



Construcții Civile și Instalații

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

**CONTRIBUȚII PRIVIND REALIZAREA UNEI CASE PASIVE UTILIZĂND SISTEME DE
ENERGIE HIBRIDĂ**

Student-doctorand:
Maria-Simona Răboacă

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Daniela Lucia Manea

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte: Prof. Dr. Ing. **Ioan Pop**

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Daniela Lucia Manea**

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Referenți:

Prof. Dr. Ing. **Marcela Florina Prada**

Universitatea din Oradea

CSI. Dr. Fiz. **Mihai Varlam**

ICSI – Rm. Valcea;

Conf. Dr. Ing. **Ligia Mihaela Moga**

Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca;

**- Cluj-Napoca -
2023**

Cuprins

Considerații generale	4
Capitolul 1. Stadiul actual al cunoașterii la nivel mondial	5
1.1. Stadiul actual și analiza critică privind utilizarea sistemelor de energie hibridă.....	5
1.2. Stadiul actual al conceptului “casă pasivă”	6
1.3. Direcții de cercetare	6
Capitolul 2. Estimarea consumului de energie pentru clădirea tip casă pasivă virtuală.....	8
2.1. Descrierea consumatorului – clădire rezidențială tip casă pasivă virtuală.....	8
2.1.1. Estimarea profilului de consum energetic al clădirii rezidențiale tip casă pasivă virtuală	8
Capitolul 3. Instrumente de simulare virtuală	8
3.1. Instrumente de simulare virtuală a sistemelor energetice hibride	8
3.2. Descrierea mediului virtual de simulare iHOGA.....	9
Capitolul 4. Simulări studii de caz	9
4.1.1. Schema de principiu Energen1	9
4.1.2. Indicatori de performanță energetică	10
4.1.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO ₂	11
4.1.4. Indicatori financiari de performanță	11
4.2.1. Schema de principiu Energen2	11
4.2.2. Indicatori de performanță energetică	11
4.2.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO ₂	12
4.2.4. Indicatori financiari de performanță	12
4.3.1. Schema de principiu Energen3	13
4.3.2. Indicatori de performanță energetică	13
4.3.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO ₂	13
4.3.4. Indicatori financiari de performanță	14
4.4.1. Schema de principiu Energen4	14
4.4.2. Indicatori de performanță energetică	14
4.4.4. Indicatori financiari de performanță	15
4.5.1. Schema de principiu Energen5	15
4.5.2. Indicatori de performanță energetică	15
4.5.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO ₂	16
4.5.4. Indicatori financiari de performanță	16
4.6.1. Schema de principiu Energen.....	16
4.6.2. Indicatori de performanță energetică	16
4.6.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO ₂	17
4.6.4. Indicatori financiari de performanță	17
4.7.1. Schema de principiu Energen7	17
4.7.2. Indicatori de performanță energetică	18
4.7.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO ₂	18
4.7.4. Indicatori financiari de performanță	19
Capitolul 5. Analiza comparativă a parametrilor de performanță a sistemelor energetice hibride	19
5.1. Analiza parametrilor de performanță utilizând grafice comparative.....	19
5.1.1. Analiza performanțelor energetice	19
5.1.2. Analiza performanțelor ecologice	20
5.1.3. Analiza performanțelor economice	20
5.2. Analiza parametrilor de performanță utilizând metoda ANP	20
Capitolul 6. Concluzii generale. Contribuții originale. Tendințe și perspective de cercetare	21
6.1. Concluzii generale	21

6.2. Contribuții originale.....	22
6.3. Tendințe și perspective de cercetare.....	23
Referințe.....	23

Considerații generale

Odată cu conștientizarea faptului că resursele energetice fosile tradiționale sunt limitate, epuizabile și poluante, s-a creat o efervescență în rândul cercetătorilor și dezvoltatorilor pentru identificarea unor *soluții de exploatare și utilizare pe scară largă a resurselor alternative de energie*. Energia reprezintă forța motrice a civilizației, a evoluției tehnico-științifice și economice. Odată cu identificarea situației actuale legată de problematica disponibilității limitate a resurselor energetice tradiționale, a schimbărilor climatice și influența negativă a sectorului energetic asupra mediului înconjurător, s-au trasat și adoptat principii ce stau la baza dezvoltării durabile. În acest context, se pune un accent deosebit pe *creșterea ponderii utilizării surselor regenerabile și alternative de energie, caracterizate prin emisii reduse de dioxid de carbon*. Modificările climatice, amenințările privind securitatea energetică, epuizarea resurselor tradiționale energetice, sănătatea populației determină *realizarea strategiilor energetice la nivel național sau internațional*. Valorificarea potențialului energetic al surselor regenerabile din sistemele energetice hibride pentru producerea electricității reprezintă un obiectiv de o importanță deosebită.

În cadrul **tezei de doctorat** sunt abordate simultan, interdisciplinar și transdisciplinar, două concepte cu semnificație demonstrată în eficientizarea energetică și decarbonizarea sectorului clădirilor rezidențiale în contextul dezvoltării durabile: **“sistem de energie hibrid”** și **“casa pasivă”**.

Teza de doctorat prezintă studiile efectuate asupra soluțiilor de utilizare și integrare a surselor de energie regenerabilă în susținerea energetică a unei case pasive virtuale. Totodată, se analizează performanțele energetice, economice și de mediu ale sistemelor de energie hibridă, integrând diferite soluții de stocare (baterii reîncarcabile, hidrogen), simulate în diferite ipoteze și condiții de utilizare, cu scopul de a evidenția performanțele soluțiilor a sistemelor de energie hibridă în susținerea energetică a casei pasive.

În acest context, în *teza de doctorat*, consumul energetic al clădirii de tip casă pasivă (încălzire, apă caldă, aer condiționat, iluminat, electrocasnice, auxiliare) este susținută în cea mai mare parte utilizând diverse scenarii pentru sistemele energetice hibride având asigurată stocarea excesului de energie folosind tehnologii bazate pe hidrogen sau baterii reîncarcabile .

Elementul esențial de originalitate a tezei constă în sinergia dintre conceptul „casă pasivă” și „sistem energetic hibrid”, în care hidrogenul este utilizat ca vector energetic având un dublu rol, și anume - mediu de stocare pe termen mediu și lung a -surplusului de energie provenit din conversia energiilor regenerabile (soare și vânt), respectiv soluție alternativă de generare a energiei curate utilizând ca echipament de conversie pila de combustibil.

Impactul științific/tehnologic al temei abordate este multiplu, pornind de la suportul oferit activității practice prin abordarea teoretică unitară a subiectului utilizării sistemelor energetice hibride pentru alimentarea casei pasive, până la oferirea instrumentelor adecvate pentru dimensionarea acestor sisteme în funcție de cerințele utilizatorului. Deasemenea, impactul științific al cercetării constă în stabilirea alternativelor/sistemelor energetice curate optime pentru alimentarea cu energie pentru funcționare și asigurarea condițiilor de confort a ocupanților caselor pasive. *Teza de doctorat* prezintă rezultatele obținute din activitatea de cercetare teoretică și din simulările cu privire la alegerea echipamentelor de conversie energetică, dimensionarea, optimizarea și funcționarea sistemelor de energie hibridă, având ca finalitate elaborarea unui set de criterii de performanță care să fundamenteze alegerea configurației optime specifice consumatorului de tip casă pasivă.

Impactul socio-economic derivă pe de o parte din posibilitatea creșterii nivelului de confort al utilizatorilor, iar pe de alta, din posibilitatea economisirii resurselor, reducerea costurilor și provine atât din rezultatele financiare generate de utilizarea sistemelor de energie hibridă, cât și din cele legate de clădire care corespunde conceptului de casă pasivă.

Impactul climatic. Datorită avantajelor privind impactul asupra mediului, aplicațiile bazate pe resurse regenerabile sunt văzute ca soluții atractive pentru problemele energiei secolului 21, indiferent că vorbim despre casa pasivă sau despre orice altă aplicație. Tendința actuală la nivel mondial este de a promova structuri de resurse energetice primare, cu accent pe sursele regenerabile, astfel că prezenta tematică de doctorat poate contribui la îndeplinirea acestui obiectiv prin impactul pozitiv pe care utilizarea sistemelor energetice hibride cu energii regenerabile îl poate genera. Dacă luăm în considerare faptul că tematica tezei de doctorat se adresează tehnologiilor curate și ecologice, atunci putem afirma că impactul asupra mediului este unul pozitiv, care poate aduce o contribuție importantă la îmbunătățirea calității vieții și a sănătății, dar și la restabilirea calității mediului.

Capitolul 1. Stadiul actual al cunoașterii la nivel mondial

1.1. Stadiul actual și analiza critică privind utilizarea sistemelor de energie hibridă

În scopul minimizării emisiilor de CO₂ și a reducerii prețului energiei, optimizarea sistemului energetic hibrid are cel mai mare grad de influență în atingerea acestor obiective. În literatura de specialitate sunt utilizate diferite metode de dimensionare și optimizare a unui sistem energetic hibrid, luând în considerare toate echipamentele componente din sistemul energetic având ca date de intrare consumul de energie.

Hărțile bibliometrice evidențiază elementele esențiale în procesul de dimensionare și optimizarea a sistemelor de energie hibridă. Principalele componente ale sistemului energetic hibrid sunt: panouri fotovoltaice, turbine eoliene, pilele de combustibil, electrolizoare, stocatoare de hidrogen, baterii reîncărcabile.

În acest capitol se prezintă *analiza bibliometrică* a sistemelor energetice hibride având ca date de intrare o baza de date cu articole științifice selectate din Web of Science care generează hărți bibliometrice utilizând softul VOSviewer. În procesul de selecție a articolelor științifice din literatura de specialitate s-au utilizat următoarele cuvinte cheie: sistem energetic hibrid, energie regenerabilă, turbină eoliană, panouri fotovoltaice, pila de combustibil, electrolizor, stocator de hidrogen, baterii reîncărcabile. În literatura de specialitate au fost identificate diferite configurații pentru sistemele energetice hibride. Strategiile și algoritmi de optimizare, management și control au fost utilizați în funcție de obiectivele fiecărui studiu de caz. În scopul generării hărților bibliometrice s-a utilizat metodologia prezentată în lucrarea [1] și informațiile din manualul de utilizare al soft-ului VOSviewer[2].

Dimensionarea și optimizarea sistemelor energetice hibride se face în funcție de: echipamentele utilizate (panouri fotovoltaice, turbine eoliene, pila de combustibil, electrolizor, baterii reîncărcabile, stocator de hidrogen) și obiectivul cercetării.

