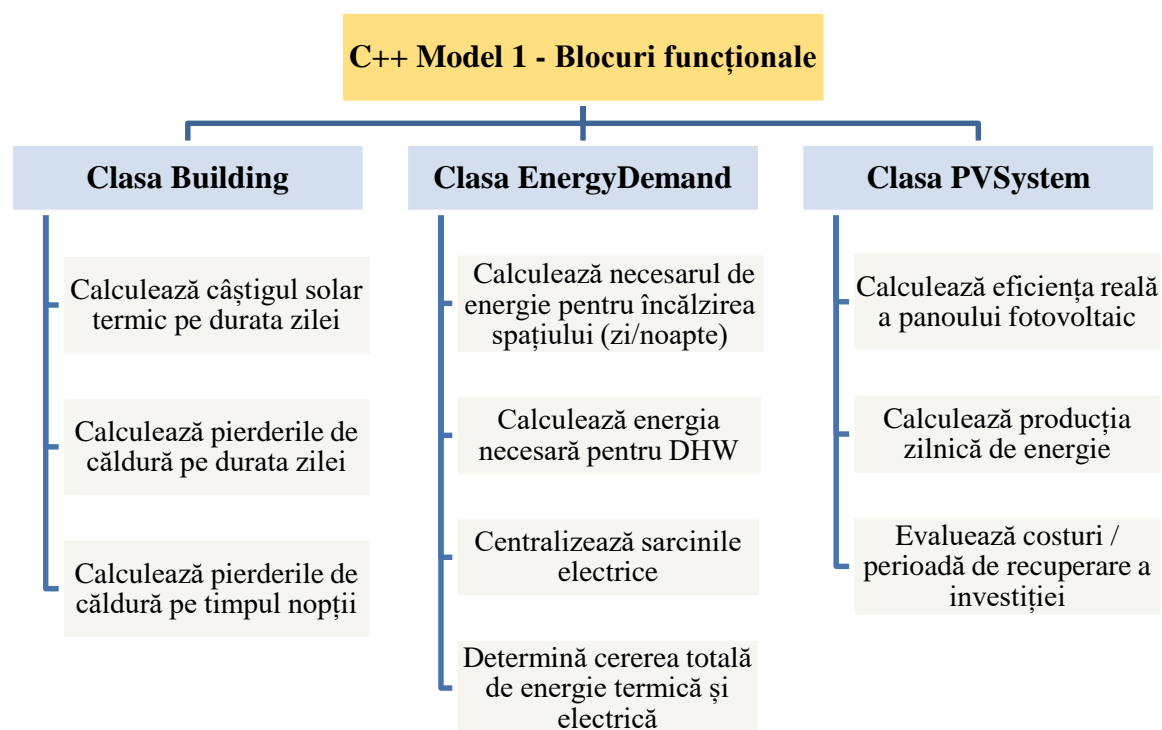


Figura 10.2 Schema blocurilor funcționale ale C++ Model 1

C++ Model 1 realizează evaluări energetice și economice zilnice, incluzând calculul eficienței reale a panourilor, al producției de energie, al LCOE și al perioadei de recuperare a investiției, pe baza unui set clar definit de ecuații și ipoteze. Prin reutilizarea sa în analizele sezoniere și în etapa de modelare a sistemului solar-CHP, modelul constituie o verigă analitică

robustă între datele experimentale și simulările la nivel de sistem, oferind un cadru validat empiric, extensibil și reproductibil pentru evaluările ulterioare din teză.

10.4 Analiza experimentală, seturi de date și cadru de interpretare

Capitolul investighează experimental performanța comparativă a trei tehnologii fotovoltaice (amorfa, policristalină și monocristalină) în condiții reale și în scenarii sezoniere off-grid, urmărind atât răspunsul termoelectric de bază, cât și implicațiile energetice și economice ale exploataării.

În Subcapitolul 10.4.1, este realizată o caracterizare de referință a relației **Voc-temperatură** pe baza unei campanii outdoor (Bacău, 1–10 iulie 2023), cu panouri și senzorică co-aliniată pe aceeași geometrie de montaj. Rezultatele (**Tabel 10.4**) confirmă o dependență inversă robustă între temperatura modulelor și Voc pentru toate tehnologiile, cu maxime ale Voc dimineața (temperaturi scăzute) și minime la amiază (încălzire maximă). Comparativ, panoul **policristalin** prezintă cea mai bună stabilitate relativă a Voc (5,5%), panoul **monocristalin** o sensibilitate moderată (7,0%), iar panoul **amorf** cea mai pronunțată scădere (8,7%), evidențiind rolul inerției termice și al disipării căldurii în stabilitatea electrică.

