



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI

Fondul Social European
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale
2007-2013MINISTERUL
EDUCAȚIEI
NAȚIONALE

OIPOSDRU

Universitatea Politehnica
din București**FONDUL SOCIAL EUROPEAN**

Investește în oameni!

**Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013. Proiect
POSDRU/159/1.5/S/134398****Dezvoltarea resurselor umane din cercetarea doctorala si postdoctorala: motor al societății bazata pe cunoaștere -KNOWLEDGE****UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI**

Facultatea de Energetică

Departamentul de Producere și Utilizare a Energiei

Nr. Decizie Senat 237 din 02.09.2015

TEZĂ DE DOCTORAT*Contribuții la dezvoltarea modelului matematic gray–box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică**Contributions to the development of gray–box mathematical model used for analyzing high energy efficiency buildings***Autor:** Ing. Mihail–Bogdan CĂRUȚAŞIU**Conducător de doctorat:** Prof. dr. ing. Adrian BADEA**COMISIA DE DOCTORAT**

Președinte	Prof. dr. ing. George DARIE	de la	Univ. POLITEHNICA din București
Conducător de doctorat	Prof. dr. ing. Adrian BADEA	de la	Univ. POLITEHNICA din București
Referent	Prof. dr. ing. Horia NECULA	de la	Univ. POLITEHNICA din București
Referent	Prof. dr. ing. Ioana COLDA	de la	Univ. Tehnică de Construcții București
Referent	Conf. dr. ing. Cătălin TEODOSIU	de la	Univ. Tehnică de Construcții București

București, 2015

Mulțumiri

Elaborarea tezei de doctorat a reprezentat cea mai mare provocare profesională până în prezent, realizabilă sub îndrumarea profesională primită din partea oamenilor cu care am avut onoarea să interacționez în acești trei ani. Am reușit să acumulez în această perioadă o experiență profesională și socială care a contribuit atât la formarea mea intelectuală cât și personală.

Doresc să exprim pe această cale cele mai sincere mulțumiri conducătorului meu de doctorat, domnul profesor doctor inginer **Adrian BADEA**, care m-a îndrumat pe tot parcursul tezei de doctorat cu profesionalism și dedicație. Vasta experiență pedagogică a domniei sale, m-a determinat să încerc întotdeauna să îmi depășesc limitele, sfaturile și opiniile dumnealui având un aport indispensabil în realizarea acestei lucrări. Îi sunt recunoscător pentru oportunitatea de a studia un domeniu de cercetare nou și provocator și pentru încrederea și încurajările manifestate pe întreaga perioadă a studiului doctoral.

Totodată, doresc să îmi exprim recunoștința față de colectivul Departamentului de Producere și Utilizare a Energiei, facultatea de Energetică, condus de domnul profesor **Horia NECULA**, căruia îi mulțumesc pe această cale pentru sfaturile acordate și implicarea mea în activități didactice. Îi mulțumesc domnului prorector **George DARIE** pentru optimismul și sfaturile domniei sale oferite de-a lungul timpului. Un rol important în progresul și diseminarea cercetării l-au avut domnul profesor **Constantin IONESCU** și **Vladimir TANASIEV**, cărora doresc să le mulțumesc pentru disponibilitatea și amabilitatea de care au dat dovadă. De asemenea, le mulțumesc domnilor profesori **Cosmin MĂRCULESCU** și **Cristian DINCA**, dar și celorlalți colegi din departament, pentru sfaturile, discuțiile și argumentele constructive aduse pe tema tezei de doctorat, și nu numai.

Îi mulțumesc **Silviei STEGARU** pentru implicarea și ajutorul acordat în realizarea aplicației de estimare a consumului de energie într-o clădire.

Le mulțumesc din suflet **Andrei, mamei, familiei și prietenilor** mei pentru sprijinul necondiționat oferit.

Lucrarea îi este dedicată tatălui meu, **Nicolae CĂRUȚAŞIU**.

București, octombrie 2015

Mihail-Bogdan CĂRUȚAŞIU

Motto:

“Everybody is affected in one way or another by buildings – we are born in them, live in them, work in them, and more often than not die in them, yet the layman probably knows less about them than almost anything else that affects his life.” **Richard Reid**, *Book of Buildings*, Peerage Books, London, 1984, p. 8.

“Fiecare este afectat într-un fel sau altul de clădiri – ne naștem în ele, trăim în ele, muncim în ele și cel mai adesea, chiar murim în ele. Un nespecialist știe probabil mai puțin despre ele decât despre orice altceva care ii afectează viață”. **Richard Reid**, *Cartea clădirilor*, Peerage books, Londra 1984, p.8.

CUPRINS

INTRODUCERE	11
CAPITOLUL 1. Context și motivație.....	13
1.1. Distribuția consumului energetic în sectorul clădirilor	14
1.2. Contextul legislativ și reglementările din domeniu.....	15
1.2.1. Directivele privind performanța energetică a clădirilor (EPBD)	16
1.2.2. Reglementări naționale privind eficiența energetică în clădiri.....	18
1.3. Metode de creștere a eficienței energetice în sectorul clădirilor–Definiții	19
1.3.1. Clădiri cu consum aproape zero de energie (nZEB)	19
1.3.2. Clădiri inteligente	22
CAPITOLUL 2. Studiul experimental al comportamentului energetic al casei pasive UPB pe perioada de încălzire.....	24
2.1. Descrierea standardului clădirilor pasive	24
2.2. Descrierea clădirilor pasive UPB	27
2.2.1. Sistemul de monitorizare	29
2.2.2. Sistemul de control al clădirii (SBC – Smart Building Controller)	31
2.3. Rezultatele implementării sistemului SBC. Bilanțul energetic al Casei Laborator pentru perioada de încălzire	34
2.3.1. Confortul interior	34
2.3.2. Consumul energetic.....	37
2.3.3. Bilanțul energetic al Casei Laborator în perioada monitorizată.....	40
2.3.4. Concluzii	42
2.4. Analiza energie termice recuperate prin implementarea sistemului HVAC.....	43
2.4.1. Rezultatele analizei.....	44
2.4.2. Concluzii	48
CAPITOLUL 3. Simulații dinamice privind comportamentul energetic al casei pasive UPB	49
3.1. Descrierea programelor utilizate	51
3.1.1. EnergyPlus	51
3.1.2. Passive House Planning Package (PHPP)	53
3.1.3. Photovoltaic System Software (PVsyst)	54
3.2. Simularea dinamică a necesarului de energie pentru încălzire și răcire	56
3.3. Simularea dinamică a sistemelor de producere a energie electrice.....	60
3.4. Concluzii	64
CAPITOLUL 4. Estimarea consumului de energie pentru încălzire utilizând o abordare matematică hibrid bazată pe inteligență computațională.....	65
4.1. Metode de determinare a funcțiilor de transfer	66
4.1.1. Determinarea funcției de transfer utilizând transformata Laplace.....	66
4.1.2. Determinarea funcției de transfer utilizând metoda State–Space	68
4.2. Modele hibrid de estimare a energiei consumate pentru climatizarea spațiului interior într-o clădire.....	70
4.3. Elemente teoretice ale Algoritmilor Genetici (GA)	73
4.4. Implementarea modelului gray-box, utilizat în conjuncție cu un algoritm genetic îmbunătățit.....	78
4.4.1. Implementarea modelului matematic hibrid	79
4.4.2. Implementarea Algoritmului Genetic.....	84

Contribuții la dezvoltarea modelului gray–box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică	
4.4.3. Rezultate și discuții	87
4.4.3.1. Estimarea energiei consumate pentru încălzire.....	90
4.4.3.2. Influenta operatorilor genetici asupra eficienței de optimizare.....	98
4.5. Concluzii	102
CAPITOLUL 5. Concluzii	106
5.1. Concluzii generale.....	106
5.2. Contribuții originale	108
5.3. Perspective de cercetare	109
ANEXE.....	111
ANEXA A1. Diseminarea rezultatelor cercetării	111
ANEXA A2. Crearea funcției de transfer utilizată în modelarea matematică a clădirii analizare, utilizând programul de calcul MATLAB.....	112
ANEXA A3. Valorile parametrilor optimizați.....	115
ANEXA A4. Estimarea consumului de energie utilizând o perioadă de 5 zile în recalcularea Algoritmului Genetic.....	118
ANEXA A5. Rezultatele analizei de sensibilitate.....	120
BIBLIOGRAFIE.....	124

CUPRINS FIGURI

Figura 1.1. Trendul consumului mondial de energie primară între 2003 și 2013	13
Figura 1.2. Prognoza consumului mondial de energie	13
Figura 1.3. Distribuția consumul energetic al UE în clădiri.....	14
Figura 1.4. Structura consumului de energie pe sectoare și distribuția consumului din clădiri pe activități	15
Figura 2.1. Comparație între o clădire standard și o clădire pasivă.....	24
Figura 2.2. Comparație a consumului de energie între diferite standarde de clădiri	25
Figura 2.3. Clădirile pasive din incinta UPB.....	27
Figura 2.4. Sistemul HVAC al Casei Laborator și poziționarea senzorilor cu fir	29
Figura 2.5. Poziționarea senzorilor wireless.....	31
Figura 2.6. Fereastra aplicației desktop Policy Editor.....	32
Figura 2.7. Fereastra editorului de expresii din cadrul SBC–ului	33
Figura 2.8. Temperatura exterioară măsurată în perioada de monitorizare	34
Figura 2.9. Variația temperaturii interioare pe 31 ianuarie 2014.....	35
Figura 2.10. Diferența între temperatura medie orară din sudul și nordul livingului	35
Figura 2.11. Variația temperaturii în sistemul HVAC în 31 ianuarie 2014	36
Figura 2.12. Variația concentrației de dioxid de carbon în condiții normale de funcționare.....	36
Figura 2.13. Variația concentrației de CO ₂ pe durata experimentului.....	37
Figura 2.14. Analiza consumului de energie pentru încălzire în perioada monitorizată.....	38
Figura 2.15. Numărul de ore de funcționare a rezistenței electrice în perioada monitorizată.....	39
Figura 2.16. Distribuția consumului de energie pentru Casa Laborator în perioada monitorizată.....	40
Figura 2.17. Energia produsă zilnic în perioada monitorizată.....	41
Figura 2.18. Radiația solară și puterea produsă de panourile PV pe 26 aprilie	41
Figura 2.19. Distribuția sursei de energie utilizată în Casa Laborator în perioada monitorizată.....	42
Figura 2.20. Variația temperaturii în sistemul HVAC în luna februarie	44
Figura 2.21. Energia termică câștigată de sistemul HVAC în luna februarie	45
Figura 2.22. Variația temperaturii în sistemul HVAC în lunile martie și aprilie	45
Figura 2.23. Câștigurile de energie termică oferite de sistemul HVAC în lunile martie și aprilie.....	46
Figura 2.24. Variația temperaturii în sistemul HVAC în luna mai.....	46
Figura 2.25. Variația sarcinilor termice ale sistemului HVAC în luna mai	47
Figura 2.26. Procentul de energie utilizat în vederea obținerii temperaturii interioare de confort.....	48
Figura 3.1. Fluxul general de date în interiorul unui model white–box	50
Figura 3.2. Interfața programului EnergyPlus.....	52
Figura 3.3. Detaliu privind calcularea necesarului de energie pentru încălzire și răcire utilizând PHPP	54
Figura 3.4. Interfața software-ului PVsyst și a modulului <i>Project Design</i>	55
Figura 3.5. Schița duplexului realizată în Google SketchUP (vedere sud–vest)	56