Indicatorii luați în calcul în scopul dimensionării și optimizării a sistemelor energetice hibride sunt: i) costurile echipamentelor; ii) evoluția tehnologică a echipamentelor; iii) soluții pentru scăderea consumului de energie; iv) electrificarea zonelor rurale; v) reducerea prețului energiei; vi) minimizarea emisiilor cu efect de seră;

În scopul optimizării sistemelor energetice hibride sunt utilizate diferite strategii de management. Performanțele sistemelor energetice sunt în strânsă legătură cu tehnologia utilizată a echipamentelor, de strategia de management adoptată, de soluția de stocare a energiei, tipul surselor de energie regenerabilă și dacă sistemul este on-grid sau off-grid.

De-a lungul anilor au fost proiectate, dezvoltate, testate și analizate diferite configurații de sisteme energetice hibride capabile să susțină cu energie profilul consumatorului urmărind eficiența, performanța și costurile sistemului.

Conform analizei trendurilor în literatura de specialitate cele mai utilizate sisteme energetice hibride sunt cele care utilizează ca sursă de energie primară energia solară, eoliană, și ca sursă de energie alternativă pila de combustibil care convertește energia hidrogenului în energie electrică. În acest context, se utilizează algoritmi de control, strategii de management în scopul optimizării sistemelor energetice hibride.

1.2. Stadiul actual al conceptului “casă pasivă”

Conceptului casei pasive limitează pierderile de energie termică la maxim 120 kWh/m²*an (suprafață locuibilă). Astfel, se urmărește diminuarea pierderilor de căldură prin termoizolații, la economisirea de energie și astfel la elaborarea unei clădiri performante energetic. Din punct de vedere energetic, aceste clădiri se pot clasifica după cum urmează:

Casele pasive urmăresc:

- Economia de energie prin limitarea drastică a consumurilor energetice;
- Realizarea unor cerințe sporite de confort termic;
- Utilizarea soluțiilor inovatoare de materiale ecologice și reciclabile;
- Utilizarea surselor regenerabile de energie.

Necesarul total de încălzire/răcire a unei case pasive nu poate să depășească 15 kWh/m²*an, iar necesarul total de energie va fi furnizat din surse regenerabile. În cazul Casei Pasive Clasică, această valoare va fi 60 kWh/m²*an. O clădire construită conform Casă Pasivă Plus este mult mai eficientă deoarece nu poate consuma mai mult de 45 kWh/m²*an, energie furnizată din surse regenerabile. De asemenea, casa trebuie să poată genera o cantitate de energie de cel puțin 60 kWh/m²*an. În cazul Casei Pasive Premium, necesarul de energie este limitat la doar 30 kWh/m²*an, cu cel puțin 120 kWh/m²*an de energie furnizată de la sursele regenerabile

1.3. Direcții de cercetare

Tematica abordată în această teză de doctorat se înscrie în tematica abordată la nivel internațional privind măsurile impuse pentru reducerea emisiilor de dioxid de carbon și creșterea gradului de utilizare a surselor de energie regenerabilă, cu integrarea de soluții inovative de stocare a energiei, utilizând tehnologia hidrogenului, direcție care se regăsește și în strategia de cercetare din cadrul ICSI-Rm. Vâlcea.

Această nouă direcție răspunde necesităților sociale și este în concordanță cu directivele Uniunii Europene având ca impact reducerea consumului de energie, a emisiilor de gaze cu efect de seră și creșterea ponderii utilizării a surselor de energie regenerabilă în diferite aplicații. Prezenta teză de doctorat abordează pentru prima dată în institut topicul utilizării sistemelor de energie hibridă pentru alimentarea clădirilor.

Din analiza critică a stadiului actual rezultă că există preocupări în domeniul sistemelor de energie hibridă. Au fost identificate diferite surse de energie primară și soluții de stocare a energiei. În acest context, *o direcție de cercetare a tezei de doctorat vizează configurarea și optimizarea sistemelor de energie hibridă, capabile să susțină cu energie o casă pasivă virtuală.* În scopul identificării soluției optime a sistemului energetic hibrid este utilizată analiza multicriterială. Cercetarea propiu-zisă pornește de la stabilirea unui număr de șapte tipuri de sisteme energetice hibride, care alimentează cu energie casa pasivă virtuală, continuând cu simularea dimensionării acestor sisteme, analizarea rezultatelor obținute din punct de vedere a performanțelor energetice, de mediu și economice.

Configurarea sistemelor de energie hibridă analizate:

- Sistemul Energen1 - panouri fotovoltaice (PV), pila de combustibil (FC) și electrolizor (E) pentru producerea on-site a hidrogenului + rezervor de stocare hidrogen, sistemul este conectat la rețeaua națională de distribuție a energiei electrice;

- Sistemul Energen2 - turbina eoliană (TE), pila de combustibil (FC) și electrolizor (E) pentru producerea on-site a hidrogenului + rezervor de stocare hidrogen, sistemul este conectat la rețeaua națională de distribuție a energiei electrice;
- Sistemul Energen3 - panouri fotovoltaice (PV) și turbina eoliană (TE), pila de combustibil (FC) și electrolizor (E) pentru producerea on-site a hidrogenului + rezervor de stocare hidrogen, sistemul este conectat la rețeaua națională de distribuție a energiei electrice;
- Sistemul Energen4 - panouri fotovoltaice (PV), turbina eoliană (TE) și baterii reîncărcabile (B pentru stocarea energiei electrice), sistemul este conectat la rețeaua națională de distribuție a energiei electrice;
- Sistemul Energen5 - panouri fotovoltaice (PV), pilă de combustibil (FC) alimentată cu hidrogen preluat dintr-o rețea ipotetic de transport și distribuție a hidrogenului, sistemul este conectat la rețeaua națională de distribuție a energiei electrice;
- Sistemul Energen6 - turbină eoliană (TE), pilă de combustibil (FC) alimentată cu hidrogen preluat dintr-o rețea ipotetica de transport si distribuție a hidrogenului, sistemul este conectat la rețeaua națională de distribuție a energiei electrice;
- Sistemul Energen7 - panouri fotovoltaice (PV) și turbină eoliană (TE), pilă de combustibil (FC) alimentată cu hidrogen preluat dintr-o rețea ipotetica de transport si distribuție a hidrogenului , sistemul este conectat la rețeaua națională de distribuție a energiei electrice.

Obiectivul tezei. Diminuarea utilizării resurselor de energie convențională, eficientizarea consumului de energie la nivelul aplicațiilor staționare, asigurarea securității energetice cât și reducerea emisiilor poluante sunt preocupări de mare interes la nivel mondial. Reducerea rezervelor de combustibili fosili la nivel mondial și a efectului de încălzire globală cu minim -20°C , până în 2030, a impus adoptarea unor măsuri concretizate prin directive și strategii naționale și internaționale în domeniul energiei și mediului. În domeniul aplicațiilor staționare pentru ***clădiri cu eficiență energetică superioară se impune integrarea tehnologiilor de producere a energiei din surse regenerabile și utilizarea tehnologiilor alternative, bazate pe pila de combustibil și hidrogen ca soluție de stocare valorificând sursele regenerabile (soare, vânt, apă)***.

În ultima perioadă, un accent deosebit a fost pus pe măsurile de eficientizare energetică a consumului de energie, luând în calcul izolarea termică a anvelopei clădirii cu materiale și tehnologii corespunzătoare, utilizarea de echipamente cu randamente ridicate pentru încălzire/răcire, cu sisteme automatizate/inteligente de gestionare a consumurilor de energie pentru clădiri, sisteme de reglare programată a temperaturii camerei și maximizarea utilizării iluminatului natural.

Obiectivul principal urmărit în cadrul tezei de doctorat este de a identifica și defini soluțiile de utilizare a potențialului resurselor neconvenționale capabile să susțină cu energie o casă pasivă virtuală.

Obiectivele specifice sunt:

- ✚ Analiza critică a stadiului actual a cercetării în domeniul sistemelor de energie hibridă;
- ✚ Dimensionarea sistemelor energetice hibride a celor șapte sisteme;
- ✚ Evaluarea performanțelor indicatorilor energetici;
- ✚ Evaluarea performanțelor indicatorilor de protecție a mediului;
- ✚ Evaluarea performanțelor indicatorilor financiari;
- ✚ Analiza comparativă multicriterială a sistemelor energetice hibride;

Capitolul 2. Estimarea consumului de energie pentru clădirea tip casă pasivă virtuală

2.1. Descrierea consumatorului – clădire rezidențială tip casă pasivă virtuală

2.1.1. Estimarea profilului de consum energetic al clădirii rezidențiale tip casă pasivă virtuală

Pornind de la profilul consumului de energie estimat al consumatorului- clădire rezidențială tip casă pasivă virtuală, pe baza simulărilor computaționale, se vor stabili soluțiile de dimensionare și optimizare a unui sistem de energie hibridă integrând surse de energie regenerabilă, care să satisfacă profilul de consum în limita potențialului valorificabil al surselor regenerabile.

Stabilirea consumului de energie pentru clădirea considerată impune definirea datelor inițiale referitoare la particularitățile geo-climatice a amplasamentului și evaluarea disponibilităților surselor regenerabile în zona studiată.

Estimarea consumului de energie a fost efectuat pentru toate tipurile de funcțiuni ale clădirii: încălzire/răcire, prepararea apei calde de consum, ventilarea/climatizarea aerului, iluminatul și asigurarea energiei electrice necesară funcționării aparaturii electrocasnice și a echipamentelor electrice auxiliare aferente instalațiilor.

2.2. Consumul energetic total estimat

În acest capitol se impune estimarea consumului de energie care se dorește a fi asigurat prin sistemele de generare a energiei din surse regenerabile în domeniul caselor pasive. În acest scop, în acest capitol s-au realizat datele de intrare necesare studiilor de caz din capitolele următoare cu referire la simulările în funcționare a sistemelor energetice, și anume: **consumul total estimat de energie pentru casa pasivă virtuală este 5070 kWh /an, din care energia consumată pentru încălzirea spațiilor de 1580 kWh /an și reprezintă 31,16%, energia pentru prepararea apei calde de consum este 1515 kWh /an fiind 29,88%, energia consumată pentru instalația de iluminat și consumul electrocasnic fiind 1566 kWh /an reprezintă 30,88%, iar energia consumată pentru consumul echipamentelor auxiliare este de 400 kWh /an, adică 7,88% din total consum energetic.**

Capitolul 3. Instrumente de simulare virtuală

3.1. Instrumente de simulare virtuală a sistemelor energetice hibride

Acest capitol este dedicat descrierii instrumentelor virtuale de simulare computațională a procesului de optimizare și simulare în funcționare a sistemelor hibride de generare a energiei pe bază de energii neconvenționale, alternative.