Tabel 10.1 Condiții extreme de temperatură și tensiune pentru diferite tipuri de panouri PV

Tip panou	Temperatură maximă (°C)	Minim Voc (V)	Temperatură minimă (°C)	Maxim Voc (V)	Scădere de tensiune (%)
Amorf	69	49.5	32	53.8	8.7
Policristalin	68	21.7	29	22.9	5.5
Monocristalin	67	18.6	25	19.9	7.0

Subcapitolul 10.4.2 extinde analiza către un **scenariu off-grid de iarnă** (5 nov. 2024–14 feb. 2025), cu înclinare optimizată la 56° și irradiații medii între 40–415 W/m². Pe baza producțiilor zilnice măsurate (**Tabel 10.5**) și a eficiențelor reale determinate experimental (**Tabel 10.6**), C++ Model 1 este utilizat pentru a simula trei sisteme autonome dimensionate la 50 m²: 2,7 kW (amorf), 6,6 kW (policristalin), 9,6 kW (monocristalin).

Tabel 10.2 Producția zilnică de energie electrică a panourilor PV experimentale în scenariul de iarnă

Iradația (W/m ²)	40	100	150	235	280	300	330	415
Producția zilnică de energie (pentru 8 ore)								
PV amorf (Wh)	46	108	180	241	267	300	320	410
PV policristalin (Wh)	26	54	81	118	129	130	140	175
PV monocristalin (Wh)	24	54	64	84	100	110	137	155

Tabel 10.3 Eficiențe reale de conversie ($\eta_{PV,real}$) ale panourilor PV experimentale

Iradație (W/m ²)	40	100	150	235	280	300	330	415
Eficiențe reale (%)								
PV amorf	9,6	9	10	8,5	8	8,3	8,1	8,2

PV policristalin	14,2	11,8	11,8	11	10,1	9,5	9,3	9,2
PV monocristalin	14,4	13	10,3	8,6	8,6	8,8	10	9

Iarna, efectele termice sunt secundare (temperaturi medii reduse), iar performanța este dominată de disponibilitatea solară: tehnologia **amorfă** se remarcă prin **stabilitate** a eficienței reale pe intervalul de irradiație, în timp ce tehnologiile cristaline ating valori ridicate la iradiații mici, dar tind să converge spre 8–10% la iradiații mai mari. Analiza economică arată că, atunci când iradiația este redusă, sistemul produce puțină energie, iar costul pe kWh generat (LCOE) crește, ceea ce duce implicit la perioade de recuperare a investiției mult mai lungi. Dacă puterea instalată este supradimensionată față de potențialul solar al sezonului analizat, costul inițial suplimentar nu este compensat printr-o creștere proporțională a producției, astfel că rentabilitatea totală a sistemului se deteriorează.

În Subcapitolul 10.4.3, este analizat **scenariul off-grid de vară** (1 iun. – 31 aug. 2025), cu fereastră extinsă de expunere (≈ 15 h/zi), înclinare 30° , iradieri zilnice de 1360–6200 Wh/m²/zi și temperaturi de funcționare ridicate (până la 75°C). Pe opt niveluri reprezentative de iradiere medie, se determină eficiențele reale și se rulează simulările sistemelor dimensionate identic. Vara, producția crescută conduce la îmbunătățiri economice substanțiale, iar sistemul monocristalin devine dominant energetic la iradiații ridicate, în timp ce panoul amorf își păstrează caracterul robust, cu variații moderate ale eficienței. În ansamblu, capitolul demonstrează că evaluările bazate pe eficiențe reale și pe scenarii sezoniere pot schimba ierarhia aparentă dată de valorile STC, subliniind importanța corelării dintre tehnologie, regim climatic și dimensionarea sistemului off-grid.

10.5 Set de date integrat iarnă–vară pentru simularea și dimensionarea sistemului solar-CHP

Subcapitolul definește baza de dimensionare și integrare pentru scenariile de simulare ale unei locuințe unifamiliale P+1 (100 m² utili, 250 m³ volum încălzit), caracterizată printr-o anvelopă descrisă prin transmitanțe U (Tabelul 10.13) și o suprafață disponibilă pentru PV pe versantul sudic de 50 m² (normalizată ulterior la 43 m² pentru comparații tehnologice). Parametrii de calcul includ câștigul solar prin vitraj, modelat prin factorii constanți f_{gain} și $f_{reduction}$, menținuți identic în scenariile de iarnă și vară (Tabelul 10.14), precum și un consum electric de bază constant, defalcat zi/noapte (Tabelul 10.15). Pe această structură, sunt definite seturi sezoniere de intrări (ΔT zi/noapte, durate zi/noapte, DHW, temperaturi apă rece/caldă și profiluri de încălzire), care stabilesc cadrul de evaluare a necesarului energetic total E_{total} în funcție de niveluri discrete ale iradiației (Tabelul 10.16).