Figura 3.6. Temperatura exterioară orară caracteristică orașului București simulată în MeteoNorm.....	56
Figura 3.7. Variația temperaturii interioare în casa pasivă în cazul simulării fără sistem HVAC.....	57
Figura 3.8. Variația necesarului de energie pentru încălzire cu grosimea izolației pereților exteriori.....	59
Figura 3.9. Variația necesarului de energie pentru încălzire cu grosimea acoperișului	59
Figura 3.10. Variația necesarului de încălzire pentru încălzire cu grosimea izolației pardoselii.....	59
Figura 3.11. Comparație între radiația solară din București utilizând MeteoNorm (a) și PVsyst (b)	60
Figura 3.12. Alegerea orientării optime a panourilor PV pentru clima din București.....	61
Figura 3.13. Alegerea caracteristicilor de funcționare a sistemului PV	61
Figura 3.14. Distribuția producției și necesarului total de energie simulate pentru o orientare de 15° a panourilor PV	62
Figura 3.15. Diagrama pierderilor și distribuția de energie rezultate în urma simulării ipotezei 1.....	62
Figura 3.16. Diagrama pierderilor și distribuția de energie rezultate în urma simulării ipotezei 2	63
Figura 3.17. Diagrama pierderilor și distribuția de energie rezultate în urma modificării unghiului de înclinare a panourilor PV	63
Figura 4.1. Distribuția fluxului termic și a temperaturii printr-un perete omogen	66
Figura 4.2. Schema logică ce descrie procedeul de optimizare al modelului gray-box ...	72
Figura 4.3. Schema rețelei termice utilizate în modelul gray-box	73
Figura 4.4. Un ciclul de bază utilizat în funcționarea algoritmilor evoluționali	74
Figura 4.5. Acțiunile definitorii ale algoritmului genetic.....	76
Figura 4.6. Operația de încrucișare efectuată pe doi cromozomi	77
Figura 4.7. Efectuarea operației de mutație pe un cromozom binar	78
Figura 4.8. Diagrama modulului de prezicere a energie necesare într-o clădire	79
Figura 4.9. Rețeaua termică utilizată pentru a descrie clădirea analizată.....	80
Figura 4.10. Aplicarea operației de mutație pe două elemente alese aleatoriu în cadrul unui cromozom cu 5 elemente	86
Figura 4.11. Aplicarea operației de încrucișare între doi cromozomi pentru trei elemente.....	86
Figura 4.12. Interfața grafică a aplicației de estimare a consumului de energie pentru încălzirea/răcirea unei locuințe	87
Figura 4.13. Variațiile temperaturii exterioare și a radiației solare utilizate în modelul matematic gray-box.....	88
Figura 4.14. Energia consumată pentru încălzirea Casei Laborator în perioada monitorizată.....	89
Figura 4.15. Comparație între estimarea energetică a modelului matematic neoptimizat și datele reale, măsurate	89
Figura 4.16. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat utilizând un GA pe toată perioada testată (121 zile)	90
Figura 4.17. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 100 zile	90
Figura 4.18. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 30 zile.....	91
Figura 4.19. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 21 zile	91

Figura 4.20. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 14 zile	92
Figura 4.21. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 7 zile	92
Figura 4.22. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul în fiecare zi	93
Figura 4.23. Optimizarea modelului matematic utilizând 10 iterații și o probabilitate de mutație și încrucișare în interiorul unui cromozom de 70%, aplicate pe un număr de 100 de supraviețuitori.....	94
Figura 4.24. Eroarea relativă între modelul matematic optimizat și energia măsurată.....	95
Figura 4.25. Estimarea energiei consumate variind toți cei 20 de parametri și utilizând un număr de 7, 14 și respectiv 121 de zile în recalcularea Algoritmului Genetic.....	96
Figura 4.26. Comparație între datele măsurate și rezultatul algoritmului genetic cu o eroare absolută de 1kWh	97
Figura 4.27. Eroarea absolută zilnică pentru 1GA/zi și prag de eroare impus	98
Figura 4.28. Comparație între datele măsurate și cea mai mică eroare absolută în fiecare caz considerat.....	100
Figura 4.29. Comparație între datele măsurate și cel mai mic timp de convergență în fiecare caz considerat	101
Figura 4.30. Comparație între timpul de convergență, eroarea absolută și valorile parametrilor pentru o populație de 2000 de indivizi	101
Figura 4.31. Comparație între timpul de convergență, eroarea absolută și valorile parametrilor pentru o populație de 200 de indivizi	102
Figura A4.1. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul odată la 5 zile pentru un cromozom format din parametrii interiori.....	118
Figura A4.2. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul odată la 5 zile pentru un cromozom format din 20 de parametri, dar cu aplicarea operațiilor genetice pentru cei interiori.....	119
Figura A4.3. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul odată la 5 zile pentru un cromozom complet, format din 20 de parametri	119

CUPRINS TABELE

Tabel 1.1. Distribuția procentuală a consumului energetic pe sectoare în perioada 2011-2012	14
Tabel 1.2. Ierarhizarea opțiunilor de alimentare cu energie produsă din SR pentru o clădire.....	21
Tabel 2.1. Caracteristicile termo-fizice ale elementelor constructive	28
Tabel 2.2. Datele de funcționare ale panourilor fotovoltaice și invertorului	29
Tabel 2.3. Distribuția energiei consumate în perioada monitorizată.....	39
Tabel 2.4. Comparație între energia produsă și consumată.....	40
Tabel 3.1. Rezultatul simulării necesarului de energie pentru încălzire.....	57
Tabel 3.2. Comparație între necesarul de energie pentru răcire în cele două cazuri simulate.....	58
Tabel 4.1. Relațiile de calcul pentru elementele diferite de 0 ale matricei B	83
Tabel 4.2. Comparație între erorile generate de utilizarea tipurilor diferite de Algoritmi Genetici.....	93
Tabel 4.3. Comparație între rezultatele simulărilor utilizând cromozomul 3 în cadrul Algoritmului Genetic	96
Tabel 4.4. Influența operatorilor de încruzișare și mutație asupra numărului de iterații.....	99
Tabel 4.5. Valorile parametrilor AG pentru o populație de 2000 de cromozomi	99
Tabel 4.6. Valorile parametrilor AG pentru o populație de 200 de cromozomi	100
Tabel A3.1. Valorile inițiale, calculate, ale parametrilor ce formează zona interioară a rețelei termice echivalente	115
Tabel A3.2. Valorile inițiale, calculate, pentru parametrii ce formează anvelopa exterioară a clădirii.....	115
Tabel A3.3. Cele mai bune valori estimate pentru parametrii interiori utilizând modul de recalculare al Algoritmului Genetic cu un pas de timp de o zi	115
Tabel A5.1. Rezultatele analizei de sensibilitate aplicată pentru parametrii interiori ..	120
Tabel A5.2. Rezultatele analizei de sensibilitate aplicată pentru toți cei 20 de parametri ce compun rețeaua termică echivalentă a clădirii, prima rulare	121
Tabel A5.3. Rezultatele analizei de sensibilitate aplicată pentru toți cei 20 de parametri ce compun rețeaua termică echivalentă a clădirii, a doua rulare	122
Tabel A5.4. Rezultatele analizei de sensibilitate aplicată pentru toți cei 20 de parametri ce compun rețeaua termică echivalentă a clădirii, a doua rulare	123

INTRODUCERE

Impactul clădirilor asupra societății moderne este cunoscut atât prin capacitatea lor de a menține un confort interior superior, cât și prin ponderea ridicată în consumul total de energie pe teritoriul Uniunii Europene și nu numai. Din aceste considerente, în prezent sunt cercetate noi metode de a construi eficient din punct de vedere energetic, fără a altera climatul interior oferit de acestea. Clădirile reprezintă locul în care omul modern își petrece majoritatea timpului, funcționalitatea acestora trebuind să asigure, pe lângă un adăpost, îndeplinirea mai multor funcții esențiale: securitate, confort (termic, auditiv, sanitar), estetic, etc. Acestea pot fi întrunite prin efortul comun al mai multor domenii de cercetare: arhitectură, construcții și instalații, energetică, automatică, etc.

Eforturile Uniunii Europene de a reduce consumul de energie și emisiile gazelor cu efect de seră nu reprezintă o noutate, noile analize sugerând faptul că există un mare potențial de eficientizare energetică în sectorul clădirilor, a cărui exploatare poate asigura îndeplinirea obiectivelor „20–20–20”. În acest sens au fost create premisele unor noi domenii de cercetare, implementare și validare a conceptelor de clădiri cu un consum energetic aproape zero (nZEB), în vederea adoptării acestora ca standard național de către fiecare stat membru. Acest context oferă tezei de doctorat un caracter de actualitate, autorul realizând o analiză detaliată asupra modului de satisfacere a exigențelor cerute în vederea creșterii numărului de clădiri cu o eficiență energetică ridicată în România. Teza de doctorat propune un studiu care s-a dorit exhaustiv asupra domeniului clădirilor eficiente energetic, fiecare capitol tratând câte un aspect specific, de o importanță ridicată în literatura de specialitate. Lucrarea de doctorat prezintă o structură bazată pe cinci capitole, prin intermediul căror s-a analizat comportamentul unei clădiri construite conform Standardului Caselor Pasive, situată în campusul Universității POLITEHNICA din București.

CAPITOLUL 1 prezintă un studiu amănunțit asupra impactului energetic al clădirilor atât în cadrul Uniunii Europene cât și pe plan național, dar oferă și o privire de ansamblu asupra cadrului legislativ ce guvernează și stimulează implementarea clădirilor eficiente din punct de vedere energetic. Mai mult, în cadrul acestui capitol sunt centralizate metodele cele mai semnificative în vederea creșterii eficienței energetice în sectorul clădirilor, autorul prezentând o analiză exhaustivă asupra definițiilor clădirilor nZEB și inteligente.

CAPITOLUL 2 analizează comportamentul clădirii studiate în condițiile climatice din România pe perioada de încălzire. Plecând de la afirmația că o clădire pasivă este caracterizată de o reducere a consumului de energie aferent încălzirii spațiului de locuit cu până la 90% comparat cu o clădire standard, autorul dorește validarea acestor date pentru climatul local, utilizând sistemul de monitorizare și un sistem de control și execuție implementate în clădirea analizată. De asemenea, capitolul analizează și cantitatea de energie termică recuperată prin implementarea sistemului de încălzire, răcire și climatizare format din două schimbătoare de căldură ce prezintă rolul de a trata termic aerul proaspăt, reducând astfel sarcina energetică de vîrf. Studiul efectuat reprezintă cea mai detaliată analiză asupra unei clădiri pasive din România, acesta putând servi drept fundament în vederea construirii viitoarelor clădiri de acest gen.