Soft-ul HOMER a fost dezvoltat de Laboratorul Național de Energii Regenerabile (NREL) pentru a optimiza sisteme energetice de mică putere (micropower). Softul poate evalua o gamă largă de opțiuni legat de echipamentele componente ale sistemelor de tip stand-alone (off-grid) și cele conectate la rețeaua de distribuție a electricității (on-grid).

RETScreen International este un soft pentru proiectarea sistemelor de generare a energiei cu resurselor regenerabile, realizat dintr-o colecție de instrumente bazate pe foi de calcul pentru evaluarea proiectelor tehnologiilor în domeniul energiilor regenerabile (RET) elaborate de Ministerul Resurselor Naturale Canada.

DER-CAM este un soft de optimizare a sistemelor de energie hibridă, dezvoltat de Laboratorul Național Ernest Orlando Lawrence Berkeley (LBNL). În prima etapă se inserează profilele de consum a energiei electrice pe oră și prețurile combustibililor. Softul generează

rapoarte cu rezultatele bilanțului de energie electrică și termică precum și alte rezultate, cum ar fi costurile și cantitatea de emisii de dioxid de carbon.

HYBRIDS este o aplicație de evaluare a surselor regenerabile de energie, disponibilă în comerț, creată de către Solaris Homes (Queensland, Australia). Are un modul de inserare a consumului zilnic mediu și date privind resursele estimate pentru fiecare lună.

Hibrid 2, dezvoltat de Laboratorul de Cercetare în domeniul energiei regenerabile de la Universitatea din Massachusetts, este un pachet software pentru performanța pe termen lung și analiza economică a sistemelor hibride de energie, care include trei tipuri de generatoare electrice, turbine eoliene, panouri fotovoltaice, generatoare Diesel.

FACES este un instrument software dedicat alegerii sursei optime de energie primară în stadiul de proiectare a clădirii. Simulează performanțele energetice, ecologice și economice a unui sistem energetic. Avantajul softului constă în utilizarea unor algoritmi și date predefinite care sunt integrate în FACES și care oferă posibilitatea simulării cu date insuficiente disponibile în etapa de proiectare pentru calcularea consumului de energie.

Pentru realizarea studiilor de caz din prezenta teză de doctorat s-a ales utilizarea soft-ului iHOGA (improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms). În cele ce urmează, se prezintă descrierea modului de utilizare și funcționare a software-ului, dar și datele de intrare privind configurarea, criteriile de optimizare și caracteristicile tehnice, ecologice și economice a echipamentelor de conversie a energiilor neconvenționale.

3.2. Descrierea mediului virtual de simulare iHOGA

În vederea efectuării simulărilor s-a optat pentru folosirea soft-ului comercial computațional *iHOGA PRO+*, pentru care a fost achiziționată *licență de către Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice și Izotopice Râmnicu Vâlcea*, instituție în cadrul căreia îmi desfășor activitatea profesională în calitate de cercetător științific..

În acest subcapitol sunt descrise principalele componente, structura, modul de utilizare și funcționare a soft-ului, cu particularizarea datelor de intrare în vederea realizării condițiilor virtuale de desfășurare a simulărilor în sensul tematicii tezei de doctorat, respectiv simularea sistemelor energetice hibride care susțin energetic casa pasivă virtuală prezentată în Capitolul 2, amplasată în Râmnicu Vâlcea, având o suprafață desfășurată de 120 m² și un consum final anual estimat de energie de 5070 kWh.

Capitolul 4. Simulări studii de caz

Acest capitol este dedicat prezentării rezultatelor simulărilor în condiții virtuale de funcționare a sistemelor hibride energetice configurate, având în componență echipamentele de conversie a diverselor forme de energie în electricitate prezentate în capitolul precedent. Aceste sisteme energetice.

4.1.1. Schema de principiu Energen1

Sistemul energetic Energen1 utilizează radiația solară ca sursă primară de energie[3], iar ca resursă secundară alternativă pentru perioadele de intermitențe meteorologice și alternanțe diurn/nocturn energia electrică este produsă de un ansamblu de pile de combustibil alimentate cu hidrogen. Pentru a asigura funcționarea pilei de combustibil conform cu cerințele consumului, hidrogenul este produs prin electroliza apei cu un

electrolizor alimentat cu excesul de energie electrică primară,[4] este stocat într-un stocator sub presiune. Sistemul Energen1 este prezentat schematic în figura 4.1.

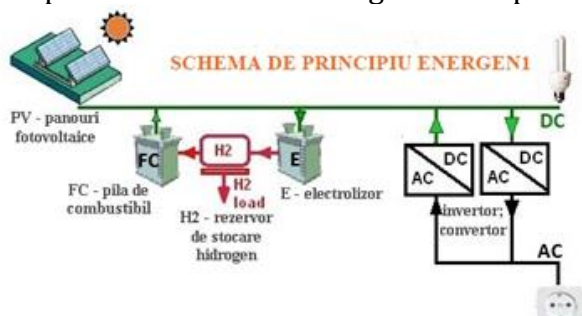


Figura 4.1. Schemă de principiu a sistemului de tip Energen1

Pe baza datelor de intrare prezentate în precedentele capitole s-au efectuat o serie de simulări computaționale prin utilizarea software-ului *iHOGA*. Echipamentele componente care alcătuiesc sistemul optim Energen1 sunt: **panouri fotovoltaice** cu o putere nominală totală instalată de 6,16 kWp, **pilă de combustibil** cu putere nominală de 2 kW, electrolizor cu putere nominală de 2 kW, invertor 1800 VA și rezervor de hidrogen care să asigure stocarea maxim a 10 kg de hidrogen.

4.1.2. Indicatori de performanță energetică

Se constată că pe perioada unui an de funcționare a sistemului Energen1, panourile fotovoltaice produc 90,80% din totalul de energie generat de sistem. Din totalul producției de electricitate utilizând sursele regenerabile pentru susținerea energetică a casei pasive se utilizează 52,95%, restul de 47,05% fiind folosită în electroliza apei și se obțin 40,60 kg H₂/an.

Hidrogenul produs este consumat de către pila de combustibil în producția de energie electrică utilă consumatorului, ceea ce reprezintă 9,20 % din total energie produsă de sistem. Valorile medii lunare ale indicatorilor energetici, rezultatele în urma simulărilor în funcționare a acestui tip de sistem sunt ilustrate numeric în figura 4.2.

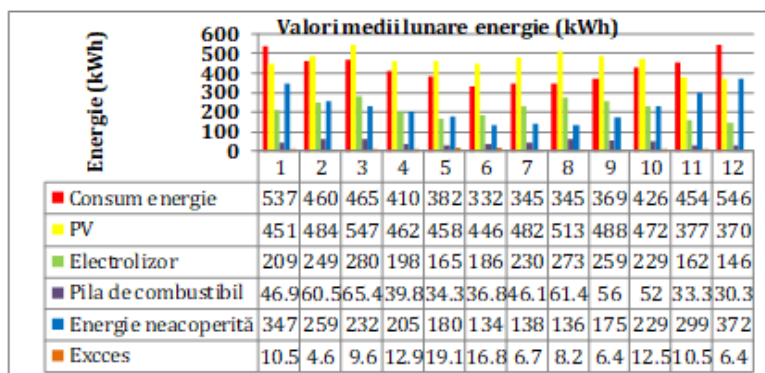


Figura 4.2. Valori medii lunare ale energiei a sistemului de tip Energen1

Disponibilitatea radiației solare are o influență directă asupra producției de hidrogen,[5] respectiv asupra electrolizorului - echipamentul care utilizează apa și energia solară pentru a genera hidrogen și oxigen, implicit influențează și timpul de funcționare a acestui echipament [6]. Consumul de hidrogen este condiționat de consumul de energie care se dorește produs de către pila de combustibil, impus de cerința sarcinii de alimentare.

Caracterul variabil al surselor energetice primare implicate în electroliză impun intermitențe în producția de hidrogen care sunt în directă legătură cu particularitățile specifice fiecărei luni. În cursul unei zile, pila de combustibil [7] va consuma tot hidrogenul produs de electrolizor, funcționând intermitent în funcție de cantitatea de hidrogen disponibilă. Datorită acestui considerent funcția pilei de combustibil de rezervă de energie (back-up) pentru acoperirea vârfurilor de consum și a intermitențelor datorate condițiilor meteorologice este îndeplinită parțial.

4.1.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO₂

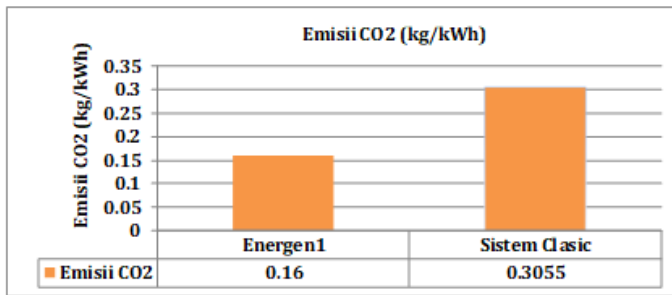


Figura 4.4. Emisii CO₂

Casa pasivă susținută energetic de sistemul Energen1 studiat înglobează în sistem emisii de dioxid de carbon în cantitate de 0.16 kgCO₂/kWh, ceea ce reprezintă un procent de 52,37% din valoarea medie calculată pentru o clădire standard susținută energetic prin sisteme clasice de generare a energiei.

4.1.4. Indicatori financiari de performanță

În această ipoteză ponderea cea mai mare din diagrama costurilor o deține tehnologia hidrogenului, primul loc îl ocupă unitatea de producere și stocare - electrolizorul împreună cu rezervorul de hidrogenului, respectiv 48,20 %, urmat de unitatea de conversie - pila de combustibil cu un procent de 19,35%.

Prețul unitar al energiei poate fi definit ca fiind raportul între costul total anual al sistemului de generare a energiei și cantitatea totală anuală de electricitate produsă de acest sistem. În cazul de față, a fost calculat un preț unitar al producției de energie din resurse alternative de 0,63 euro/kWh.

4.2.1. Schema de principiu Energen2

Sistemul energetic hibrid Energen2 utilizează energia eoliană ca sursă primară regenerabilă de generare a energiei, iar ca resursă secundară pentru perioadele de intermitențe meteorologice, energia electrică produsă de un ansamblu de pile de combustibil cu hidrogen. Pentru a asigura funcționarea pilelor de combustibil conform cu cerințele consumatorului, hidrogenul produs prin electroliza apei cu un electrolizor alimentat cu excesul de energie electrică primară, este stocat într-un stocator sub presiune. Sistemul Energen2 este prezentat schematic în figura 4.5.