Rezultatele de necesar energetic evidențiază un contrast sezonier puternic: în iarnă, E_{total} scade odată cu creșterea iradiației diurne prin reducerea componentei de încălzire, în timp ce cererea nocturnă rămâne dominantă și practic constantă; în vară, încălzirea este eliminată, iar E_{total} devine constant, fiind determinat aproape exclusiv de DHW și sarcina electrică (Tabelul 10.17).

Tabel 10.4 Necesari energetic zilnic în funcție de iradiația solară diurnă – iarnă și vară

G_{solar} Iradiație iarnă (W/m ²)	$Q_{cycle_{day}}$ Energie încălzire (zi) (kWh)	$Q_{cycle_{night}}$ Energie încălzire noapte (kWh)	Q_{DHW} Energie DHW (kWh)	E_e Energie electrică (kWh)	E_{total} Energie totală (kWh)
40	9,3	23,26	9,3	0,25	42,11
100	8,14	23,26	9,3	0,25	40,95
150	5,81	23,26	9,3	0,25	38,62
235	4,65	23,26	9,3	0,25	37,46
280	3,49	23,26	9,3	0,25	36,3
300	2,33	23,26	9,3	0,25	35,13
330	1,16	23,26	9,3	0,25	33,97
415	0	23,26	9,3	0,25	32,81
Iradiație vară: 155; 180; 220; 280; 325; 350; 380; 420					
155	–	–	5,58	0,25	5,83
180	–	–	5,58	0,25	5,83
...	–	–	5,58	0,25	5,83
420	–	–	5,58	0,25	5,83

Pentru evaluarea compatibilității dintre producție și cerere, necesarul este defalcat în E_{day} și E_{night} , iar producția zilnică a sistemelor PV simulate (amorf, policristalin, monocristalin) este pusă în corespondență directă cu aceste componente (**Tabelul 10.18**). Analiza arată că vara necesarul zilnic este acoperit integral de PV pentru toate nivelurile de iradiație considerate, generând surplus disponibil pentru stocare, în timp ce iarna apar deficite structurale, în special pe timpul nopții, chiar și la iradiații ridicate—rezultat care justifică integrarea cogenerării.

Tabel 10.5 Producția fotovoltaică E_{out} și necesarul energetic zilnic al clădirii (zi/noapte) în funcție de iradiația diurnă G_{solar}

G_{solar} Iradiație Iarnă (W/m ²)	E_{out} sistem PV amorf (kWh)	E_{out} sistem PV policristalin (kWh)	E_{out} sistem PV monocristalin (kWh)	E_{day} (kWh)	E_{night} (kWh)
40	1,32	1,96	1,98	15,08	27,03
100	3,1	4,07	4,47	13,92	27,03
150	5,16	6,11	5,29	11,59	27,03
235	6,91	8,9	6,95	10,43	27,03
280	7,65	9,73	8,27	9,27	27,03
300	8,6	9,88	9,1	8,11	27,03
330	9,17	10,6	11,3	6,94	27,03

415	11,8	13,2	12,8	5,78	27,03
Iradiație vară					
155	11,5	10,6	12,4	3,55	2,28
180	12,6	15,8	19	3,55	2,28
220	18,1	21,1	24	3,55	2,28
280	24,1	28,7	33,9	3,55	2,28
325	24,4	29,4	34,7	3,55	2,28
350	26,1	31,7	36,4	3,55	2,28
380	29,2	33,9	40,5	3,55	2,28
420	30,1	40	48	3,55	2,28

Pe baza scenariului critic (iradiație nulă), subcapitolul stabilește metodologia de selecție a unei unități micro-CHP, dimensionând separat cererea termică și electrică minimă pe intervalele zi/noapte și corectând puterea termică printr-un randament realist. În urma testelor, este adoptată o configurație rezidențială reprezentativă ($2,5 kW_{th}$, $0,05 kW_{el}$) ca soluție echilibrată între acoperirea cererii și evitarea supra-dimensionării. Integrarea micro-CHP cu PV, baterii și stocare termică este formalizată prin arhitectura conceptuală a sistemului hibrid (**Figura 10.19**), care ghidează fluxurile energetice și strategia de management cu prioritate pentru energia regenerabilă și utilizarea stocării înaintea activării CHP.