În **CAPITOLUL 3** a fost realizat un studiu al tehnicilor actuale de simulare a necesarului de energie într-o clădire, abordând exclusiv metodele bazate pe modele pur fizice, sau modele *white-box*. Datorită complexității lor, aceste abordări ingineresci sunt implementate în cadrul unor programe de simulare complexe, alcătuite din multe elemente de intrare, și care facilitează simularea dinamicii termice a unei clădiri. Autorul a utilizat două programe dedicate în vederea estimării necesarului de energie pentru încălzire și răcire, dar și a energiei electrice

produse cu ajutorul sistemului de panouri fotovoltaice montat. Astfel, pentru analiza consumului energetic aferent încălzirii și răcirii spațiului, dar și a scenariilor de minimizare a acestora, a fost utilizat un instrument de simulare bazat pe linii de text, denumit EnergyPlus, dar și două programe complementare, ce facilitează crearea geometriei clădirii analizate. Cantitatea de energie produsă de sistemul format din panouri fotovoltaice, dar și posibilități de maximizare a acesteia, au fost analizate cu ajutorul software-ului dedicat PVsyst.

În **CAPITOLUL 4** este prezentat algoritmul implementat în vederea creării unui model matematic simplificat, ce poate estima cu o precizie crescută consumul de energie pentru încălzirea clădirii analizate. Spre deosebire de abordarea white–box, acest model hibrid, denumit *gray–box*, necesită foarte puține date de intrare, facilitând astfel implementarea într-o infrastructură complexă ce poate satisface funcționalitatea unei clădiri inteligente. Abordarea sugerată de autor utilizează o descriere succintă a componentelor clădirii, datele oferite de 3 senzori, și un algoritm bazat pe elemente de calcul evoluționist în vederea optimizării și reducerii diferenței între rezultatele modelului matematic pur și datele de consum măsurate.

CAPITOLUL 5 prezintă concluziile generale, contribuțiiile aduse de autor domeniului studiat, dar și perspectivele de cercetare oferite prin intermediul tezei de doctorat.

CAPITOLUL 1.

CONTEXT ȘI MOTIVAȚIE

Direct sau indirect, orice aspect al societății moderne necesită un consum energetic într-o formă sau alta. În ultimul secol cererea de energie pe plan mondial a înregistrat o creștere accelerată datorită dezvoltării industriale, creșterii populației pe glob dar și a nivelului de trai. În anul 2013 consumul mondial de energie a fost de aproximativ 12500 milioane tone petrol echivalent (Mtpc), înregistrând o creștere cu 2,3% față de anul precedent [1]. Este estimat faptul că până în 2040 consumul mondial de energie va crește cu peste 55% comparativ cu anul 2010 [2,3]. În Figura 1.1 este reprezentat trendul consumului energetic al ultimilor 10 ani. Se poate observa o scădere în jurul anului 2008, corespunzând declinului economic, dar, în decursul ultimului deceniu, consumul de energie global a înregistrat o creștere cu peste 25%. Țările membre ale Uniunii Europene (U.E.) au contribuit cu peste 1675 Mtpc la consumul mondial de energie primară (în 2013), înregistrând o ușoară scădere (0,3%) față de anul precedent, accentuând trendul descendant al ultimilor 8 ani [1,4].

Acest profil ascendent al consumului de energie primară are un cost aferent semnificativ. În anul 2010 cheltuielile cu energia au fost estimate la circa 10% din Produsul Intern Brut global, procent ce se regăsește și pe teritoriul Uniunii Europene [5], iar costul total s-a dublat în perioada 1990 – 2010 (de la 2700 la 6400 mld. \$).

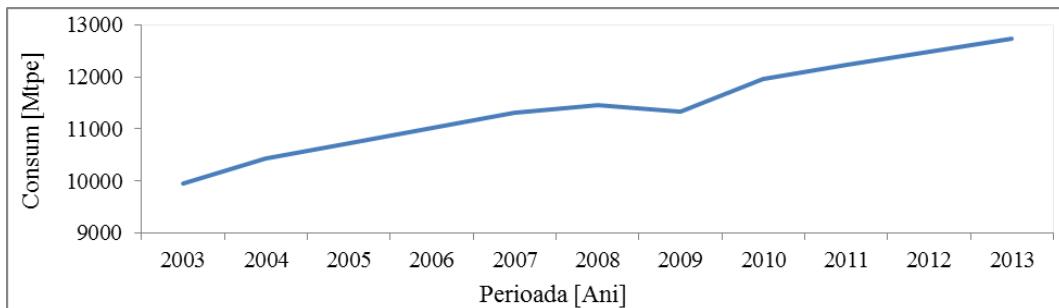


Figura 1.1. Trendul consumului mondial de energie primară între 2003 și 2013 [1]

Preconizările pentru perioada 2010-2040 au indicat faptul că principala sursă energetică utilizată pentru a satisface cererea mare de energie va fi formată tot din combustibili fosili, chiar dacă ponderea acestora va înregistra o scădere (de la 84% - 2011 la 75% - 2040) [3,6] (Figura 1.2), datorată în principal caracterului finit al acestora și a creșterii continue a prețurilor.

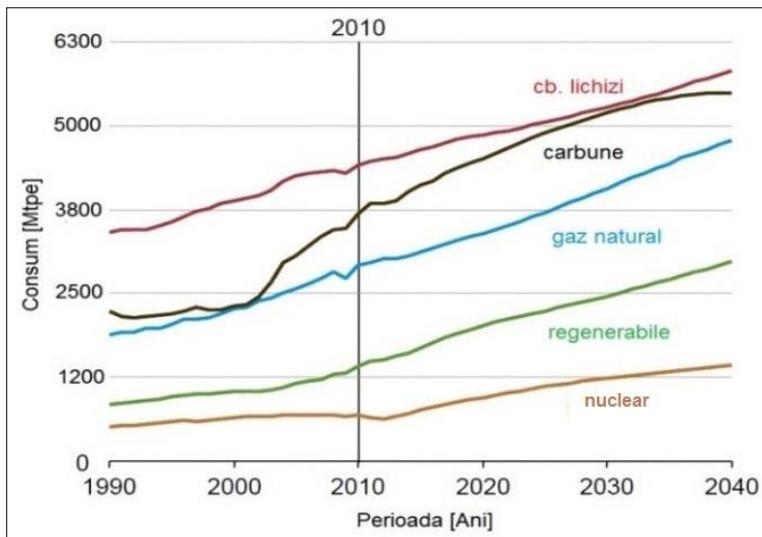


Figura 1.2. Prognoza consumului mondial de energie în funcție de tipul combustibilului [3]

Datorită caracterului finit al combustibililor fosili, al prețului în continuă creștere și a problemelor aduse mediului înconjurător, tendința generală este de a reduce dependența de această sursă energetică, prin reducerea consumului de energie la utilizatorul final și creșterea ponderii surselor regenerabile în producția totală de energie.

1.1. DISTRIBUȚIA CONSUMULUI ENERGETIC ÎN SECTORUL CLĂDIRILOR

Distribuția consumului energetic al fiecărei țări este influențată de gradul de industrializare, de nivelul de trai și de resursele naturale existente. Cea mai mare pondere în consumul total de energie, atât pe teritoriul Uniunii Europene cât și în România, o are fondul clădirilor, compus din sectorul rezidențial și terțiar. În Tabelul 1.1. este prezentată o comparație între distribuția consumului energetic în cadrul UE și cea din România.

Tabel 1.1. Distribuția procentuală a consumului energetic pe sectoare în perioada 2011-2012 [3,7]

Sector Zona	Clădiri	Transport	Industrie	Altele
Uniunea Europeană	39,90%	31,69%	25,30%	3,11%
Romania	44,42%	22,26%	30,63%	2,69%

Sectorul clădirilor reprezintă un consumator energetic cheie, atât pe plan mondial cât și European. Pe teritoriul UE are o valoare medie de 40% din consumul total de energie primară, reprezentând aproximativ 55% din totalul energiei electrice consumate, crescând în medie cu aproximativ 1% în fiecare an începând cu 1990. Totodată, reprezintă un factor important în emisia gazelor cu efect de seră (GES) cu un procent estimat la 35% din total [8, 9, 10]. Sectorul clădirilor este în continuă expansiune, estimându-se că până în 2050 numărul total de clădiri pe teritoriul U.E. va crește cu peste 25% [11], ceea ce se va reflecta în creșterea consumului energetic în acest sector, chiar și în ipoteza utilizării acelorași strategii de operare. Consumul anual de energie raportat la unitatea de suprafață pentru clădirile din cadrul UE a fost estimat ca fiind în medie 220 kWh/m² (în anul 2009), cu o diferență considerabilă între sectorul rezidențial (200 kWh/m²) și cel terțiar (300 kWh/m²) [7].

Gazul natural reprezintă sursa energetică dominantă utilizată în clădirile rezidențiale din UE, înregistrând în 2011 un procent de 36%, crescând de la 31% în anul de referință 1990. Energia electrică ocupă locul 2, înregistrând o creștere de 6% în perioada 1990-2011, în timp ce cărbunele și petrolul au înregistrat cea mai mare scădere de 9, respectiv 7%. Biomasa a înregistrat o creștere de 5%, în timp ce ponderea de cărbune a suferit o scădere majoră de la 11% în 1990 la aproximativ 4% în 2011. Deși energia termică provenită de la sistemul de termoficare are o pondere relativ scăzută (7% în 2011), aceasta reprezintă principala sursă în multe state de pe teritoriul Uniunii Europene [9].

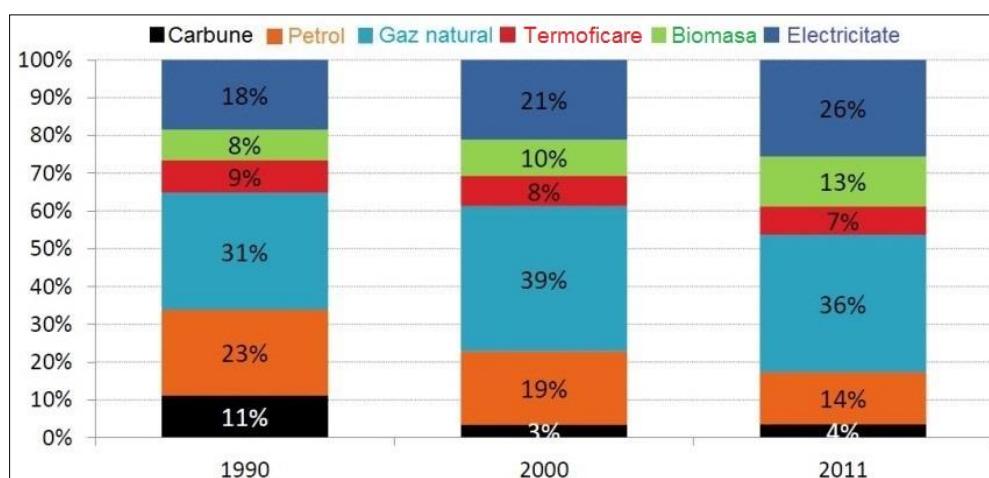


Figura 1.3. Distribuția consumului energetic al UE în clădiri în funcție de sursa de energie [9]

Într-o clădire tip de pe teritoriul Uniunii consumul energetic este împărțit după cum urmează: încălzirea și răcirea spațiului de locuit, încălzirea apei calde menajere, gătit, electrocasnice și iluminat. Conform estimărilor, în 2011, cea mai mare cantitate de energie a fost utilizată în vederea climatizării spațiului interior (65%), urmând energia necesară preparării apei calde menajere (14%) și consumul datorat operării electrocasnicelor (12%) [7].