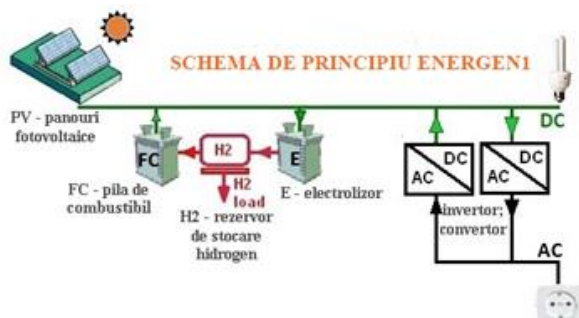


Figura 4.5. Schemă de principiu a sistemului de tip Energen2

Pe baza datelor de intrare prezentate în precedentele subcapitole s-au efectuat simulări cu soft-ul *iHOGA*, iar configurația rezultată este prezentată în tabelul 4.7. Echipamentele componente care alcătuiesc sistemul Energen2 sunt: *turbina eoliană* cu o putere nominală totală instalată de 3,26 kWp, *pilă de combustibil* cu putere nominală de 2 kW, electrolizor cu putere nominală de 2 kW, inverter 1800 VA și rezervor de hidrogen care să asigure stocarea maxim a 10 kg de hidrogen.

4.2.2. Indicatori de performanță energetică

Valorile medii anuale ale parametrilor de performanță sunt prezentate figura 4.6. Se constată că pe perioada unui an de funcționare a sistemului Energen2, turbinele eoliene produc 93,54% din totalul de energie generat de sistem.

Din totalul producției de electricitate din surse regenerabile pentru susținerea energetică a casei pasive virtuale se utilizează 71,10%, restul de 28,90% fiind folosită în electroliza apei și se obțin 18,80 kg H₂/an, care este consumat de către pila de combustibil în producția de energie electrică utilă consumatorului, ceea ce reprezintă 6,45 % din total energie produsă de sistem.

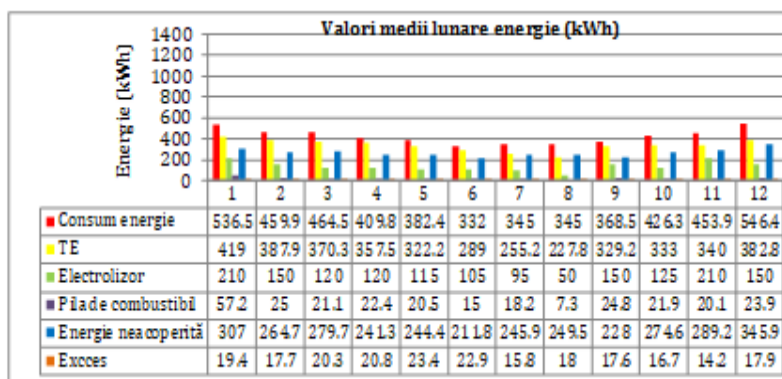


Figura 4.6. Valori medii lunare ale energiei a sistemului de tip Energen2

Caracterul intermitent al vitezei vântului are o influență directă asupra producției de hidrogen, respectiv asupra electrolizorului - echipamentul care utilizează apa și energia eoliană pentru a genera hidrogen [8] și oxigen, implicit influențează și timpul de funcționare a acestui tip de echipament. Consumul de hidrogen este condiționat de consumul energetic care se dorește a fi acoperit de către pila de combustibil, dependent de cerințele consumatorului.

Caracterul variabil al surselor energetice primare implicate în electroliză impun intermitențe în producția de hidrogen care sunt în directă legătură cu particularitățile specifice fiecărei luni. În cursul unei zile, pila de combustibil va consuma tot hidrogenul produs de electrolizor, funcționând intermitent în funcție de cantitatea de hidrogen disponibilă. Datorită acestui considerent funcția pilei de combustibil este de rezervă a energiei pentru acoperirea vârfurilor de consum și a intermitențelor datorate condițiilor meteorologice și este îndeplinită parțial.

4.2.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO₂

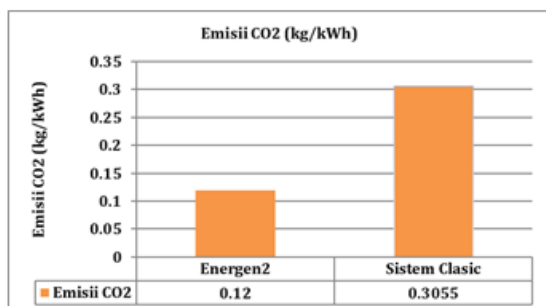


Figura 4.8. Emisii CO₂

Casa pasivă susținută energetic de sistemul Energen2 studiat generează emisii de dioxid de carbon înglobate în sistem în cantitate de 0.12 kgCO₂/kWh, ceea ce reprezintă un procent de 39,28% din valoarea medie calculată pentru o clădire standard susținută energetic prin sisteme clasice de generare a energiei.

4.2.4. Indicatori financiari de performanță

În această ipoteză se observă că ponderea cea mai mare din diagrama costurilor o deține tehnologia hidrogenului, primul loc îl ocupă unitatea de producere și stocare - electrolizorul împreună cu rezervorul de hidrogen, respectiv 45,65 %, urmat de unitatea de conversie - pilă de combustibil cu un procent de 15,47%.

Prețul unitar al energiei poate fi definit ca fiind raportul între costul total anual al sistemului de generare a energiei și cantitatea totală anuală de electricitate produsă de acest sistem. În cazul de față, a fost calculat un preț unitar al producției de energie din surse alternative de 0,70 euro/kWh.

4.3.1. Schema de principiu Energen3

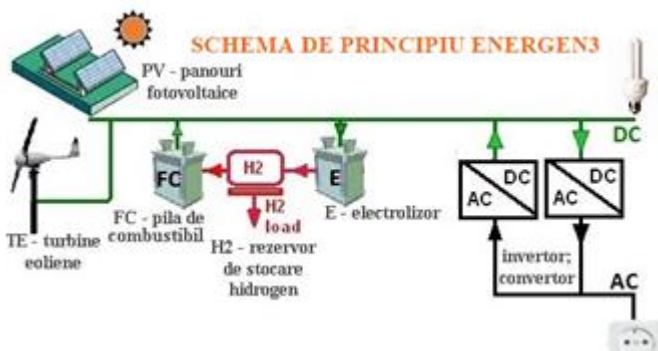


Figura 4.9. Schemă de principiu a sistemului de tip Energen3

Sistemul hibrid energetic Energen3 utilizează ambele tipuri de surse primare de generare a energiei, respectiv radiația solară și viteza vântului, iar ca resursă secundară alternativă folosește energia electrică produsă de un ansamblu de pile de combustibil alimentat cu hidrogen produs local de un electrolizor și stocat într-un recipient sub presiune. Sistemul hibrid Energen3 este prezentat schematic în figura 4.9.

4.3.2. Indicatori de performanță energetică

Se constată că pe perioada unui an de funcționare a sistemului Energen3, din total producției de electricitate din surse regenerabile pentru susținerea energetică a casei pasive se utilizează 57,32%, restul de 42,68% fiind folosită în electroliza apei și se obțin 68,40 kg H₂/an, care este consumat de către pila de combustibil în producția de energie electrică utilă consumatorului, ceea ce reprezintă 9,73% din total energie produsă de sistem.

Disponibilitatea radiației solare și viteza vântului au o influență directă asupra producției de hidrogen, [9] respectiv asupra electrolizorului - echipamentul care utilizează apa și energia solară și/sau energia eoliană pentru a genera hidrogen și oxigen, implicit influențează și timpul de funcționare a acestui echipament [10]. Consumul de hidrogen este condiționat de două considerente: pe de o parte de consumul energetic care se dorește a fi acoperit de către pila de combustibil [11].

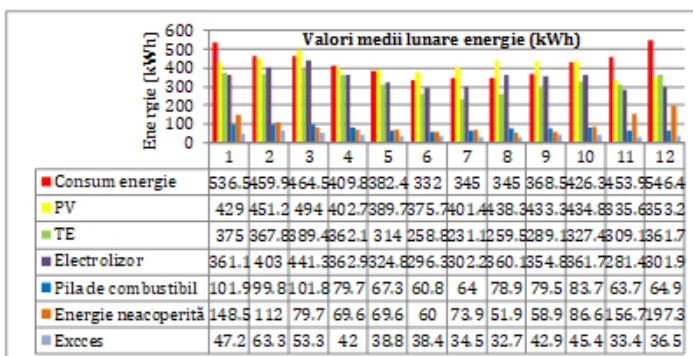


Figura 4.10. Valori medii lunare ale energiei a sistemului de tip Energen3

4.3.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO₂

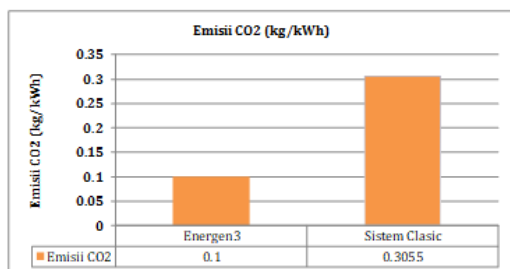


Figura 4.11. Emisii CO₂

Casa pasivă susținută energetic de sistemul Energen3 studiat generează emisii de dioxid de carbon înglobate în sistem în cantitate de 0.10 kgCO₂/kWh, ceea ce reprezintă un procent de 32,73% din valoarea medie calculată pentru o clădire standard susținută energetic prin sisteme clasice de generare a energiei.

4.3.4. Indicatori financiari de performanță

Se observă că ponderea cea mai mare din diagrama costurilor o deține tehnologia hidrogenului, primul loc îl ocupă unitatea de producere și stocare - electrolizorul împreună cu rezervorul de hidrogenului, respectiv 42,41 %, urmat de unitatea de conversie - pila de combustibil cu un procent de 23,03%.

4.4.1. Schema de principiu Energen4

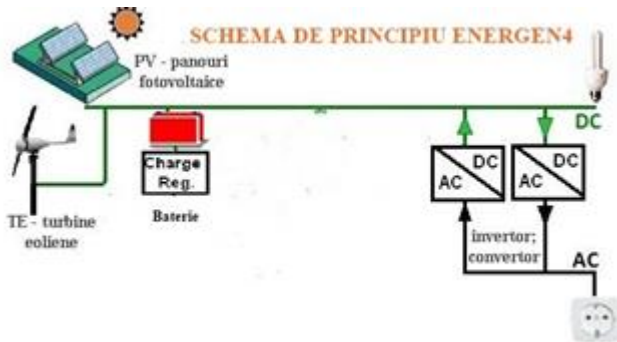


Figura 4.12. Schemă de principiu a sistemului de tip Energen4

Sistemul energetic Energen4 utilizează ambele tipuri de surse primare de generare a energiei, respectiv radiația solară și viteza vântului, iar pentru compensarea caracterului intermitent al energiei eoliene și al celei solare, în vederea asigurării cerințelor consumatorului, excesul de energie se stochează în baterii reîncărcabile. Sistemul Energen4 este prezentat schematic în figura 4.12.