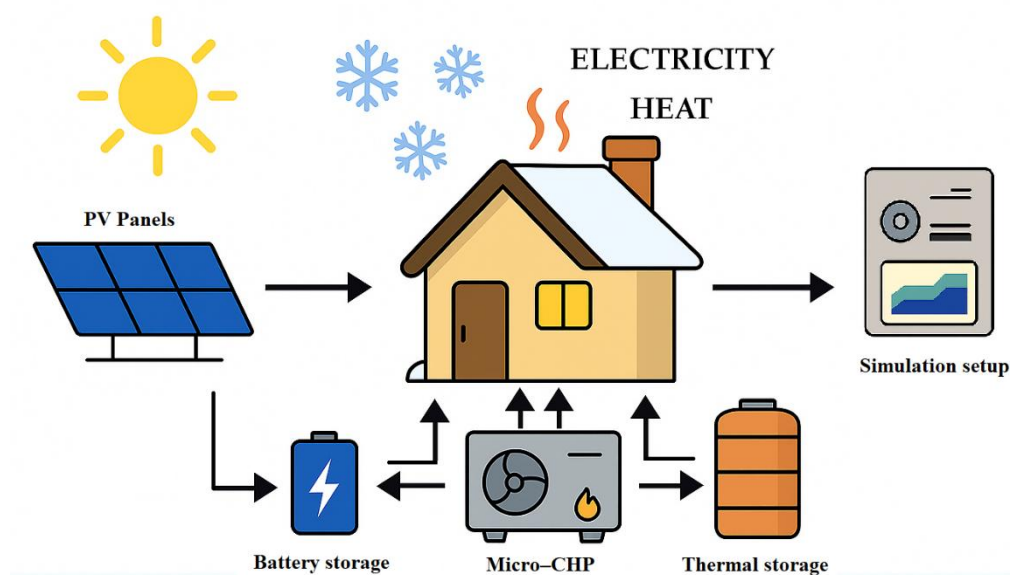


Figura 10.3 Schema conceptuală a sistemului hibrid solar-CHP cu stocare electrică și termică utilizat în simulările de iarnă

Performanța operațională a ansamblului (evaluat pentru sistemul PV policristalin, ca variantă cu producție superioară în iarnă) este cuantificată prin fluxurile energetice zilnice pe scenarii de iradiație (**Tabelul 10.19**).

Tabel 10.6 Fluxurile energetice zilnice pentru scenariile de iradiație (sistem PV policristalin)

Iradiație (W/m²)	0	40	100	150	235	280	300	330	415
Interval diurn									
Intrarea din sistemul PV (kWh)	0	1,96	4,07	6,11	8,9	9,73	9,88	10,6	13,2
Cererea energetică diurnă a clădirii (kWh)	16,24	15,08	13,92	11,59	10,43	9,27	8,11	6,94	5,78
Necesar electric diurn acoperit de CHP (kWh)	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0
Excedent PV către stocare termică (kWh)	0	1,76	3,87	5,91	8,7	9,07	7,91	6,74	5,58
Excedent PV către baterii (kWh)	0	0	0	0	0	0,46	1,77	3,66	7,42
Durată de funcționare CHP (h)	6,42	5,25	3,94	2,19	0,61	0	0	0	0
Producția termică a CHP (kWh)	16,04	13,12	9,85	5,48	1,53	0	0	0	0
Producția electrică a CHP (kWh)	0,32	0,26	0,2	0,11	0,03	0	0	0	0
Energie electrică CHP utilizată ziua (kWh)	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0
Energie electrică CHP stocată în acumulatori (kWh)	0,12	0,26	0,2	0,11	0,03	0	0	0	0
Energie totală în acumulatori – CHP+PV (kWh)	0,12	0,26	0,2	0,11	0,03	0,46	1,77	3,66	7,42
Interval nocturn – necesar energie clădire 27,03 kWh									
Energie electrică din acumulatori (kWh)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Energie termică din acumulatori (kWh)	0,07	0,21	0,15	0,06	0,03	0,41	1,72	3,61	7,37
Durata de funcționare a CHP (h)	10,76	10,71	10,73	10,77	10,79	10,63	10,1	9,35	7,84
Energie termică CHP (kWh)	26,91	26,77	26,83	26,92	26,98	26,57	25,26	23,37	19,61
Energie electrică CHP (kWh)	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,53	0,51	0,47	0,39
Energie în acumulatori dimineața (kWh)	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,53	0,51	0,47	0,39

Rezultatele indică tranziția către autonomie diurnă odată cu creșterea iradiației (surplus direcționat întâi către stocarea termică și apoi către baterii), concomitent cu reducerea progresivă a duratei de funcționare a CHP, mai ales pe timpul nopții. În ansamblu, subcapitolul demonstrează că integrarea PV–micro-CHP–stocare electrică/termică îmbunătățește robust autonomia energetică în sezonul rece și crește ponderea energiei regenerabile, menținând în același timp continuitatea alimentării pentru sarcini termice și electrice.

11 Concluzii finale, contribuții originale și perspective

11.1 Concluzii și relevanță

Teza abordează tranziția energetică din perspectiva provocărilor globale și a rolului surselor regenerabile, dezvoltând un cadru teoretic privind energia solară, stocarea energiei și cogenerarea. Pe acest fundament, cercetarea urmărește evaluarea integrată, experimentală și numerică, a performanței unui sistem hibrid solar-CHP destinat aplicațiilor rezidențiale off-grid, oferind o analiză realistă a comportamentului și potențialului energetic, termic și economic al acestuia.