În România sectorul clădirilor este compus dintr-un număr de peste 5 milioane de unități, dintre care peste 99% sunt clădiri rezidențiale [12]. Începând cu perioada 2009–2010, acest sector a devenit cel mai important consumator de energie primară din România, contribuind cu aproximativ 44% din total, devansând sectoarele industrial și transport [4]. Distribuția consumului energetic din Romania este detaliată în Figura 1.4.

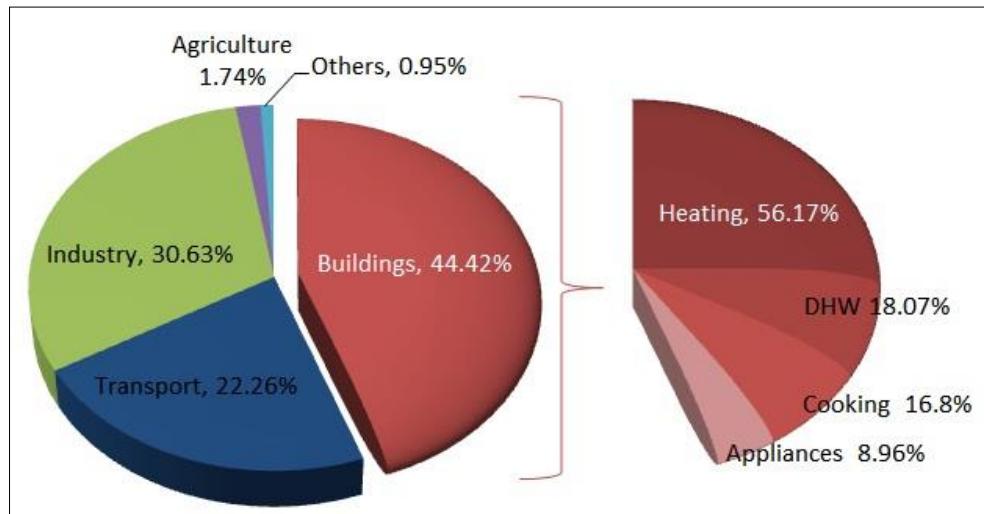


Figura 1.4. Structura consumului de energie pe sectoare și distribuția consumului din clădiri pe activități [13,14]

România are un patrimoniu important de clădiri realizate înainte de anul 1989 (aproximativ 90%) cu un grad de izolare termică redus, în timp ce doar 6% au fost construite ulterior anului 2000 [15,16]. Acest lucru implică o eficiență relativ scăzută, clădirile tip din România fiind caracterizate de un consum anual cuprins între 150 și 400 kWh/m², din care, peste 50% datorat încălzirii spațiului de locuit [16,17]. Consumul specific de energie pentru o clădire are o medie apropiată de valoarea înregistrată pe teritoriul UE, estimată la 230 kWh/m², variind foarte mult în funcție de timpul clădirii și de sistemul de încălzire [7].

Pentru sectorul rezidențial, tipul construcției (bloc de locuințe sau casă individuală) cât și sistemul de încălzire influențează consumul specific anual de energie. Astfel, pentru un apartament consumul specific anual variază între 270 și 340 kWh/m²/an, în timp ce pentru o casă individuală consumul are valori ce variază între 296 kWh/m²/an și 412 kWh/m²/an [14]. Mai mult de jumătate este utilizată pentru încălzirea, răcirea și ventilarea spațiului de locuit, observându-se un potențial mărit de eficientizare energetică, prin îmbunătățirea sistemului HVAC (Heating Ventilating and Air Conditioning System) sau optimizarea modului de operare.

1.2. CONTEXTUL LEGISLATIV ȘI REGLEMENTĂRILE DIN DOMENIU

Energia este un element esențial al dezvoltării Uniunii Europene, dar în același timp, sectorul energetic reprezintă o provocare în vederea reducerii impactului asupra mediului înconjurător și a dependenței față de importurile de energie primară. Caracterul finit al combustibililor fosili, cât și rata accelerată de epuizare a acestora, implică o creștere semnificativă a prețurilor. Astfel, în ipoteza creșterii prețului petrolului la 100 USD/baril, importul de energie în UE ar costa circa 170 mld. Euro. Strategia Energetică Europeană pentru perioada 2007-2020 are un obiectiv general bine stabilit, și anume: „satisfacerea necesarului

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

de energie atât în prezent cât și pe termen mediu și lung, la un preț cât mai scăzut, adecvat unei economii moderne de piață și unui standard de viață civilizat, în condiții de calitate, siguranță în alimentare, cu respectarea principiilor dezvoltării durabile” [18].

Începând cu 2007 Politica UE în domeniul energiei se bazează pe 3 obiective fundamentale, pentru care au fost propuse pachete separate de reformă legislativă:

- Durabilitate;
- Competitivitate;
- Siguranță în alimentarea cu energie.

În ceea ce privește dezvoltarea durabilă, sectorul energetic este principalul producător de gaze cu efect de seră, estimând-se faptul că până în 2030 concentrația de CO₂ din atmosferă va crește cu circa 5% pe teritoriul UE, și cu 55% la nivel global, în condițiile menținerii aceluiși grad de consum energetic. Pentru a contracara aceste efecte, Comisia Europeană a adoptat în decembrie 2008 Pachetul „Energie–Schimbări Climatice”, o anexă la pachetul legislativ „Durabilitate”, în care sunt stipulate o serie de obiective pentru anul 2020. Prin intermediul acestora UE își propune reducerea gazelor cu efect de sera cu cel puțin 20% (față de anul de referință 1990), creșterea cu 20% a ponderii surselor regenerabile în totalul consumului energetic pe teritoriul UE și reducerea cu 20% a consumului de energie primară (față de nivelul la care ar fi ajuns în lipsa acestor măsuri), obținută prin îmbunătățirea eficienței energetice în sectoarele vizate. Acest ultim obiectiv se traduce prin reducerea a circa 379 Mtpe comparat cu valorile în ipoteza neluării măsurilor de eficientizare energetică [19].

În urma auditului din 2011[20] au fost stabilite ținte mai îndrăznețe pentru anul 2050. Astfel, pentru a menține creșterea de temperatură medie globală la o valoare mai mică de 2 °C, Consiliul European a stabilit un nou prag de atins privind reducerea emisiilor gazelor cu efect de seră: 85-90% în perioada 2007-2050 (comparat cu nivelul din 1990). Aceste procente se pot obține doar printr-o strategie bine pusă la punct care vizează toate sectoarele energetice.

Sectorul clădirilor este responsabil în medie cu aproximativ 40% din totalul energiei primare consumate pe teritoriul UE, observându-se astfel un potențial mare de eficientizare. În noul plan de eficientizare energetică al Comisiei Europene din anul 2011, se stipulează faptul că sectorul clădirilor are cel mai ridicat potențial de reducere a consumurilor energetice, urmat de cel al transporturilor. Potențialul tehnic de eficientizare energetică este de 30% pentru sectorul rezidențial și de 25 % pentru cel terțiar [19].

În România, Strategia Energetică [18] atribuie sectorului clădirilor un potențial de eficientizare cuprins între 13 și 50% (13–19% pentru sectorul terțiar și 35 – 50% pentru cel rezidențial).

1.2.1. Directivele privind performanța energetică a clădirilor (EPBD)

Pentru creșterea eficienței energetice în sectorului clădirilor și implicit a reducerii impactului acestora asupra mediului, Consiliul European și Parlamentul European a emis în decembrie 2002, *Directiva privind performanța energetică a clădirilor* (Energy Performances of Buildings Directive–EPBD) – Directiva 2002/91/CE. Obiectivul principal al acestei Directive a fost acela de a promova creșterea performanțelor energetice în sectorul clădirilor sub rezerva unei abordări integrate, astfel încât numai măsurile eficiente din punct de vedere economic să fie implementate [21].

Durata de viață a unei clădiri este în general mare, fiind cuprinsă în medie între 50 și 100 de ani. Plecând de la acest fapt, s-a constatat că cel mai mare potențial de îmbunătățire pe termen scurt și mediu îl are fondul de clădiri existente, asupra căruia au fost aplicate o serie de strategii în vederea eficientizării energetice. Astfel, în cadrul Directivei 91, se cerea statelor membre să alcătuiască un *cadru general* pentru o metodologie comună de calcul a performanțelor energetice ale clădirilor, să aplique *standarde minime* de performanță energetică pentru clădirile noi și existente (cu o suprafață mai mare de 1000 m²) atunci când sunt renovate, să aplique

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică scheme de certificare energetică pentru întreg fondul de clădiri (noi sau existente) și să întreprindă inspecții și revizii asupra cazanelor și a instalațiilor de răcire/încălzire [22].

Reformarea din mai 2010 (Directiva 2010/31/UE emisă de Parlamentul European și de Consiliul European) a venit cu propuneri mai îndrăznețe în vederea realizării obiectivelor „20–20–20”, vizând exploatarea potențialului mărit, nevalorificat prin precedentele legi, al economisirii energiei în sectorul clădirilor. Aceasta promovează creșterea eficienței energetice a clădirilor în cadrul Uniunii, ținând cont de condițiile climatice locale, climatul interior și raportul cost–eficiență. Se menționează faptul că pentru a reduce dependența energetică a Uniunii și a emisiilor gazelor cu efect de seră este obligatorie reducerea consumului de energie în sectorul clădirilor, dar și creșterea ponderii utilizării surselor regenerabile. În vederea atingerii a două din cele trei obiective stipulate în pachetul „Energie – Schimbări Climatice”, Directiva stabilește obiective naționale obligatorii de reducere a emisiilor de dioxid de carbon, pentru care eficiența energetică în sectorul construcțiilor va fi esențială.

Sunt vizate clădirile existente, pentru care, fiecare stat membru este obligat să ia măsurile necesare pentru a se asigura că performanțele energetice a unei clădiri renovate (sau a părții de clădire care a făcut obiectul renovării) să fie în conformitate cu cerințele minime de performanță energetică stabilite în prealabil prin legislația internă [23].

De asemenea, un punct important din cadrul Directivei îl constituie trasarea obiectivelor privind creșterea numărului de „clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero—nearly Zero Energy Buildings (nZEB)”. Acest lucru se va realiza prin obligativitatea statelor membre de a elabora planuri naționale în care să includă propria definiție și limite energetice care vor trebui respectate în vederea realizării noilor construcții, dar și în cazul renovării clădirilor existente. În articolul 2 al reformei EPBD, este oferită o definiție de referință a nZEB: „[...] o clădire cu o performanță energetică foarte ridicată, [...]. Necessarul de energie aproape egal cu zero sau foarte scăzut ar trebui să fie acoperit, într-o foarte mare măsură, cu energie din surse regenerabile, inclusiv cu energie din surse regenerabile produsă la fața locului sau în apropiere;” [23].

După transpunerea cerințelor din Directivă în legislație națională (9 iulie 2013) și implicit adaptarea conceptului de către fiecare stat în parte, acesta trebuie pusă în aplicare începând cu 2019 pentru clădirile publice și din 2021 pentru toate clădirile noi construite [11].