4.4.2. Indicatori de performanță energetică

Din total producție electricitate din surse regenerabile pentru susținerea energetică a casei pasive virtuale se stochează în baterii 22,98%, 40,32% este utilizată în mod direct de către consumatorul casa pasivă, iar restul de 36,70% reprezintă excesul de energie produsă de sistem, care poate fi utilizată în alte aplicații sau injectată în rețeaua națională de distribuție.

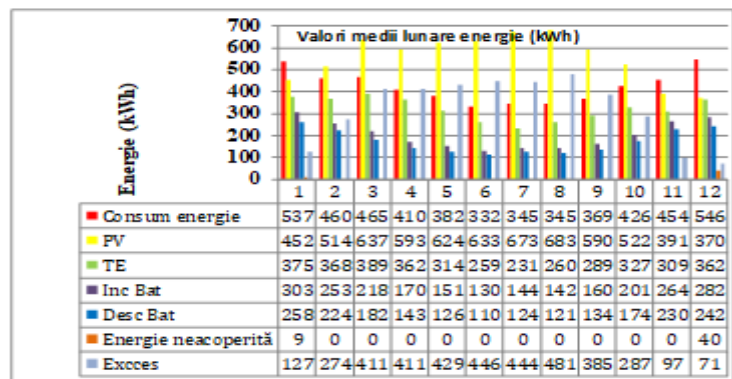


Figura 4.13. Valori medii lunare ale energiei a sistemului de tip Energen4

4.4.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO₂

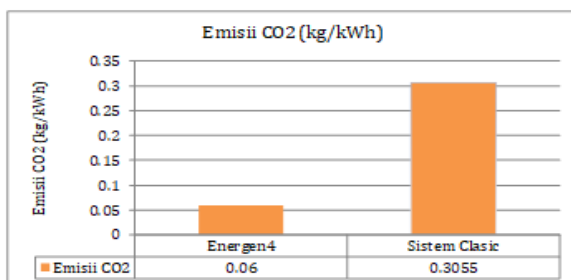


Figura 4.13. Emisii CO₂

Casa pasivă susținută energetic de sistemul Energen4 studiat generează emisii de dioxid de carbon înglobate în sistem în cantitate de 0.06 kgCO₂/kWh, ceea ce reprezintă un procent de 19,64% din valoarea medie calculată pentru o clădire standard susținută energetic prin sisteme clasice de generare a energiei.

4.4.4. Indicatori financiari de performanță

În această ipoteză se observă că ponderea cea mai mare din diagrama costurilor o deține tehnologia de conversie a energiei eoliene, primul loc îl ocupă unitatea de producere electricitate utilizând viteza vântului, respectiv 34,52 %, urmat de unitatea de conversie a radiației solare, respectiv panourile fotovoltaice cu un procent de 23,58%.

4.5.1. Schema de principiu Energen5

Sistemul energetic Energen5 utilizează radiația solară ca sursă primară regenerabilă de generare a energiei și hidrogenul livrat printr-o rețea ipotetică de distribuție centralizată, convertit în energie electrică prin intermediul unui ansamblu de pile de combustibil în energie electrică, drept resursă secundară [12]. Analiza acestui tip de sistem energetic hibrid [13] este efectuată în perspectiva viitoarei economii bazate pe hidrogen[14], în care va exista o rețea de transport și distribuție a hidrogenului. Sistemul Energen5 este prezentat schematic figura 4.14.

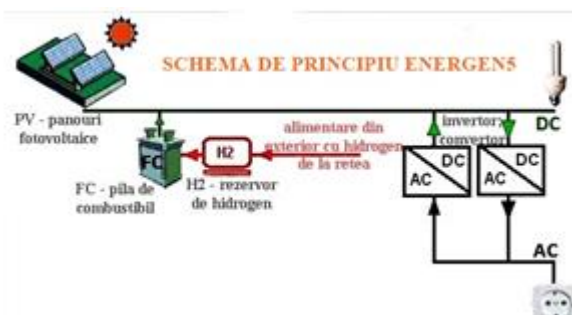


Figura 4.14. Schemă de principiu a sistemului de tip Energen5

Pe baza datelor de intrare prezentate în precedentele subcapitole s-a efectuat simularea cu soft-ul *iHOGA*, iar configurația rezultată este prezentată în tabelul 4.25. Echipamentele componente care alcătuiesc sistemul Energen5 sunt: **panouri fotovoltaice** cu o putere nominală totală instalată de 6,16 kWp, **pilă de combustibil** cu putere nominală de 2 kW, inverter 1800 VA .

4.5.2. Indicatori de performanță energetică

S-a constatat faptul că sistemul energetic hibrid Energen5 configurat generează o cantitate de energie electrică care satisface integral cererea de electricitate la nivel de consumator. Pe tot parcursul anului nu se înregistrează perioade cu cerere neacoperită.

Din funcționarea acestui sistem se produce o cantitate de energie care depășește cererea, care, dată fiind configurația sistemului, care nu include soluție de stocare, poate fi exportată către rețeaua națională de distribuție a energiei electrice. Spre deosebire de cazurile studiate anterior, avantajul combinării celor două tipuri de energii înlătură complet deficiențele datorate caracterului intermitent al radiației solare, în special cel al alternanței zi/noapte, datorită faptului că hidrogenul este disponibil la cerere din rețeaua centralizată și dispare astfel

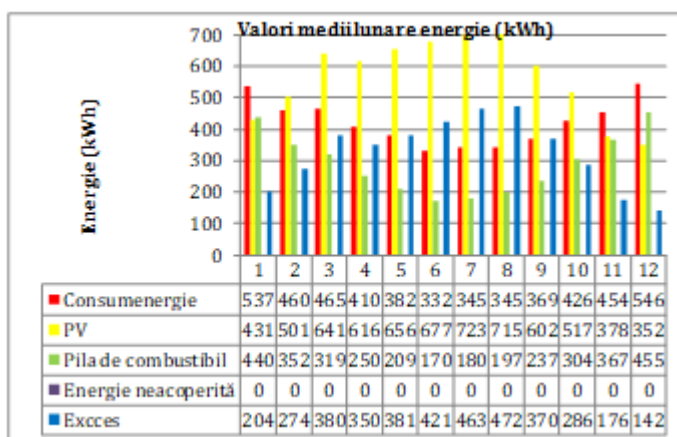
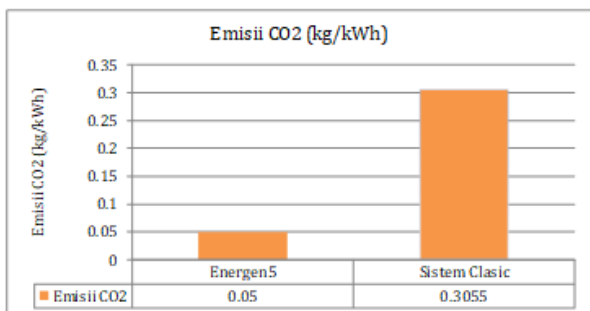


Figura 4.15. Valori medii lunare ale energiei a sistemului de tip Energen5

dezavantajul producției de hidrogen condiționată de disponibilitatea sursei regenerabile.

Calculând gradul de utilizare a resurselor energetice alternative în scopul susținerii energetice a casei pasive în condițiile specificate anterior și utilizând configurația de echipamente componente stabilite, se poate afirma că în funcție de acest aspect rezultă și gradul de autonomie energetică a sistemului față de rețeaua de distribuție a energiei electrice centralizată. Gradul de autonomie al casei pasive alimentate cu un sistem Energen5 este de 100%.

4.5.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO₂



Casa pasivă susținută energetic de sistemul Energen5 studiat generează emisii de dioxid de carbon înglobate în sistem în cantitate de 0.05 kgCO₂/kWh, ceea ce reprezintă un procent de 16,36% din valoarea medie calculată pentru o clădire standard susținută energetic prin sisteme clasice de generare a energiei.

Figura 4.16. Emisii CO₂

4.5.4. Indicatori financiari de performanță

În această ipoteză se observă că ponderea cea mai mare din diagrama costurilor o deține tehnologia hidrogenului, primul loc îl ocupă unitatea de producere a electricității - pila de combustibil, respectiv 44,25 %, urmat de costul de achiziție a hidrogenului cu un procent de 38,24%. După cum am subliniat și în afirmațiile precedente tehnologia de generare a electricității pe bază de hidrogen este în continuă dezvoltare, iar pe măsură ce vor fi validate rezultatele cercetărilor, se preconizându-se scăderea costurilor astfel încât în viitorul apropiat, aceste tipuri de echipamente și tehnologii vor fi competitive cu alte tehnologii din domeniul producerii și stocării de energie.

4.6.1. Schema de principiu Energen

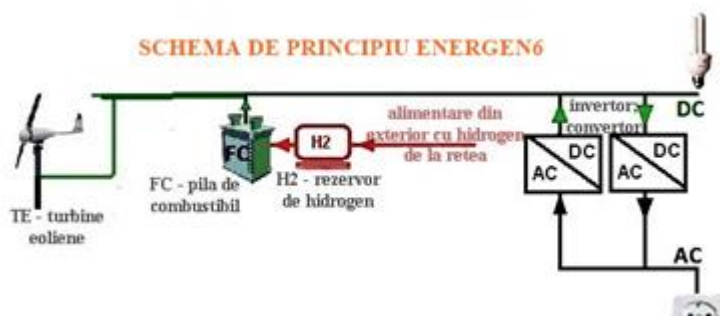


Figura 4.17. Schemă de principiu a sistemului de tip Energen6

Pe baza datelor de intrare prezentate în precedentele subcapitole s-a efectuat simularea cu soft-ul *iHOGA*. Echipamentele componente care alcătuiesc sistemul Energen6 sunt: **turbina eoliană** cu o putere nominală totală instalată de 3,26 kWp, **pilă de combustibil** cu putere nominală de 2 kW, invertor 1800 VA.

4.6.2. Indicatori de performanță energetică

S-a constatat faptul că sistemul energetic hibrid Energen6 generează o cantitate de energie electrică care satisface integral cererea de electricitate a consumatorului. Din

funcționarea acestui sistem se produce o cantitate de energie care depășește cererea, care poate fi exportată către rețeaua națională de distribuție a energiei electrice.