Pentru realizarea obiectivului general, cercetarea a adoptat o metodologie integrată, bazată pe măsurători experimentale în condiții reale, analiza comparativă a mai multor tehnologii fotovoltaice și modelare numerică în C++. Această abordare a combinat evaluarea energetică și termică cu analiza economică, permițând aprecierea coerentă și realistă a performanței sistemului hibrid PV-CHP în regim rezidențial off-grid.

Aplicarea metodologiei propuse a condus la obținerea unui set coerent de rezultate experimentale, numerice și comparative, care confirmă atingerea obiectivului general al cercetării și validează performanța reală a sistemului hibrid solar-CHP. Aceste rezultate evidențiază comportamentul componentelor fotovoltaice în condiții variabile de funcționare și relevanța modelului dezvoltat pentru evaluarea integrată a eficienței energetice și economice, după cum urmează:

1. Măsurătorile efectuate în aer liber au evidențiat o corelație inversă între tensiunea de circuit deschis (V_{oc}) și temperatura suprafeței panoului, comună tuturor celor trei tipuri de module, conform profilurilor diurne prezentate în **Figurile 10.4–10.6**.
2. Măsurătorile diurne au arătat că, în pofida variațiilor bruște ale iradiației solare, temperatura panourilor PV rămâne ridicată datorită inerției termice a materialelor, menținând valori reduse ale V_{oc} chiar și în perioadele de scădere temporară a fluxului solar, conform rezultatelor ilustrate în **Figurile 10.8–10.10**.
3. Experimentele desfășurate în regim off-grid pe durata iernii au demonstrat că diferențele de performanță între cele trei tehnologii PV sunt semnificative, panoul amorf asigurând o producție stabilă în condiții de radiație difuză, iar panourile policristalin și monocristalin atingând valori superioare în regim de iradiație directă.
4. Deși la iradiația zilnică maximă înregistrată în scenariul de iarnă (415 W/m^2) panoul amorf a generat cea mai mare producție de energie (410 Wh/zi), această diferență se explică prin suprafața activă mai extinsă a configurației testate; comparabilitatea între tehnologii a fost realizată ulterior prin normalizarea la suprafața activă, determinată pe baza eficienței reale de conversie prezentate în **Tabelul 10.6**.
5. Valorile eficienței reale de conversie arată că, la niveluri scăzute de iradiație ($40\text{--}150 \text{ W/m}^2$), panourile cristaline au înregistrat eficiențe de peste 14%, în timp ce, odată cu creșterea iradiației peste 235 W/m^2 , eficiențele scad și converg pentru toate tehnologiile, situându-se în intervalul 8–10%. Panoul amorf a menținut o performanță stabilă pe întregul domeniu analizat, cu pierderi minime la niveluri ridicate de iradiație (**Tabelul 10.6**).