Planurile naționale de reducere a energiei consumate în sectorul clădirilor vor trebui să conțină următoarele puncte esențiale:

- informații privind politicile și măsurile financiare pentru promovarea clădirilor cu consum de energie aproape zero;
- măsurile naționale referitoare la utilizarea energiei din surse regenerabile în clădirile noi și în clădirile care fac obiectul unor renovări majore;
- obiective intermediare privind îmbunătățirea performanțelor energetice în clădirile noi;
- stabilirea unui indicator numeric măsurat în kWh/m²/an, utilizat pentru stabilirea consumului de energie primară.

Totodată, Directiva introduce un nou concept: „nivel optim din punct de vedere al costurilor”, reprezentând nivelul de performanță energetică care determină cel mai redus cost pe durata normală de funcționare rămasă unei clădiri sau a unor elemente de clădire, rezultat obținut în urma analizei cost-beneficiu.

De asemenea, Decizia nr. 406/2009/CE a Parlamentului European și a Consiliului stabilește obiective naționale obligatorii ce trebuie aplicate în vederea reducerii emisiilor de dioxid de carbon, fiind stipulat faptul că, pentru aceasta, eficiența energetică în sectorul clădirilor va fi esențială [24]. Directiva 2009/28/CE a Parlamentului European și a Consiliului încurajează promovarea utilizării energiei din surse regenerabile în vederea minimizării consumului de energie primară în sectorul clădirilor, întărind ideea că procentul de utilizare a

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică surselor regenerabile în consumul total de energie pe teritoriul UE trebuie să atingă valoarea de 20%.

1.2.2. Reglementări naționale privind eficiența energetică în clădiri

Începând cu anul aderării României la Uniunea Europeană (1 ianuarie 2007) au fost adoptate o serie de reglementări naționale privind eficienței energetice în sectorul clădirilor, aliniate la legislația europeană.

Un prim pas în acest sens, a fost intrarea în vigoare a Ordinului nr. 157/2007 pentru aprobarea reglementărilor tehnice în vederea stabilirii unei metodologii de calcul al performanțelor energetice a clădirilor, fiind actualizată în data de 04.09.2013. Metodologia de calcul este structurată pe trei părți, fiecare tratând o arie de interes diferită, după cum urmează: partea I – *anvelopa clădirii*, partea II – *performanța energetică a instalațiilor din clădiri*, partea III – *auditul și certificatul de performanță a clădirii*. În 2009, prin ordinul 1071/2009 a fost introdusă și o a patra parte, în care este detaliat un *breviar de calcul al performanței energetice a clădirilor și apartamentelor* [25].

Alte reglementări și modificări privind metodologia de calcul al performanței energetice a clădirilor, adoptate după aderarea României la UE, sunt [26]:

Ordinul nr.3466/2013 privind inventarierea clădirilor încălzite și/sau răcite, deținute și ocupate de administrația publică centrală, și punerea inventarului la dispoziția publicului, precum și constituirea unor bănci de date specifice privind eficiența energetică (publicat: 13-12-2013);

Ordinul nr.3152/2013 pentru aprobarea Procedurii de control al statului cu privire la aplicarea unitară a prevederilor legale privind performanța energetică a clădirilor și inspecția sistemelor de încălzire/climatizare - indicativ PCC 001-2013 (publicat: 21-10-2013);

Legea nr.159/2013 pentru modificarea și completarea Legii nr. 372/2005 privind performanța energetică a clădirilor (publicată: 23-05-2013);

Ordinul nr.691/08.10.2007 pentru aprobarea Normelor metodologice privind performanța energetică a clădirilor (publicat: 04-11-2010);

Ordinul nr.1071/16.12.2009 privind modificarea și completarea Ordinului ministrului transporturilor, construcțiilor și turismului nr. 157/2007 pentru aprobarea reglementării tehnice Metodologie de calcul al performanței energetice a clădirilor.

În vederea alinierii la cerințele UE din Directiva 2010/31/UE a fost efectuată o cercetare referitoare la *cadrul metodologic de calcul al nivelurilor de cost optim al cerințelor minime de performanță energetică pentru clădiri și elemente de anvelopă al acestora* [27]. Prin acest raport final s-a realizat un studiu amănunțit în vederea identificării clădirilor de referință, identificării și analizării metodelor optime (în regim dinamic) al performanțelor energetice a clădirilor și calculării costului optimal atât pentru clădirile noi cât și pentru cele existente. Totodată, este prezentată și o analiză privind alegerea soluțiilor optime de reabilitare a fondului de clădiri existente, pentru care a fost simulat dinamic un consum specific de energie termică finală, cuprins între 224,09 kWh/m²/an (clădiri colective de tip bloc de locuințe) și 947,36 kWh/m²/an (clădiri unifamiliale, încălzire cu sobă), accentuându-se astfel importanța reabilitării energetice a acestor clădiri de referință. Astfel, prin adoptarea a două măsuri de eficientizare energetică (modernizarea sistemului de cogenerare și înlocuirea sobelor cu centrale pe lemn) se estimează o reducere cu 3487 mtpe, valoare superioară celei angajate de România (2453 mtpe).

În iulie 2014 Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice a publicat *Planul de creștere a numărului de clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero*, variantă revizuită și actualizată a primei ediții, publicate în octombrie 2013 [16]. În studiu sunt prezentate câteva metode de implementat în vederea reducerii energiei consumate în sectorul

clădirilor, ținându-se seama atât de restricțiile legislative din România cu privire la implementarea sistemelor de producere a energiei din surse regenerabile, cât și de satisfacerea cerințelor minime din punct de vedere economic. Astfel, sunt prezentate o serie de variante constructive urmărind eficientizarea energetică a clădirilor (mărirea izolației termice, montarea ferestrelor, sursa de alimentare cu energie, etc), ținându-se cont și de zona climatică în care va fi amplasată clădirea respectivă, dar și de scopul în care aceasta va fi utilizată. Totodată, este propusă și o schemă logică a metodologiei de validare a unei clădiri de tip nZEB, bazată pe trei module de calcul principale, printre care și o evaluare a duratei de recuperare a costurilor de investiții prin raportarea la clădirea de referință. Pe baza analizei efectuate, s-a constat că, în funcție de tipul clădirii, domeniul de cost optim este cuprins între 62 și 230 kWh/m²/an, iar valoarea maxim admisă în vederea certificării clădirii ca fiind nZEB este cuprinsă între 57 și 111 kWh/m²/an.

1.3. METODE DE CREȘTERE A EFICIENȚEI ENERGETICE ÎN SECTORUL CLĂDIRILOR—DEFINIȚII

1.3.1. Clădiri cu consum aproape zero de energie (nZEB)

Înțînd cont de varietatea bogată a culturii clădirilor și a climei pe teritoriul Uniunii, Directiva EPBD nu schițează o abordare uniformă, oferind doar o definiție generală a conceptului, dar impune statelor membre transpunerea propriilor definiții în planuri naționale. Acestea vor include o adaptare a conceptului nZEB, ținând cont de condițiile climatice naționale sau regionale, o metodologie de estimare a consumului energetic al clădirilor, și un set de practici aplicabile din punct de vedere tehnic, funcțional și economic în vederea creșterii numărului nZEB.

O gamă largă de termeni și descrieri sunt folosite în discuțiile despre clădiri cu un consum energetic aproape zero. Definirea conceptuală a clădirii „zero energie” a fost utilizată încă de la stabilirea și negocierea Directivei 31/2010: „*consumul net-zero de energie este asociat unei clădiri, care, ca urmare a unei eficiențe energetice foarte ridicate, are consumul anual de energie primară egal sau mai mic decât energia produsă din sursele regenerabile disponibile la fața locului*” [28]. Conceptual, o clădire „Net Zero Energy Building – NZEB” este aceea care, printr-o maximizare a eficienței energetice, are un necesar de energie atât de redus, încât poate fi acoperit în totalitate de energia produsă din surse regenerabile la fața locului sau în apropiere.

Astfel, pentru a atinge în practică o asemenea performanță, clădirea trebuie conectată la una sau mai multe infrastructuri energetice: rețeaua electrică, sistem centralizat de încălzire/răcire, rețeaua de distribuție a gazului natural, rețele de distribuție a biomasei sau a biocombustibililor, etc. În perioada în care producția de energie a clădirii este mai mare decât propriul necesar, excesul de electricitate sau energie termică este exportat în rețeaua la care este racordată. În acest mod, excesul de energie produsă din sursele regenerabile, poate compensa utilizarea energiei produsă din combustibili fosili, atingându-se un echilibru. Obținerea unei NZEB fără conexiune la rețea este foarte greu de realizat, dacă nu imposibil, deoarece generația actuală a tehnologiilor de stocare a energiei este limitată și scumpă, implicând o supradimensionare a sistemului de producție pentru a asigura independența și în momente nefavorabile din punct de vedere climatic.

Bazându-se pe acest lucru, Jeans Lausten [29] a emis următoarea definiție: ”*clădirea cu consum net zero de energie este aceea care, pe durata unui an întreg este neutră, însemnând faptul că livrează în rețea aceeași cantitate de energie pe care o consumă*”, accentuând necesitatea racordării clădirii la un sistem de distribuție a energiei.

O bună definire a conceptului ar trebui în primul rând să încurajeze eficiența energetică, și mai apoi să stabilească cerințele pentru producerea energiei din surse regenerabile. În cadrul definiției trebuie determinate precis limitele proiectului în vederea estimării potențialului

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

energetic din surse regenerabile al amplasamentului. Aceste limite pot fi substanțial mai mari decât amprenta clădirii, dar în mod general aceasta este singura suprafață de care poate beneficia clădirea pe tot parcursul ciclului de viață, în vederea producerii energiei proprii.

Torcellini et al [30] a realizat un studiu sub egida Laboratorului Național al Energiei Regenerabile (National Renewable Energy Laboratory), prin care a emis următoarele principii generale în vederea definirii clădirilor zero energie:

Net Zero Site Energy Building („site”) – produce cel puțin atât de multă energie pe cât consumă pe durata unui an calendaristic. Acest tip de clădire generează cantitatea de energie și apă caldă necesare prin sisteme fotovoltaice și solare montate pe acoperiș. Amplasarea sistemelor de producție energetică se poate extinde și la împrejurimile clădirii (de exemplu o parcare), unde se pot folosi și alte tipuri de surse regenerabile, în funcție de amplasament (mini-turbină eoliană, mini-hidro turbină, etc.). Acest tip de NZEB oferă cea mai consistentă definiție, asupra ei exercitând-se cele mai puține fluctuații externe (prețul energiei nu este luat în considerare).

Net Zero Source Energy Building („sursă”) – produce cel puțin atât de multă energie pe cât consumă, măsurată la sursă, pe durata unui an calendaristic. Energia-sursă se referă la energia primară totală utilizată pentru a extrage, genera și distribui energie la locul de amplasament al clădirii. Pentru a realiza calculul energiei-sursă totale pentru o clădire, energia importată și exportată este multiplicată cu factori de conversie. Energia-sursă pentru electricitatea obținută din centrale hidro, energie solară și vânt se presupune a fi egală cu electricitatea produsă la sursă [31].