Spre deosebire de cazurile studiate anterior, avantajul combinării celor două tipuri de energii alternative înlătură complet deficiențele datorate caracterului intermitent al vitezei vântului, datorită faptului că hidrogenul este disponibil la cerere din rețeaua centralizată.

Calculând gradul de utilizare a resurselor vânt și hidrogen, în scopul susținerii energetice a casei pasive virtuale în condițiile specificate precedent și utilizând configurația de echipamente componente stabilite, se poate afirma că în funcție de acest aspect rezultă și gradul de autonomie energetică a sistemului față de rețeaua de distribuție a energiei electrice centralizată este de 100%.

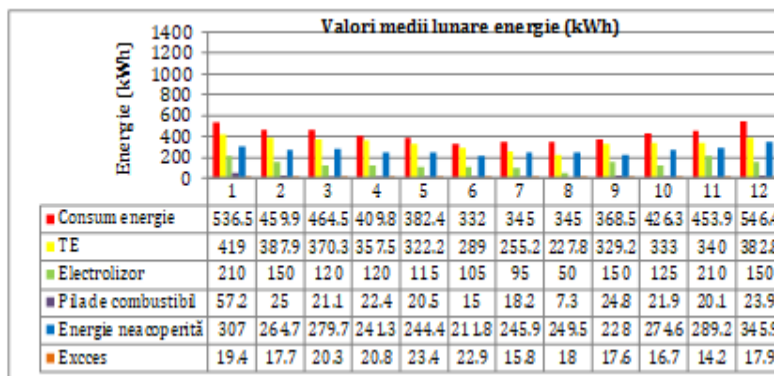


Figura 4.18. Valori medii lunare ale energiei a sistemului de tip Energen6

4.6.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO₂

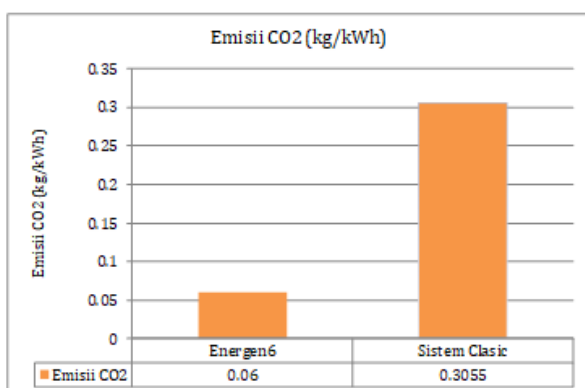


Figura 4.19. Emisii CO₂

Casa pasivă susținută energetic de sistemul Energen6 studiat generează emisii de dioxid de carbon înglobate în sistem în cantitate de 0.06 kgCO₂/kWh, ceea ce reprezintă un procent de 19,64% din valoarea medie calculată pentru o clădire standard susținută energetic prin sisteme clasice de generare a energiei.

4.6.4. Indicatori financiari de performanță

În această ipoteză se observă că ponderea cea mai mare din diagrama costurilor o deține tehnologia hidrogenului, primul loc îl ocupă unitatea de producere a electricității prin intermediul pilei de combustibil cu hidrogen, respectiv 46,05 %, urmat de costul de achiziție a combustibilului hidrogen cu un procent de 36,90%.

4.7.1. Schema de principiu Energen7

Sistemul Energen7 utilizează radiația solară și viteza vântului ca surse primare regenerabile de generare a energiei, iar hidrogenul livrat printr-o rețea ipotetică de distribuție centralizată, convertit în energie electrică prin intermediul unui ansamblu de pile de combustibil în energie electrică [15], drept resursă secundară. Analiza acestui tip de sistem energetic hibrid este efectuată în perspectiva viitoarei economii bazate pe hidrogen, în care va exista o rețea de transport și distribuție a hidrogenului. Sistemul energetic hibrid Energen7 este prezentat schematic în figura 4.20.

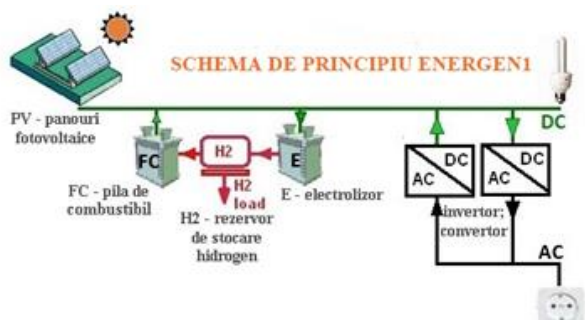


Figura 4.20. Schemă de principiu a sistemului de tip Energen7

Pe baza datelor de intrare prezentate în precedentele subcapitole s-a efectuat simularea cu soft-ul *iHOGA*. Echipamentele componente care alcătuiesc sistemul Energen7 sunt: **panouri fotovoltaice** cu o putere nominală totală instalată de 6,16 kWp, **turbina eoliană** cu o putere nominală totală instalată de 3,26 kWp, **pilă de combustibil** cu putere nominală de 2 kW, inverter 1800 VA.

4.7.2. Indicatori de performanță energetică

Se constată că pe perioada unui an de funcționare a sistemului Energen7, panourile fotovoltaice produc 53,05% și turbinele eoliene produc 29,97% din totalul de energie generat de sistem. Din total producție electricitate din surse regenerabile pentru susținerea energetică a casei pasive se utilizează 50,38%, iar pila de combustibil asigură energia în sistem într-un procent de 16,98%

Spre deosebire de cazurile studiate anterior, avantajul combinării celor două tipuri de energii alternative înlătură complet deficiențele datorate caracterului intermitent al radiației solare și vitezei vântului, datorită faptului că hidrogenul este disponibil la cerere din rețeaua centralizată [16] și dispare astfel dezavantajul producției de hidrogen condiționată de disponibilitatea sursei regenerabile

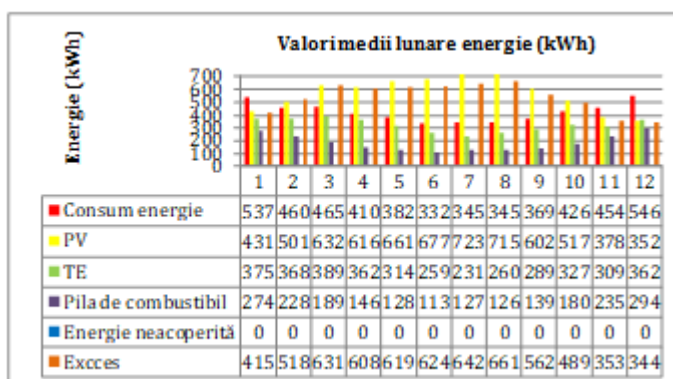


Figura 4.21. Valori medii lunare ale energiei a sistemului de tip Energen7

4.7.3. Indicatori de performanță privind emisiile de CO₂

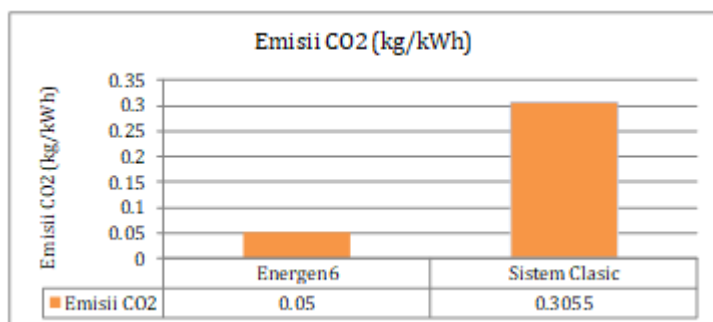


Figura 4.22. Emisii CO₂

Casa pasivă susținută energetic de sistemul Energen7 studiat generează emisii de dioxid de carbon înglobate în sistem în cantitate de 0.05 kgCO₂/kWh, ceea ce reprezintă un procent de 16,36% din valoarea medie calculată pentru o clădire standard susținută energetic prin sisteme clasice de generare a energiei.

4.7.4. Indicatori financiari de performanță

În această ipoteză se observă că ponderea cea mai mare din diagrama costurilor o deține tehnologia hidrogenului, primul loc îl ocupă unitatea de producere a electricității prin intermediul pilei de combustibil pe baza hidrogenului, respectiv 36,62%, urmat de costul de achiziție a combustibilului hidrogen cu un procent de 26,52%.

Capitolul 5. Analiza comparativă a parametrilor de performanță a sistemelor energetice hibride

Date fiind rezultatele simulărilor în funcționare ale celor șapte sisteme de energie hibridă considerate în studiile de caz prezentate în capitolul 4 devine necesară stabilirea variantei optime de susținere cu energie hibridă a clădirii de tip casă pasivă virtuală analizată. Capitolul de față este dedicat analizelor comparative ale parametrilor de performanță înregistrați, în cadrul cărora au fost abordate în paralel rezultatele și s-au întocmit grafice comparative care au fost analizate critic.

Cu scopul de a fundamenta decizia de selecție a sistemului energetic hibrid optim [17] rezultatele obținute au fost comparate în cadrul unei analize multicriteriale. Metoda de analiză și selecție utilizată are la bază modelul Analytical Network Process (ANP), [18] iar calculele au fost efectuate cu ajutorul softului Super Decisions V3.0. Alternativele și criteriile utilizate în cadrul studiului sunt prezentate în Tabelul 5.1.

Tabelul 5.1. Alternative și criterii utilizate în analizele comparative multicriterial

Nr crt	Alternative	Energen 1	Energen 2	Energen 3	Energen 4	Energen 5	Energen 6	Energen 7
	Criterii							
1	Energie anuală RES	5549	4013	8784	10525	6804	3845	10651
2	Grad autonomie	53,10	44,08	79,8	99,10	100	100	100
3	Energie back-up	562	277	946	2419	0	0	0
4	Energie achiziționată	2739	3210	1172	50	0	0	0
5	Exces energie	124,2	205	456	2366	2843	1154	4133
6	Emisii totale CO ₂	1371	1469	898	439	435	413	484
7	Emisii CO ₂ /kW	0,16	0,12	0,1	0,06	0,05	0,06	0,05
8	Valoare investiție	35910	39805	47279	26808	21818	32858	31712
9	Cost back-up	44046	45865	45492	8889	51003	56929	31959
10	Cost 25 ani	91409	101002	107946	37650	116622	146545	96992
11	Preț unitar / kW	0,63	0,7	0,75	0,26	0,81	1,02	0,67

5.1. Analiza parametrilor de performanță utilizând grafice comparative

În scopul de a compara rezultatele simulărilor în funcționare ale sistemelor energetice hibride au fost întocmite grafice comparative pe baza *parametrilor energetici, ecologici și economici* obținuți în cadrul studiilor de caz din capitolul precedent [19]. Rolul acestor analize grafice comparative este de a selecta varianta optimă de sistem energetic hibrid [20] dintre cele șapte tipuri studiate. Cea mai bună aplicabilitate la nivel de alimentare cu energie electrică a casei pasive în condițiile obținerii electricității prin utilizarea unor sisteme care să ofere un randament maxim, poluare minimă și costuri minime [21].