6. Compararea eficiențelor reale cu cele declarate în condiții standard (STC, 1000 W/m²) a evidențiat că panoul amorf a depășit valorile nominale în condiții reale, în timp ce panourile cristaline au atins eficiențele declarate doar la iradiații reduse, confirmând limitele reperelor STC pentru evaluarea performanței în regim off-grid (**Figurile 10.12–10.14**).
7. Utilizând valorile reale ale eficienței, C++ Model 1 a simulat performanța celor trei sisteme PV autonome ipotetice, evidențiind cea mai mare producție zilnică pentru sistemul policristalin (13,2 kWh/zi), urmat de sistemele monocristalin (12,8 kWh/zi) și amorf (11,8 kWh/zi), conform datelor prezentate în **Tabelul 10.7**.
8. În sezonul de iarnă, nivelul redus de iradiație crește costul unitar al energiei și perioada de recuperare a investiției pentru toate sistemele PV; pe ansamblul tehnologiilor, $Cost_{kWh}$ variază între 0,53 și 0,03 USD/kWh, iar $T_{payback}$ între 78,1 și 4,4 ani, în funcție de iradiație și tehnologie (**Tabelul 10.8**).
9. În condițiile de iarnă, caracterizate prin niveluri reduse de iradiație, sistemul amorf s-a dovedit cel mai avantajos economic, având cel mai mic cost unitar al energiei și cea mai scurtă perioadă de recuperare, urmat de sistemul policristalin, în timp ce sistemul monocristalin rămâne cel mai puțin rentabil (**Tabelul 10.8**).
10. Campania estivală a înregistrat iradiere zilnică ridicată și relativ stabilă, cu temperaturi ale panourilor de până la 75 °C; pe baza datelor din intervalul 1 iunie–31 august 2025 au fost selectate opt niveluri reprezentative de iradiere medie orară pentru simulare (**Tabelul 10.9**).
11. În condițiile estivale, caracterizate printr-o durată medie zilnică de aproximativ 15 ore de colectare, producția de energie a crescut proporțional cu nivelul de iradiere, atingând la 420 W/m²/h valori maxime de 1050 Wh pentru panoul amorf, 530 Wh pentru cel policristalin și 580 Wh pentru cel monocristalin; rezultatele confirmă influența directă a temperaturii de operare asupra randamentului real (**Tabelul 10.9**).
12. În condiții estivale, eficiențele reale de conversie au fost influențate negativ de creșterea temperaturii de funcționare, prezentând stagnări sau scăderi ușoare în intervalul 155–325 W/m², ca urmare a reducerii tensiunii la borne (**Tabelul 10.10**).
13. La iradieri ridicate (420 W/m²), eficiențele s-au stabilizat sau au crescut ușor, efectul termic fiind compensat de aportul energetic suplimentar; panourile cristaline au atins valori maxime de 18,8% (monocristalin) și 15,9% (policristalin), iar panoul amorf a menținut o performanță uniformă pe întreg intervalul analizat (**Tabelul 10.10**).
14. Pentru panoul amorf, variațiile sezoniere ale eficienței reale au fost reduse, valorile menținându-se între 8–10% iarna și crescând ușor până la aproximativ 12% vara, confirmând stabilitatea tehnologică în condiții de radiație difuză și temperaturi ridicate (**Figura 10.16**).
15. În cazul panoului policristalin, eficiența a fost mai ridicată iarna la iradiații reduse (peste 14% la 40–100 W/m²), dar a scăzut la niveluri mai mari; vara, valorile s-au stabilizat și au revenit la 14–15% la iradiații ≥ 350 W/m², indicând o adaptare moderată la radiație intensă (**Figura 10.17**).

16. Pentru panoul monocristalin, eficiența a fost sensibil mai scăzută iarna (circa 9% la 415 W/m²), dar a crescut semnificativ vara, atingând 16–18% la iradiații peste 300 W/m², ceea ce confirmă o performanță superioară în regim de radiație directă (**Figura 10.18**).
17. Comparativ, diferențele sezoniere sunt determinate de unghiul de incidență și compoziția spectrală a radiației: în sezonul rece predomină radiația difuză, nefavorabilă celulelor cristaline, în timp ce vara radiația directă intensă permite valorificarea mai eficientă a potențialului tehnologic (**Figurile 10.16–10.18**).
18. Simulările estivale realizate cu C++ Model 1 au indicat producții zilnice maxime de 48 kWh/zi pentru sistemul monocristalin, 40 kWh/zi pentru cel policristalin și 30,1 kWh/zi pentru cel amorf, la o iradiație de 420 W/m²; aceste diferențe reflectă puterile instalate distincte ale sistemelor (9,6 kW, 6,6 kW și 2,7 kW), stabilite sub aceeași restricție de suprafață activă de 50 m² (**Tabelul 10.11**).
19. În scenariul de vară, nivelul ridicat al iradierii și producția zilnică superioară au condus la reducerea semnificativă a costului unitar al energiei, care scade sub 0,02 USD/kWh la valori ale iradiației de peste 350 W/m². În aceste condiții, perioada de recuperare se reduce la 2–4 ani pentru sistemele cristaline și sub 2 ani pentru cel amorf, confirmând rentabilitatea ridicată a exploataării estivale (**Tabelul 10.12**).
20. Integrarea datelor experimentale de iarnă și vară în cadrul modelului C++ a permis evaluarea unitară a interacțiunii dintre resursa solară și cererea energetică a clădirii, demonstrând coerența metodologică a abordării și relevanța acesteia pentru dimensionarea sistemelor hibride solar–CHP în regim rezidențial (**Tabelele 10.13–10.16**).
21. Rezultatele pentru scenariul de iarnă au evidențiat o corelație inversă între iradierea solară și necesarul energetic zilnic, consumul total reducându-se de la 42,1 kWh/zi la 32,8 kWh/zi odată cu creșterea iradierii, în timp ce cererea nocturnă a rămas constantă (aproximativ 27 kWh/zi), confirmând rolul determinant al pierderilor conductive și al cererii de DHW în sezonul rece (**Tabelul 10.17**).
22. În scenariul de vară, simulările au arătat un necesar energetic stabil de 5,83 kWh/zi, dominat de consumurile de DHW și energie electrică, fără aport de încălzire; această constanță demonstrează eficiența sezonieră ridicată a modelului și relevă potențialul solar crescut al perioadei estivale pentru acoperirea integrală a cererii energetice a clădirii (**Tabelul 10.17**).
23. Analiza comparativă a demonstrat că, în scenariul estival, necesarul zilnic al clădirii (5,83 kWh/zi) este acoperit integral de producția fotovoltaică pentru toate nivelurile de iradiație, rezultând surplusuri energetice disponibile pentru stocare (**Tabelul 10.18**).
24. În scenariul de iarnă, chiar și la iradiații ridicate (415 W/m²), producția PV rămâne inferioară cererii zilnice (32,81 kWh), sistemul policristalin furnizând maximum 13,2 kWh; acoperirea completă a cererii este imposibilă în absența unei surse suplimentare (**Tabelul 10.18**).
25. Modelul a evidențiat apariția unor excedente limitate de energie în jurul nivelului de 300 W/m², când producția PV depășește ușor cererea diurnă (8,1 kWh), însă aceste episoade sunt rare și insuficiente pentru stocare pe termen lung, confirmând necesitatea integrării unui sistem hibrid solar–CHP pentru echilibrarea bilanțului energetic (**Tabelul 10.18**).