Net Zero Energy Cost Building („cost”) – primește cel puțin același beneficiu financiar pentru energia exportată, pe cât plătește pentru energia importată. Datorită fluctuației considerabile a prețului energiei, obținerea unui astfel de tip de clădire este incertă. Prețul primit pe energia exportată trebuie să compenseze costurile aferente cu energia, distribuția, cererea de vârf și diferite taxe impuse, atât pentru energia electrică cât și pentru gazul natural (când este folosit). Acest lucru duce la o supra-dimensionare a sistemului de producție și implicit la un cost inițial ridicat.

Net Zero Energy Emissions Building („emisii”) – produce cel puțin la fel de multă energie „verde” (fără emisii de GES) pe cât consumă din surse convenționale (generatoare de emisii). În cazul în care o clădire 100% electrică își obține energia necesară din surse regenerabile de energie (hidro, solar, eolian) amplasate în afara perimetrlui clădirii, aceasta este considerată „clădire zero emisii”, fără a fi nevoie să producă energie pe amplasament pentru a compensa emisiile. Cu toate acestea, în cazul în care aceeași clădire va consuma gaz natural (pentru încălzire spre exemplu), este necesar să producă și să expore suficientă energie „verde” produsă cu surse regenerabile amplasate la fața locului. Obținerea unei astfel de clădiri, este puternic influențată de tipul energiei-sursă la care este racordată. Astfel, o clădire amplasată într-o regiune unde se utilizează preponderent sursa hidro sau nucleară în producerea energiei electrice, va avea nevoie de un sistem de producție propriu mult mai mic decât în cazul în care clădirea se situează într-o zonă ce utilizează o sursă poluantă de energie (centrale pe cărbune).

Plecând de la sistemul de definiții al NZEB prezentat anterior, în anul 2010 a fost realizat un nou studiu în vederea realizării unei clasificări ale NZEB, ținând cont de sistemul de producție al energiei din surse regenerabile și de disponibilitatea acestora în locul de amplasare al clădirii. [32]. În tabelul următor este prezentată o ierarhizare a opțiunilor de alimentare cu energie produsa din surse regenerabile aplicabile pentru o NZEB.

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

Tabel 1.2. Ierarhizarea opțiunilor de alimentare cu energie produsă din SR pentru o clădire [30,32]

Numărul opțiunii	Opțiuni de alimentare cu energie	Exemple
0	Reducerea necesarului de energie prin eficientizarea energetică a clădirii	Iluminat natural, izolație superioară, încălzire solară, sistem HVAC foarte eficient, ventilație naturală, pompe de căldura, răcire cu apă din ocean, etc.
Opțiuni de alimentare la fața locului („On-Site”)		
1	Utilizarea surselor regenerabile de energie disponibile în cadrul amprentei clădirii și conectate la sistemul distribuit de energie (electrică și/sau termică)	Sisteme PV, sisteme solare-a.c.m., sisteme eoliene amplasate pe clădire
2	Utilizarea resurselor regenerabile de energie disponibile în locuri adiacente clădirii și conectate la sistemul distribuit de energie (electrică și/sau termică)	Sistem PV, sistem solar-a.c.m., turbină hidroelectrică și sisteme eoliene amplasate în spații adiacente (dar nu montate fizic pe clădire)
Opțiuni de alimentare „Off-Site”		
3	Utilizarea surselor de energie regenerabile „off-site” pentru a genera energie la fața locului și conectate la sistemul distribuit de energie (electrică și/sau termică) al clădirii	Biomasa, bio-diesel ce pot fi importate sau adunate din afara perimetrelui clădirii, utilizate apoi în producția de energie
4	Achiziționarea de energie sau de certificate „verzi” de la producătorii de energie din surse regenerabile	Achiziția de energie de la ferme eoliene, sau sisteme PV de mare putere. Achiziția creditelor de emisii de la companiile producătoare

Plecând de la această ierarhizare și de la studiul anterior, a fost implementat un sistem de clasificare a clădirilor cu consum net zero de energie: NZEB:A, NZEB:B, NZEB:C, NZEB:D, în funcție de opțiunea de alimentare și criteriile îndeplinite.

Clădiri clasificate drept NZEB:A

Acest tip de clădiri își satisfac necesarul redus de energie (datorat eficientizării energetice) prin utilizarea sistemelor de energie regenerabilă amplasate la fața locului (pe clădire). Acestea se pot încadra în categoria „site”.

Clădiri clasificate drept NZEB:B

Această clădire își satisfac necesarul energetic prin sisteme regenerabile situate atât în cadrul clădirii cât și în proximitate. Aceste clădiri se pot încadra în tipul „site”, dar sunt întâmpinate greutăți în a le extrapola către celelalte trei definiții („sursă”, „cost”, „emisii”), în principal datorită diferenței mari între factorii de conversie a energiei utilizate din surse convenționale și cei ai energiei din surse regenerabile.

Clădiri clasificate drept NZEB:C

Acstea clădiri utilizează strategiile descrise pentru NZEB:A și/sau NZEB:B, în măsura în care este fezabil. Acestea se pot încadra în următoarele tipuri: „site”, „sursă” și „emisii”. Acest tip de clădire nu poate fi încadrat și în categoria „cost”, în principal datorită faptului că opțiunea 3 de alimentare implică achiziționarea energiei produse cu ajutorul surselor regenerabile, compensarea făcând-se foarte greu.

Clădiri clasificate drept NZEB:D

Utilizează definițiile descrise anterior (o combinație între două sau toate) și pot utiliza și opțiunea 4 de alimentare cu energie regenerabilă. Astfel, odată epuizate toate măsurile de eficientizare și alimentare cu energie din surse regenerabile, se poate opta pentru achiziționarea de energie de la producători externi, sau achiziționarea creditelor de emisii în vederea obținerii NZEB. Acest tip de clădire se poate încadra în următoarele tipologii: „sursă” și „emisii”, dacă

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică achiziționează suficientă energie regenerabilă și au factori de sursă și emisie favorabili. Nu se poate încadra însă în tipurile „site” și „cost”.

1.3.2. Clădiri inteligente

În filosofie termenul de *inteligentă* descrie posesia facultăților intelectuale, rezultând capacitatea de a percepe și înțelege realitatea înconjurătoare, urmând a putea aplica cunoștințele dobândite prin procese de raționament. Etimologic, cuvântul își are originea în filosofia latină (*intelligentia*), ce se referă la posibilitatea de a alege între două adevăruri (*inter*-între și *leger*-a alege).

Inteligenta artificială (IA) este domeniul de cercetare ce încearcă, prin emularea proceselor ce caracterizează ființe vii, să atribuie unor sisteme mecanice capacitatea de a efectua funcții similare cu cele caracterizate de comportamentul uman [33]. IA a fost utilizată pentru a imita capacitatea umană de a procesa informația prin mecanisme de învățare, deducere și luare de decizii optime bazate pe experiențe anterioare. Începând cu anii 80, termeni ca ”intelligent” sau ”deștept” (smart) au fost din ce în ce mai utilizați în vederea descrierii unei clădiri. Conceptul de *clădire intelligentă* a venit ca un răspuns la cererile din ce în ce mai sofisticate ale locuitorilor privind confortul interior și preocupările autoritaților privind reducerea consumului de energie și implicit a emisiilor gazelor cu efect de seră. Majoritatea exemplelor timpurii de clădiri considerate inteligente erau definite de simpla înglobare a tehnologiilor de comunicare (unități centrale de procesare, controlere programabile), ce au cunoscut o rapidă dezvoltare după criza petrolului din 1973 [34]. În general, tehnologia necesară a fi implementată în vederea obținerii unei clădiri inteligente are următoarele componente: Sistemul de Automatizare al Clădirii (SAC), Sistemul de Telecomunicații (ST) și Sistem de Management al Clădirii (SMC) [34].

Prima clădire ce a fost considerată ca fiind intelligentă, City Palace, a fost dată spre exploatare în 1984, fiind construită în Hartford, Connecticut, USA. Clădirea de birouri, înaltă de 38 de etaje, avea în componență un sistem de servicii integrat interconectat cu clădirea prin intermediul cablurilor de fibră optică. Clădirea a fost comparată cu sistemul nervos uman, ea fiind punctul de legătură între ”sistemul respirator” (sistemul de ventilație), ”sistemul circulator” (lifturile) și ”simțurile” (senzorii și sistemul de securitate) [33].

În literatura de specialitate [33,35] sunt prezentate nu mai puțin de 30 de definiții ale inteligenței atribuite clădirilor. Definițiile timpurii erau preponderent direcționate către aspectele tehnologice și nu sugerau interacțiunea ocupant-clădire. În anul 1983, Cardin oferea prima definiție asupra clădirilor inteligente, susținând faptul că aceasta trebuie să fie caracterizată [...] de un sistem de control complet automat. În 1988 Institutul Clădirilor Inteligente din Washington definea clădirea intelligentă drept [...] o clădire ce integrează sisteme variate de gestionare a resursele, cu scopul de a maximiza performanțele tehnice și flexibilitatea și a minimiza investițiile și costurile de operare [...] [citat în 36]. În publicații mai recente [35, 37, 38] este accentuată ideea că o clădire intelligentă trebuie să răspundă cerințelor și nevoilor utilizatorilor, ca rezultat al studiilor efectuate asupra productivității angajaților în funcție de confortul interior din clădire.

Cele mai recente definiții [33,39] adaugă comparația dintre funcționalitatea corpului uman și clădire, accentuând necesitatea de implementare a *abilității de învățare* și de a-și *ajusta performanțele în funcție de ocupanți și climat*. Plecând de la aceste premise, o clădire intelligentă trebuie să integreze următoarele atrbute:

- Să „știe” ce se petrece în interior și imediat în exterior.
- Să poată „decide” asupra modului cel mai eficient de a asigura un mediu interior propice pentru ocupanți.
- Să poată „răspunde” rapid la cerințele ocupanților.

Aceste caracteristici de auto-gestionare a echipamentelor și resurselor se pot realiza prin implementarea proceselor și sistemelor bazate pe știința învățării cognitive.

În prezent se disting două strategii diferite de abordare a cercetării legate de aplicabilitatea inteligenței cognitive în domeniul clădirilor: industriile respective din Statele Unite ale Americii și Uniunea Europeană (Regatul Unit al Marii Britanii). Astfel, Institutul Clădirilor Inteligente din SUA (The Intelligent Building Institute of the United States–IBIUS) definește clădirile inteligente astfel: ”*o clădire ce oferă un mediu productiv și eficient din punct de vedere al costurilor prin optimizarea celor patru elemente componente de bază, inclusiv structura, sistemele, serviciile, managementul și interconexiunea dintre acestea*”, observându-se o abordare îndreptată mai mult spre maximizarea confortului interior și mai puțin spre eficiență energetică [33]. În contrast, Grupul European al Clădirilor Inteligente (European Intelligent Building Group–EIBG) oferă o definiție prin care se dorește maximizarea confortului interior, fără a scoate din context necesitatea micșorării consumului de energie în sectorul clădirilor: ”[...] creează un mediu interior ce maximizează eficiența ocupanților, în același timp în care permite gestionarea eficientă a resurselor cu costuri minime de pe întreaga durată de viață a sistemelor hardware și facilităților” [33].