5.1.1. Analiza performanțelor energetice

Ca principal indicator energetic, *valoarea medie anuală a energiei utilizată din resurse regenerabile de energie* (soare sau vânt). *Criteriul 2* de comparație se referă la *gradul de autonomie al consumatorului față de rețeaua națională de distribuție a energiei electrice*

clasice,[22]. Criteriul 3 se referă la *energia de rezervă (back-up)* necesară pentru susținerea consumatorului [23]. Criteriul 4 de comparație este reprezentat de *energia achiziționată din rețeaua națională de distribuție* a electricității necesară pentru susținerea consumatorului. Criteriul 5 de comparație se referă la *excesul de energie rezultat din funcționarea sistemelor*, fiind comparativ.

5.1.2. Analiza performanțelor ecologice

Parametrii referitori la elemente de protecția mediului înconjurător [24] care sunt analizate comparativ se referă la emisiile de dioxid de carbon generate de către sistemele hibride energetice studiate, în special la emisiile de CO₂ înglobate în echipamentele acestor sisteme.

5.1.3. Analiza performanțelor economice

Indicatorii financiari considerați drept criterii de comparație în analiza comparativă sunt: valoarea investiției inițiale, costul stocării și/sau a rezervei de energie, costul sistemului pe o perioadă de 25 de ani de viață și prețul unitar al unui kWh energie.

5.2. Analiza parametrilor de performanță utilizând metoda ANP

Analiza multicriterială a avut la bază aplicarea metodei ANP presupune parcurgerea unui număr **de 14 etape**.

În capitolul de față a fost prezentat un studiu de caz cu privire la ***alegerea celei mai bune soluții de susținere cu energie hibridă a consumatorului casa pasivă virtuală*** dimensionat în Capitolul 2. Analizele comparative ale parametrilor de performanță înregistrați de către sistemele energetice hibride configurate și simulate în funcționare în Capitolul 4 au presupus abordarea în paralel a rezultatelor și s-au întocmit grafice comparative care au fost analizate. Cu scopul de a fundamenta decizia de selecție a sistemului energetic - alternativă optimă a fi implementată pentru susținerea cu energie hibridă a consumatorului, *rezultatele obținute au fost comparate în cadrul unei analize multicriteriale*. Metoda de analiză și selecție utilizată are la bază modelul Analytical Network Process (ANP), iar calculele au fost efectuate cu ajutorul softului Super Decisions V3.0.

În studiul de caz sunt analizate un număr de șapte alternative pe baza unui număr de unsprezece criterii decizionale. Criteriile decizionale luate în considerare pentru fundamentarea deciziilor au fost: energia anuală generată de resursele alternative disponibile local; gradul de autonomie față de rețeaua clasică de distribuție a electricității, energia de rezervă stocată în baterii sau energia hidrogenului; energia achiziționată din rețeaua clasică; excesul de energie generat de sistemele hibride energetice; emisii totale CO₂; emisii CO₂ per kWh; valoarea investiției; costul cu stocarea, rezerva de energie sau hidrogenul achiziționat din afara sistemului hibrid energetic; costul total calculat pentru 25 de ani de viață a sistemului și prețul unitar al unui kWh electricitate.

Analiza comparativă conduce la următoarele concluzii: considerat individual fiecare tip de indicator energetic, de mediu sau economic poate aduce argumente pro și contra fiecăruia dintre cele șapte sisteme de generare a energiei analizate. Global, acești indicatori oferă argumente în favoarea sistemului Energen4, urmat de Energen7 deoarece acestea oferă cea mai mare eficiență energetică atât în satisfacerea consumului de energie pentru consumatorul casa pasivă studiat, cât și în valorificarea potențialului energiilor neconvenționale disponibile în situația amplasamentului studiat. Performanțele ecologice comparate recomandă ca variantă optimă ipoteza Energen4 - sistemul hibrid cu stocare energie în baterii reîncărcabile, dar și cele cu hidrogen produs independent de sisteme, respectiv Energen5, Energen6 și Energen7.

Din perspectiva financiară se recomandă ca variantă optimă sistemul Energen4 care stochează energia regenerabilă în baterii reîncărcabile, urmat de Energen7 sistemul care susține

energetic consumatorul casa pasivă prin hibridizarea celor trei tipuri de energie - solară, eoliană și energie electrică bazată pe hidrogen. La polul opus se situează sistemele cu producție locală de hidrogen prin electroliza care dat fiind gradul de autonomie redus achiziționează electricitate din rețeaua clasică și totuși au valori ale indicatorilor financiari calculați similari cu cei ai sistemelor care asigură autonomie 100%.

Analiza multicriterială ANP asistată de soft-ul Super Decisions V3.0. fundamentează argumentele precizate prin analiza grafică și conduce la următoarele concluzii:

Pe baza priorității globale maxime, se recomandă ca variantă optimă alegerea alternativei A4, respectiv sistemul energetic Energen4 care furnizează consumatorului electricitate prin conversia energiei solare și a energiei eoliene, iar stocarea în vederea asigurării energiei de rezervă este făcută prin intermediul bateriilor reîncărcabile, în cazul consumatorului casa pasivă amplasat în Rm. Vâlcea, România, care are un consum de energie electrică calculat în valoare de 5070 kWh/an.

Modelul matematic prezentat este flexibil permițând introducerea de noi criterii și subcriterii precum și alte alternative. Metodologia descrisă în acest studiu de caz poate fi modificată și utilizată în funcție de situația specifică.

Capitolul 6. Concluzii generale. Contribuții originale. Tendințe și perspective de cercetare

6.1. Concluzii generale

Topica de cercetare referitoare la casa pasivă și sistemele de energie hibridă se înscrie pe linia asigurării sustenabilității locuirii, contribuind la diversificarea surselor de energie utilizate, la economisirea energiei și la reducerea poluării.

Teza de doctorat prezintă soluții de utilizare și integrare a surselor de energie alternativă - soare și vânt împreună cu tehnologii de stocare energetică, în susținerea energetică a *caselor pasive*. În acest sens au fost analizate performanțele energetice, ecologice și economice ale sistemelor energetice având diverse modalități de hibridizare a energiilor și soluții diferite de stocare a energiei alternative (baterie reîncărcabilă, hidrogen). Alternativele alese pentru studiu au fost simulate în diferite ipoteze și condiții de funcționare și utilizare, în scopul de a evidenția performanțele acestor soluții de sisteme energetice hibride în susținerea cu energie a *casei pasive*.

Prin intermediul studiilor de caz configurate au fost realizate condiții virtuale de funcționare a sistemelor energetice hibride, iar apoi s-au realizat simulări în funcționare pentru o perioadă de un an cu scopul de a demonstra utilitatea globală a acestor sisteme, dar și a echipamentelor componente. Deasemenea au fost realizate calcule și simulări privind emisiile de dioxid de carbon înglobate în sisteme, dar și analize financiare legate de costurile de investiție, costurile de funcționare pentru o perioadă de 25 de ani și costul unitar al unui kWh energie obținut din energii hibride.

Date fiind rezultatele simulărilor în funcționare a sistemelor energetice hibride configurate în cadrul studiilor de caz devine necesară stabilirea variantei optime de susținere cu energie hibridă a clădirii de tip casă pasivă analizată. Una din direcțiile de cercetare abordată în cadrul tezei a fost dedicată analizelor comparative privind parametrii de performanță înregistrați, în cadrul cărora au fost abordate în paralel rezultatele și s-au întocmit grafice comparative care au fost analizate critic. Deasemenea, pentru a fundamenta decizia de selecție a sistemului energetic care reprezintă alternativa optimă a fi implementată pentru susținerea cu energie hibridă a consumatorului, rezultatele obținute au fost comparate în cadrul unei analize multicriteriale. Metoda de analiză și selecție utilizată are la bază

modelul Analytical Network Process (ANP), iar calculele au fost efectuate cu ajutorul softului Super Decisions V3.0.

Cecetările efectuate legate de generarea energiei electrice cu sisteme energetice hibride în sectorul clădirilor eficiente energetic, în special al caselor pasive au condus la următoarele concluzii:

- utilizarea sistemelor energetice hibride și a tehnologiilor de conversie a energiei alternative (soare, vânt) în producția de electricitate poate realiza un grad de autonomie de 100% față de rețeaua națională de distribuție a energiei electrice;
- excesul de energie generat din funcționarea echipamentelor de conversie a iradiației solare și a vitezei vântului poate fi valorificat local în cadrul sistemelor energetice hibride prin producerea de hidrogen-prin electroliza, devenind astfel element stocator de energie, intrucat hidrogenul poate fi reconvertit in energie electrica prin intermediul pilelor de combustibil;
- producția locală electrolitică de hidrogen din cadrul sistemelor energetice hibride este direct influențată de disponibilitatea resurselor regenerabile de energie, având un caracter variabil pe perioada unui an, ceea ce implică influențează și producția de energie electrică a pilei de combustibil, care este deasemenea direct proporțională cu disponibilitatea combustibilului hidrogen;
- emisiile de dioxid de carbon în cazul sistemelor energetice care susțin cu energii hibride o clădire eficientă energetic de tip casa pasivă sunt semnificativ mai mici, fiind calculată o medie cu peste 55% mai redusă față de sistemele energetice clasice care alimentează cu electricitate o clădire rezidențială standard;
- costurile echipamentelor de conversie a energiei solare și eoliene care fac parte din sistemele energetice hibride sunt competitive, dar în ceea ce privește tehnologia de producere, stocare și conversie în electricitate a hidrogenului și costurile cu achiziția combustibilului hidrogen se constată o pondere ridicată în graficul financiar. Tehnologia de generare a energiei electrice pe bază de hidrogen și modalitățile de producție, stocare și distribuție a hidrogenului fac obiectul unei continue cercetări și dezvoltări, fapt care va influența și determina reducerea continua a costurilor, iar aceste echipamente, dar și combustibilul hidrogen vor deveni competitive cu tehnologiile clasice din domeniul producerii și stocării energiei.