26. Integrarea unității micro-CHP este justificată de deficitul energetic din scenariile de iarnă, când producția PV nu acoperă cererea zilnică, în special pe timpul nopții; cogenerarea asigură continuitatea alimentării termice și electrice în absența aportului solar (**Tabelul 10.18**).
27. În scenariul critic fără aport solar ($G_{solar} = 0 \text{ W/m}^2$), necesarul zilnic total al clădirii a fost evaluat la 43,27 kWh, dominat de pierderile conductive și de cererea de apă caldă, stabilind baza de dimensionare energetică a unității CHP (**Ecuțiile 10.17–10.19**).
28. Aplicând relațiile de calcul, s-au determinat valori minime de 2,0 kW termic și 0,025 kW electric, corectate ulterior prin randamentul termic de 90%, rezultând o putere utilă necesară de 2,23 kW pentru funcționarea stabilă în sezonul rece (**Ecuția 10.20**).
29. Analiza de sensibilitate a arătat că puterea termică optimă de 2,5 kW oferă echilibrul între acoperirea cererii și eficiența economică, fiind reprezentativă pentru sistemele micro-CHP rezidențiale comerciale (WhisperGen, Baxi, Viessmann) (**Subcapitolul 10.5.1**).
30. *C++ Model 2* a permis integrarea unitară a sistemului fotovoltaic, a unității micro-CHP și a mecanismelor de stocare electrică și termică, oferind o evaluare completă a balanței energetice zilnice și a gradului de autonomie a sistemului (**Figura 10.19**).
31. La iradiații reduse ($\leq 150 \text{ W/m}^2$), aportul fotovoltaic este insuficient pentru acoperirea consumului diurn, determinând o funcționare extinsă a unității micro-CHP și o dependență accentuată de energia termică generată (**Tabelul 10.19**).
32. Odată cu creșterea iradiației, autonomia diurnă este atinsă de la pragul de 280 W/m^2 , moment în care sistemul PV acoperă integral cererea clădirii, iar surplusul este direcționat către stocarea termică și electrică, CHP fiind dezactivat (**Figura 10.20**).
33. Pentru intervalul nocturn, consumul constant și prioritizarea energiei stocate reduc progresiv durata de funcționare a CHP, de la circa 10,8 ore la iradiație nulă la sub 8 ore pentru scenariile cu iradiație ridicată, ceea ce demonstrează eficiența operațională și sustenabilitatea sistemului hibrid solar-CHP (**Tabelul 10.19**).

11.2 Contribuții și originalitate

Teza se bazează pe o abordare științifică integrată, cu caracter aplicativ, care combină analiza teoretică, validarea experimentală în condiții reale și modelarea numerică avansată. Cercetarea a vizat atât caracterizarea experimentală a performanței fotovoltaice, cât și dezvoltarea unui model dinamic pentru un sistem hibrid solar-CHP cu stocare electrică și termică. Originalitatea lucrării constă în realizarea unei platforme experimentale proprii și în integrarea eficienței fotovoltaice reale într-un cadru numeric modular, capabil să evalueze riguros fluxurile energetice și nivelul de autonomie off-grid, contribuind astfel la proiectarea optimă a sistemelor energetice rezidențiale autonome.

Principalele *contribuții personale și elemente de originalitate* rezultate din activitatea de cercetare sunt prezentate în continuare:

1. Proiectarea și realizarea unui stand experimental complet funcțional pentru testarea sistemelor PV în condiții reale de mediu.
2. Implementarea unei platforme de achiziție multi-senzor capabilă să măsoare simultan parametri electrici, termici și de iradiație.