Plecând de la ideea că definițiile existente sunt foarte vagi și nu au un indice de realizare concret, So et al. [40] au descris un concept de clădire inteligentă, bazându-se pe ideea că ”*o clădire nu poate fi intelligentă de la sine, dar poate oferi ocupanților un surplus de inteligență în vederea creșterii eficienței de lucru*”. A fost propusă astfel o strategie bazată pe două nivele, primul conținând zece Module Calitate-Mediu (M1-M10):

- M1: Respectarea mediului înconjurător–sănătate și conservarea energiei;
- M2: Utilizarea spațiului de locuit și flexibilitate;
- M3: Cost–Eficiență în exploatare;
- M4: Confortul utilizatorilor;
- M5: Eficiență la locul de muncă;
- M7: Cultură;
- M8: Utilizarea tehnologiei de vârf;
- M9: Procesul de construcție și structură;
- M10: Sănătate și salubritate [41],

în timp ce al doilea nivel se referă la trei zone compuse din elementele cheie obținerii unei clădiri inteligente: necesitățile funcționale, spațiile funcționale și tehnologiile implementate. So et al [40] au redefinit astfel conceptul de clădire inteligentă, afirmând faptul că ”[...] este proiectată și construită în conformitate cu selectarea adecvată a Modulelor Calitate–Mediu cu scopul de a întâmpina cerințele ocupanților prin maparea sistemelor de operare a clădirii adecvate [...]”.

Această ultimă definiție oferă proiectanților o direcție clară de urmat și suficient de multe detalii în vederea obținerii unor clădiri inteligente superioare din punct de vedere calitativ, stabilind totodată și criterii de evaluare a performanțelor clădirilor inteligente.

Diseminarea cercetării bibliografice din acest subcapitol a fost realizată prin intermediul sesiunii de toamnă Academiei Oamenilor de Știință din România, Universitatea OVIDIUS din Constanța, septembrie 2014, B. Cărăușiu, V. Tansiev, A. Badea, Cai de eficientizare a consumurilor energetice în sectorul clădirilor.

CAPITOLUL 2.

STUDIUL EXPERIMENTAL AL COMPORTAMENTULUI ENERGETIC AL CASEI PASIVE UPB PE PERIOADA DE ÎNCĂLZIRE

2.1. DESCRIEREA STANDARDULUI CLĂDIRILOR PASIVE

Consumul energetic într-o clădire standard este în mare măsură datorat necesității de a crea un confort interior optim pentru utilizatori. Astfel, un procent mai mare de 50% din energia consumată în operarea unei clădiri este datorat climatizării (încălzirii, răciri, ventilării) spațiului interior. Considerând acest aspect, în funcție de necesarul de energie pentru încălzirea spațiului, clădirile se pot clasifica astfel:

- *standard-energy*: un necesar energetic specific anual sub 65 kWh/m^2 ;
- *low-energy*: un necesar energetic specific anual sub 30 kWh/m^2 ;
- *ultra-low-energy*: un necesar energetic specific anual sub 20 kWh/m^2 ;
- *passive*: un necesar energetic specific anual sub $15 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$.

În general eficiența energetică a unei clădiri este puternic influențată de două componente esențiale: elementele pasive (capacitatea termică a clădirii, ventilația mecanică, câștiguri termice interne–ocupanți, echipamente, solar, umbră, etc.) și cele active (echipamentele de producere și transfer a energiei termice). În vederea creșterii eficienței energetice în sectorul clădirilor, o metodă fezabilă este de a maximiza influența elementelor pasive în bilanțul energetic. Plecând de la aceste considerente, a luat naștere conceputul de clădire pasivă ("passivhaus"), concretizat prin construirea primei case de acest gen în Darmstadt, Germania, în anul 1990, sub îndrumarea inițiatorilor Bo Adamson (Suedia) Wolfgang Feist (Germania). Aceștia au plecat de la conceptul existent de clădire "low-energy", concept ce era utilizat ca standard național de construcție a clădirilor noi încă din anul 1985 în țările nordice.

Termenul de "passivhaus" se referă la un standard de eficientizare energetică în sectorul clădirilor, prin care s-a reușit menținerea unui confort interior optim pe durata întregului an, cu un consum specific minim de energie și fără utilizarea sistemelor active de răcire și încălzire [42]. Inițiatorii conceptului au definit casele pasive ca fiind: *"clădiri ce au un necesar de energie pentru încălzire extrem de redus, chiar și în climatul din Europa Centrală, așadar nu au nevoie de un sistem activ de încălzire. Astfel de case pot fi încălzire doar cu ajutorul surselor de căldură interne și de energia solară intrată prin geamuri, precum și de încălzirea minimă a aerului proaspăt"* [43].

În Figura 2.1 este prezentată o comparație între o clădire standard și o clădire pasivă, privind pierderile și câștigurile termice prin diferite elemente ale anvelopei clădirii.

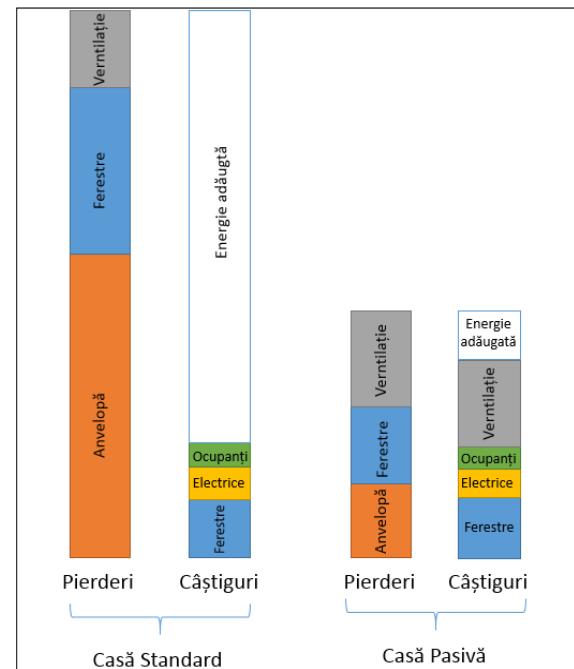


Figura 2.1. Comparație între o clădire standard și o clădire pasivă

După cum se poate observa, minimizarea pierderilor datorate transmisiei căldurii prin elementele constructive ale anvelopei (pereți, pardoseală, acoperiș, supafețe vitrate), conduce

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică la minimizarea surplusului de energie necesar a fi introdus în incintă în vederea obținerii confortului termic dorit.

Casa pasivă din Darmstadt a fost prevăzută cu o super-izolație a anvelopei termice (275 mm pentru suprafețele laterale, 450 mm pentru acoperiș și 250 mm pentru tavanale intermediere), folosește un sistem de ventilație mecanică cuplat cu un sistem de tuburi îngropate în sol în vederea preîncălzirii și pre-tratării aerului proaspăt și cu un recuperator de căldură aer-aer, ce prezintă un randament de peste 80%, introducând aerul în casă cu temperaturi de aproximativ 18 °C, diferență până la temperatura de confort fiind asigurată de un sistem termic bazat pe gaz natural [44]. Se poate afirma faptul că acest standard reprezintă o combinație eficientă între un tip special de arhitectură, o izolare foarte bună a anvelopei clădirii, minimizarea punților termice, utilizarea optimă a câștigurilor interne și externe de căldură și un sistem mecanic de ventilație foarte eficient utilizat în vederea reducerii necesarului de energie [45, 46]. Implementând aceste caracteristici, după perioada de exploatare, s-a constatat faptul că reducerea de energie necesară încălzirii spațiului a fost redusă cu aproximativ 90%, comparat cu media înregistrată în Germania [43]. În Figura 2.2 este reprezentată o comparație din punct de vedere al consumului total de energie finală (indiferent de sursa de proveniență) între trei standarde de construcție: normativul aflat în vigoare, clădiri *low-energy* și clădiri *pasive*.

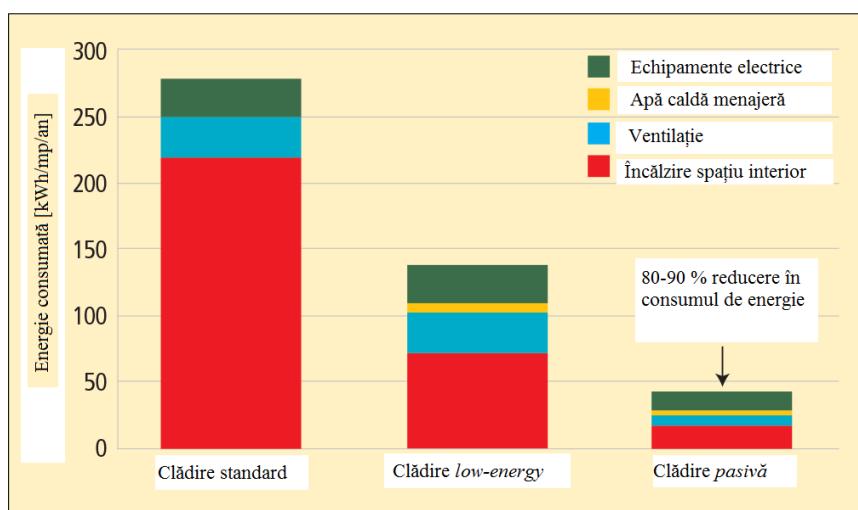


Figura 2.2. Comparație a consumului de energie între diferite standarde de clădiri [43 ,47]

În urma experienței acumulate după exploatarea clădirii construite, designul clădirilor pasive a fost codificat în *Passivhaus Standard* sub egida Institutului Caselor Pasive (Passivhaus Institute–PHI), cu sediul tot la Darmstadt, Germania. Acest standard este compus din trei elemente fundamentale:

- Limită energetică (pentru încălzire, răcire și totală);
- Element calitativ (confort interior);
- Implementarea unui set specific de sisteme pasive în vederea obținerii limitei energetice și a confortului interior [48].

În vederea certificării, clădirile construite conform standardului caselor pasive, trebuie să îndeplinească câteva criterii de ordin energetic, de confort interior și de etanșeitate. Astfel spus, din punct de vedere energetic, aceasta trebuie să prezinte un necesar de încălzire și/sau răcire sub 15 kWh/m²/an și un consum total de energie primară (indiferent de sursa de energie utilizată) sub 120 kWh/m²/an. O recomandare suplimentară privind consumul energetic este ca rata de recuperare a căldurii în interiorul clădirii să fie peste 75%, iar consumul unui ventilator utilizat în vederea recirculării aerului să aibă un consum specific de energie inferior valorii de 0,45 Wh/m² [48].

Tinând cont de faptul că buna calitate a aerului interior este datorată ventilației mecanice, anvelopa clădirii trebuie să prezinte o etanșeitate (măsurată la o presiune interioară de 50 Pa)

superioară, reprezentând 0,6 schimburi de aer pe oră (conform standardului EN 13829, reprezentând metodologia testului cu ușă suflantă) [49,50]. În zonele climatice unde temperatura exterioară de proiectare pe timp de iarnă prezintă doar valori pozitive, se acceptă faptul că etanșeitatea anvelopei poate fi mai scăzută și un rezultat al testului cu ușă suflantă de 1 schimb de aer per oră este suficient pentru realizarea criteriului pentru încălzire [48].