6.2. Contribuții originale

Principalele *contribuții proprii* aduse la elaborarea tezei:

- Sinteza cu privire la stadiul actual a sistemelor energetice hibride la nivel internațional;
- Sinteza cu privire la conceptul casa pasivă;
- Realizarea hărților bibliometrice în domeniul sistemelor de energie hibridă;
- Estimarea consumului total de energie a consumatorului casa pasivă virtuală pentru: încălzire, prepararea apei calde de consum, instalația de iluminat, echipamente electrocasnice și auxiliare;
- Intocmirea cronogramelor energetice de consum zilnic/orar pentru casa pasivă virtuală;
- Sinteza soft-urilor virtuale din domeniul sistemelor de energie hibridă;
- Prezentarea modulelor soft-ului iHOGA și a echipamentelor tehnologice utilizate;
- Stabilirea indicatorilor de performanță pentru sistemele energetice hibride respectiv: indicatori energetici, ai mediului înconjurător și financiari;
- Simularea virtuală a celor șapte sisteme energetice hibride;
- Evaluarea performanțelor energetice ale celor șapte sisteme energetice hibride;

- Evaluarea performanțelor cu privire la protecția mediului înconjurător referitor la emisiile de CO₂ generate pe întreaga durată de viață a fiecaruia dintre cele șapte sisteme energetice hibride;
- Evaluarea performanțelor financiare ale celor șapte sisteme energetice hibride;
- Analiza performanțelor energetice, ecologice și financiare;
- Analiza parametrilor de performanță utilizând metoda ANP;
- Identificarea soluției optime pe baza analizei multicriteriale;
- Fișa tehnică cu specificații tehnice pentru o casă pasivă susținută cu sistem de energie hibridă

6.3. Tendințe și perspective de cercetare

Subiectele studiate și analizate pe parcursul prezentei teze de doctorat precum și rezultatele obținute, conduc spre identificarea viitoarelor direcții de cercetare în domeniul temei abordate:

- propunerea unor sisteme energetice hibride specifice în funcție de potențialul energetic al zonei de amplasare a consumatorilor;
- configurarea, optimizarea, proiectarea și simularea parametrilor în timp real ai unor soluții noi de hibridizare a energiilor;
- extinderea cercetărilor spre alte tipuri de surse energetice alternative și tehnologii de conversie a energiilor neconvenționale (ex. pompa de căldură), care să asigure eficiență și fiabilitate ridicată prin hibridizarea cu energiile regenerabile solară și eoliană;
- configurarea, optimizarea, simularea și proiectarea unor noi sisteme energetice hibride cu eficiență ridicată, care pot să susțină cu energie aplicații staționare având diverse funcțiuni, de exemplu o cladire rezidențială de tip nZEB.
- realizarea unei aplicații computaționale de genul software pentru proiectarea sistemelor energetice hibride, care să faciliteze configurarea, optimizarea, calculul și dimensionarea echipamentelor de conversie a energiei produse din surse de energie regenerabile, în funcție de consumul de energie al consumatorului astfel încât să fie asigurată independența energetică a acestuia.

Pornind de la definirea casei pasive se apreciază că îmbinarea cu un nou concept (casa inteligentă) poate aduce beneficii managementului energetic (datorită automatizării) prin eficientizarea și conservarea energiei, dar poate fi și drumul către o altă direcție de cercetare, îmbinarea dintre cele două concepte (casa pasivă, casa inteligentă) fiind drumul către „casa viitorului”.

Referințe

[1]Raboaca, M.S.; Bizon, N.; Grosu, O.V. Optimal energy management strategies for the electric vehicles compiling bibliometric maps. International Journal Energy Resources, 2021, Pages 1–44, doi: 10.1002/er.6503.

[2] WOSview software www.WOSview.com

[3] G. Badea, G.S. Feleschi, S.M. Raboaca, D. Muresan, 2015, Performance of Fuel Cell for Energy Supply of Passive House, AIP Conference Proceedings – 10th International Conference Processes in Isotopes and Molecules, 1700: 050010, ISSN: 0094-243X, DOI: 10.1063/1.4938448

[4] Andreea-Raluca Felseghi, Maria Simona Raboaca, Alin Nicolae Corbu - Green Hydrogen Used for a Small Community. Case Study prezentata la FOREN 2022- Energy transition needs regional cooperation, 12–15 Iunie 2022, Costinesti, Romania

[5] Andreea Felseghi, Maria Simona Raboaca, Andrei Bolboaca, Simulation Model For Designing A Hybrid Energy System For Residential Application, International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management, 16th to 25th August 2020, Albena, Bulgaria

[6] I. Aschilean, M. Varlam, M. Culcer, M. Iliescu, M. Raceanu, A. Enache, M. S. Raboaca, G. Rasoi, C. Filote, 2018, Hybrid Electric Powertrain with Fuel Cells for a Series Vehicle, *Energies*, 11(5), 1294, ISSN: 1996-1073, <https://doi.org/10.3390/en11051294>

[7] Felseghi Raluca-Andreea, Maria Simona Răboacă, Lungu Florin Alexandru, Pilele de combustibil – soluție tehnologică de cogenerare a energiei, Conferința Națională și Expoziția de Energetică 2019 – SIER – Lucrari, pp. 412-417, ISSN: 1843-6005, Sinaia, 23-25 Octombrie 2019, Publisher: SIER 2019, Tipărit la Tipografia "ASTRA" Deva, Romania

[8] Badea, G.S. Naghiu, R.A. Felseghi, S. Raboaca, I. Aschilean, I. Giurca, Multi-Criteria Analysis regarding the selection system with Hydrogen production of Solar Radiation, 10th International Conference Processes in Isotopes and Molecules, 23-25.09.2015, Cluj Napoca

[9] Standalone Green Hybrid Energy System for a Small Community. Case Study, Gheorghe Badea, Maria Simona Răboacă, Ioan Așchilean, Raluca A. Felseghi, XXIIIrd International Conference New Cryogenic and Isotope Technologies for Energy and Environment, 26-29.10.2021, Băile Govora, Romania, ISSN: 2810-3203, ISSN-L: 2810-3203, pag. 64-66

[10] Maria Simona Răboaca, Raluca Andreea Felseghi, Energy Efficient Stationary Application Supplied with Solar-Wind Hybrid Energy, 2019 International Conference on Energy and Environment (CIEM), DOI: 1109/CIEM46456.2019.8937684, pp. 495-499, ISBN: 978-1-7281-1533-7, Conference Location: Timisoara, Romania, Romania, Publisher: IEEE, USA

[11] Raluca-Andreea Felseghi, Andrei Bolboacă, Maria-Simona Răboaca, Ioan Așchilean, Chapter: 4.16: Hybrid Energy Systems for Power of Sustainable Buildings. Case Study: A Renewable Energy Based on-Site Green Electricity Production, Book: Comprehensive Renewable Energy (Second Edition), vol 4, pp. 420-436, DOI: 10.1016/B978-0-12-819727-1.00037-6, 2022, ISBN: 978-0-12-819734-9, Publisher: Elsevier, England

[12] G. Badea, S.M. Raboaca, R.A. Felseghi, I. Stefanescu, 2015, Simulation and Design Optimization of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System, *Energy and Clean Technologies – International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 519-526, ISSN: 1314-2704

[13] Badea, S.M. Raboaca, I. Stefanescu, V. Demeusy, Simulation and design optimization of a photovoltaic fuel cell hybrid system, International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 15-26.06.2015, Albena, Bulgaria

[14] Raluca-Andreea Felseghi, Ioan Așchilean, Nicoleta Cobîrzan, Andrei Mircea Bolboacă, Maria Simona Raboaca, 2021, Optimal Synergy between Photovoltaic Panels and Hydrogen Fuel Cells for Green Power Supply of a Green Building—A Case Study, *Sustainability*, 13(11), 6304;

[15] Badea, R. Felseghi, I. Stefanescu, S.M. Raboaca, I. Aschilean, A. Bolboaca, D. Muresan, T. Muresan, Hybrid PV/WT energy system for power supply of green building in Romania, 13th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2015 (ICNAAM 2015), 23-29 September 2015, Rhodes, Greece

[16] Badea, R. Felseghi, I. Stefanescu, S.M. Raboaca, I. Aschilean, A. Bolboaca, D. Muresan, T. Muresan, Hybrid PV/WT energy system for power supply of green building in Romania, 13th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2015 (ICNAAM 2015), 23-29 September 2015, Rhodes, Greece

- [17] Badea, R. Felseghi, S. Raboaca, A. Bolboaca, I. Aschilean, D. Moldovan, D. Chira, D. Muresan, T. Soimosan, Hybrid solar and wind electric system for Romanian Nearly Zero Energy Buildings (nERB), Forumul Regional al Energiei 2016, 12-16.06.2016, Costinesti
- [18] Badea, S. M. Răboacă, A.L. Constantin, R.A. Felseghi, I. Aschilean, A. Bolboacă, E. Moldovan, Simulation of a Hybrid System With Opal-Rt Technologies, The 21st Conference Progress in Cryogenics and Isotopes Separation, 19-21 Octombrie 2016, Calimanesti-Caciulata, Valcea, Romania
- [19] Saaty, T.L. (2013). Analytic Network Process. In: Gass, S.I., Fu, M.C. (eds) Encyclopedia of Operations Research and Management Science. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_32
- [20] G. Badea, S. M. Raboaca, I. Stefanescu, R. A. Felseghi, V. Demeusy, 2015, Comparative study on optimization of hybrid systems, Progress of Cryogenics and Isotopes Separation, 18(1):38-45, ISSN 1582-2575
- [21] Optimal design of green hybrid systems for applications in passive house domain. Case study, Gheorghe Badea, Raluca-Andreea Felseghi, Simona Răboaca, Ioan Ștefănescu, Ioan Așchilean, Mihai Culcer, Gabriel Rasoi, Proceeding the 14'th Regional Energy Forum – FOREN 2018, Sectiunea “Cresterea eficientei energetice”, 10-14.06.2018, Costinesti
- [22] Simulation Model for Designing a Hybrid Energy System for Residential Application, Andreea Felseghi, Maria Simona Raboaca, Andrei Bolboaca, International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management, 16th to 25th August 2020, Albena, Bulgaria
- [23] S. M. Raboaca, 2015, Sustaining the Passive House with Hybrid Energy Photovoltaic Panels-Fuel Cell, Progress of Cryogenics
- [24] G. Badea, R. Felseghi, S. M. Raboaca, I. Aschilean, A. Bolboaca, D. Muresan, T. Muresan, 2015, RES Storage Solution for Clean Electrification of Passive House, Applied Mechanics and Materials, 811:339-344, ISSN: 1660-9336, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.811.339