3. Elaborarea unui protocol de calibrare a senzorilor pentru asigurarea acurateții datelor de măsurare.
4. Analiza comparativă a trei tehnologii fotovoltaice (amorfă, policristalină și monocristalină) în regim dinamic de temperatură și irradiație.
5. Realizarea unei campanii experimentale de peste 100 de zile în sezonul rece, pentru evaluarea performanței reale în regim off-grid.
6. Determinarea experimentală a corelației inverse dintre tensiunea de circuit deschis și temperatura panourilor PV în condiții reale de funcționare.
7. Evidențierea comportamentului termic distinct al panourilor PV și a inerției termice asociate fiecărei tehnologii fotovoltaice.
8. Definirea unei metodologii proprii de determinare a eficienței reale de conversie în funcție de nivelul iradiației incidente.
9. Validarea experimentală a modelului numeric propriu (Model 1), dezvoltat în C++, pentru calculul randamentului zilnic integrat.
10. Aplicarea unei metode de normalizare la suprafața activă a panourilor pentru compararea performanțelor PV între diferite tehnologii.
11. Identificarea diferențelor sezoniere de eficiență a sistemelor PV între iarnă și vară, pe baza datelor experimentale reale.
12. Evidențierea stabilității superioare a panourilor amorfe în condiții de iradiație difuză și temperaturi scăzute.
13. Corelarea experimentală a randamentelor reale cu valorile declarate în condiții STC, evidențiind limitările testelor standard.
14. Dezvoltarea unui model numeric de simulare economică pentru determinarea costului unitar al energiei și a perioadei de recuperare a investiției.
15. Realizarea unei analize economice comparative a celor trei tehnologii fotovoltaice în condiții sezoniere de iarnă și vară.
16. Propunerea unei metode integrate PV–CHP pentru evaluarea concomitentă a performanței energetice și economice.
17. Modelarea completă a sistemului fotovoltaic autonom în scenarii de iarnă și vară, utilizând opt niveluri discrete de iradiație.
18. Corelarea producției fotovoltaice simulate cu necesarul energetic zilnic al unei clădiri rezidențiale.
19. Elaborarea unui set de date unificat iarnă–vară pentru simularea performanței sistemului hibrid solar–CHP.
20. Determinarea necesarului energetic zilnic, defalcat pe intervale zi/noapte, pentru clădire, în ambele scenarii sezoniere.
21. Fundamentarea justificării tehnice pentru integrarea micro-CHP în baza deficitelor de energie observate.
22. Determinarea precisă a minimului de putere termică și electrică necesar pentru funcționarea autonomă a unității micro-CHP.
23. Aplicarea corecției prin randamentul termic real de 90%, utilizată pentru ajustarea valorilor teoretice și estimarea puterii utile a unității micro-CHP, cu validare în scenariile de iarnă.

24. Determinarea experimentală și numerică a puterii optime de 2,5 kW termic pentru unitatea micro-CHP.
25. Elaborarea în C++ a Modelului 2, un instrument original de simulare a sistemului hibrid PV-CHP-stocare.
26. Definierea unei logici de control secvențiale și adaptive pentru managementul fluxurilor de energie între PV, CHP și sistemele de stocare.
27. Demonstrarea, prin simulare integrată, a autonomiei diurne complete a sistemului hibrid PV-CHP pentru niveluri de irradiație $\geq 280 \text{ W/m}^2$.
28. Cuantificarea, prin simulare integrată, a reducerii duratei de funcționare a unității CHP, de la 10,8 h la sub 8 h, odată cu creșterea nivelului de iradiere.
29. Evaluarea contribuției combinate a stocării electrice și termice la reducerea gradului de dependență față de unitatea de cogenerare.
30. Demonstrarea fezabilității tehnice și operaționale a sistemului hibrid solar-CHP pentru alimentarea clădirilor rezidențiale off-grid.
31. Elaborarea unei metodologii scalabile, aplicabile diverselor tipuri de clădiri și condiții climatice.
32. Validarea, prin simulare sezonieră, a interdependenței dintre componentele PV, CHP și stocare, demonstrând rolul acestei corelări în optimizarea randamentului energetic global al sistemului hibrid.
33. Fundamentarea bazei metodologice pentru proiectarea sistemelor hibride rezidențiale de nouă generație, cu integrare avansată a surselor regenerabile și a stocării energetice.

11.3 Perspective și direcții viitoare de cercetare

Rezultatele tezei oferă un cadru solid pentru extinderea cercetării în direcția perfecționării modelelor numerice și a validării experimentale la scară largă a sistemelor hibride solar-CHP. Pe baza platformei experimentale și a modelelor C++ dezvoltate, cercetările viitoare pot viza optimizarea arhitecturilor hibride, integrarea unor tehnologii avansate de stocare și control, precum și evaluarea performanței energetice, economice și de mediu în diverse contexte climatice și aplicații. Aceste direcții consolidează aplicabilitatea metodologiei propuse și susțin dezvoltarea sustenabilă a sistemelor energetice autonome și a microrețelelor rezidențiale inteligente.