Din punct de vedere al confortului interior, temperatura de operare a clădirii pe timp de iarnă nu trebuie să coboare sub valoarea de 20°C , în timp ce, pe timp de vară, indiferent de existența sau lipsa sistemului activ de răcire, temperatura interioară trebuie să fie menținută sub 25°C [48]. În urma evaluărilor realizate de IEEA (Intelligent Energy Europe Agency), citate în [44], s-a constatat faptul că utilizând sisteme active HVAC, se poate menține temperatura optimă de operare a clădirii (20°C pe timp de iarnă și 25°C pe timp de vară) în aproximativ 96% din timp; o clădire strict pasivă (fără sisteme active de încălzire și răcire) poate menține o temperatură de 18°C (pe timp de iarnă) în 68% din timp, în timp ce temperatura în perioada de vară nu depășește limita impusă (25°C) în 71% din timpul utilizării. Mai mult, supraîncălzirea aerului interior la o valoare peste 25°C nu trebuie să apară în mai mult de 10% din timpul aferent răcirii clădirii [42]. Calitatea aerului este cuantificată de umiditatea relativă (optim trebuie menținută în intervalul de confort de 30–70 %) și concentrația de CO_2 (cuprinsă între 400–1500 ppm sau sub 0,1%); utilizând sistemul mecanic de ventilație, zona optimă a calității aerului este obținută în peste 96% din timp [44].

Îndeplinirea criteriilor prezentate anterior este posibilă doar în cazul respectării unor exigențe de ordin arhitectural, constructiv și energetic. În acest sens, Ionescu et al. [51] a realizat un studiu amănunțit asupra conceptelor moderne de design în vederea obținerii clădirilor eficiente din punct de vedere energetic. Astfel, pentru a minimiza posibilitatea apariției punților termice în zonele de îmbinare a anvelopei clădirii, aceasta trebuie proiectată sub o formă cât mai compactă (raportul arie per volum cât mai apropiat de 1). Orientarea fațadei principale în intervalul $\pm 30^{\circ}$ față de sud [50], cât și existența suprafetelor vitrate într-un procent semnificativ, maximizează câștigurile termice datorate radiației solare, contribuind la minimizarea necesarului energetic pentru încălzire. Suprafetele vitrate trebuie să prezinte caracteristici termice superioare (coeficient global de schimb de căldură total–geam + ramă sub $0,8 \text{ W/m}^2/\text{K}$), fiind în general alcătuite din trei sau mai multe straturi *Low-E*, prezentând totodată un coeficient de absorție al radiației solare mare (coeficient–*G* mai mare de 0,5) [43,50]. Elementele de umbrire (pasive sau active) sunt necesare în vederea minimizării riscului de supraîncălzire a clădirii în sezonul cald.

Anvelopa clădirii este cea care asigură menținerea temperaturii de confort interioare, în timp ce izolația termică este extrem de importantă în vederea minimizării pierderilor (sau câștigurilor) termice prin anvelopă, reducând amplitudinea variațiilor de temperatură la suprafața interioară a peretelui [51]. În acest sens, materialele alese în vederea realizării elementelor opace ale clădirii trebuie să prezinte un coeficient global de schimb de căldură sub $0,15 \text{ W/m}^2/\text{K}$, în timp ce, în zonele de apariție a punților termice, coeficientul liniar al pierderilor de căldură locale trebuie să fie sub $0,01 \text{ W/m/K}$ [43].

Coeficientul de etanșeitate foarte mare al anvelopei implică necesitatea utilizării unui sistem de ventilație mecanică cuplat cu un schimbător de căldură (MVHR–Mechanical Ventilation with Heat Recovery unit) în vederea facilitării transferului termic între fluxul de aer evacuat și cel proaspăt. Acest sistem MVHR trebuie să prezinte o eficiență mai mare de 75% [49]. Pe timpul verii sistemul MVHR contribuie la supraîncălzirea aerului interior, motiv pentru care el trebuie ocolit în zonele unde temperatura exterioară înregistrează valori ridicate. În mod ușual, unitatea MVHR este cuplată cu un subsistem de pre-tratare termică a aerului proaspăt bazat pe surse regenerabile de energie (pompă de căldură, sistem EAHX–Earth to Air Heat eXchanger, sobă pe biomasă, etc.), reducând astfel necesarul de energie pentru încălzire și răcire cu peste 80% comparat cu clădirile existente și cu aproximativ 75% comparativ cu noile clădiri construite [50].

Mai mult, o analiză financiară a indicat faptul că prețul aferent construcției nu trebuie să depășească cu mai mult de 16% costul unei clădiri tipice, cu un timp de amortizare al investiție sub 18 ani, considerând faptul că prețul energiei nu va crește cu mai mult de 10% pe an în perioada considerată [52], susținând fezabilitatea standardului.

2.2. DESCRIEREA CLĂDIRILOR PASIVE UPB

Aplicând standardul clădirilor pasive descris anterior, în campusul Universității POLITEHNICA din București (UPB), au fost construite două case eficiente energetice, sub forma unui duplex, în vederea studierii comportamentului în condițiile climatice din România. La acest proiect au colaborat, pe lângă UPB, reprezentată de Facultatea de Energetică, Universitatea de Arhitectură și Urbanism "Ion Mincu" din București (UIAM), Universitatea Tehnică de Construcții din București (UTCB), Academia Oamenilor de Știință din România (AOŞR) și Institutul de Studii și Proiectări Energetice (ISPE) în calitatea de coordonator al proiectului. Clădirile sunt identice din punct de vedere arhitectural, fiind compuse dintr-un living, bucătărie, baie, și o cameră tehnică la parter, două dormitoare, un birou și două băi la etaj, având suprafața utilă de 140 m^2 fiecare (configurația camerelor este prezentată în detaliu în Figura 2.5). Suprafața totală a envelopei unei case este de $481,6 \text{ m}^2$, în timp ce volumul interior este 748 m^3 , rezultând un coeficient de compactitate de $1,628 \text{ m}^3/\text{m}^2$ [44]. Diferența între cele două clădiri este dată de sistemul HVAC, dorindu-se inițial efectuarea unui studiu comparativ.



Figura 2.3. Clădirile pasive din incinta UPB [54]

Clădirile sunt executate din beton și zidărie de beton celular, având pe lângă izolația aplicată pereților exteriori (cu o grosime de 300 mm), și izolație aplicată acoperișului (400 de mm) și pardoselii (140 mm primul strat și 50 mm izolația fonica), după cum este detaliat în Tabelul 2.1. Coeficientul global de schimb de căldură aferent envelopei termice a clădirilor variază de la $0,107 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (pentru acoperiș), la $0,122 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (pentru pereții exteriori). Fațada exterioară envelopei este finisată prin montarea unui strat izolator ventilat natural, ce are și rolul de protecție împotriva acumulării de umiditate în staturile de izolație anterioare. În plus, ferestrele utilizate sunt cu strat triplu de geam, având un coeficient global de schimb de căldură de $0,6 \text{ W/m}^2/\text{K}$ și coeficient de absorbție a radiației solare de $0,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Aceste caracteristici termice minimizează pierderile de căldură prin elementele de vitraj, maximizând în același timp câștigurile termice provenite de la radiația solară. În plus, suprafața ocupată de ferestre pe fațada sudică reprezintă aproximativ 30% din total, în schimb raportul ferestre/anvelopă pe suprafața nordică este de 0,07 [53]. Detalii asupra materialelor ce intră în componența envelopei termice a caselor pasive, precum și caracteristicile termice și fizice aferente se regăsesc în Tabelul 2.1.

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

Tabel 2.1. Caracteristicile termo-fizice ale elementelor constructive [54]

Componentă	Element		Suprafață [m ²]	δ [mm]	λ [W/m/K]
<i>Pereți</i>	Acoperiș	Tencuială	182.52	22	0.8
		Beton armat		130	1.74
		Vată minerală		400	0.04
	Coefficient-U 0.107 [W/m²/K]				
	Exterior	Tencuială	182.52	22	0.8
		Beton celular		250	0.27
		Vată minerală		300	0.04
	Coefficient-U 0.122 [W/m²/K]				
	Pardoseală	Parchet	94.40	22	0.2
		Placă de OSB		8	0.13
		Mortar ușor armat		50	1.1
		EPS densitate mare		150	0.04
		Beton armat		120	1.74
		Polistiren XPS		180	0.04
		Mortar ușor armat		50	1.1
<i>Fereștre</i>	Perețe comun	Tencuială	86.72	22	0.8
		Cărămidă		250	0.8
		Tencuială		22	0.8
	Componentă		Suprafață [m ²]	Coeficient G	Coeficient U
	Geamuri		29.17	0.5	0.6
	Ramă			-	0.78

Diferența esențială între cele două clădiri constă în sistemul de încălzire și răcire utilizat. Casa Vest (casă de protocol) este prevăzută cu o pompă de căldură geotermală care, împreună cu un panou solar termic, acoperă într-un procent semnificativ necesarul de apă caldă și căldură. Sistemul de ventilație înglobează un recuperator de căldură dublu-flux care asigură recuperarea unei cantități importante de energie conținută în aerul viciat evacuat. Căldura recuperată este utilizată pentru preîncălzirea aerului proaspăt introdus în casă.

Studiul prezentat în cadrul tezei de doctorat se axează pe comportamentul Casei Est, denumită în continuare *Casa Laborator*, deoarece a fost construită în scopuri de cercetare și are montat un sistem de monitorizare, ce facilitează achiziția parametrilor de interes.

Casa Laborator este echipată cu un schimbător de căldura sol–aer (puț canadian), combinat cu un recuperator de căldură și o rezistență electrică pentru perioadele de vârf. Puțul canadian are rolul de a trata termic aerul de ventilație, preîncălzindu-l pe timpul iernii și răcindu-l pe timpul verii. Acest proces se realizează datorită diferenței de temperatură care există între sol și aerul ambient. Puțul canadian este alcătuit dintr-un sistem de conducte, amplasate în plan orizontal la o adâncime de 2,5 m în zona estică a casei, având o lungime totală de 38 m. Traseul aerului se continuă cu recuperatorul de căldură, ce facilitează transferul termic între aerul viciat (ce trebuie evacuat de sistemul de ventilație) și aerul proaspăt preîncăzit. Recuperatorul are o eficiență maximă a transferului termic de 93%, și este echipat cu două ventilatoare (trei trepte de putere fiecare) pentru circularea aerului, ce permit vehicularea unui debit maxim de 200 m³/h. Sistemul de ventilație asigură o calitate superioară a aerului interior, extrăgând aerul viciat (concentrație de CO₂ și umiditate ridicate) din bucătărie și băi, și introducând aer proaspăt în camerele unde se desfășoară activitate (camera de zi și dormitoare).

Sistemul de ventilație și recuperare a căldurii (MVHR System) este completat de o rezistență electrică de 2,4 kW putere nominală, ce este activată de un sistem de politici cu ajutorul unui sistem SBC (Smart Building Controller–Controler pentru Clădiri Inteligente). Studiile efectuate până în prezent [54] au demonstrat utilitatea acestui sistem, obținându-se temperaturi optime cu un consum energetic redus aferent perioadei de încălzire. În Figura 2.4 este prezentată o schiță a sistemului HVAC realizată în Google SketchUp. Traseul aerului proaspăt este reprezentat cu culoarea albastră, în timp ce aerul viciat este simbolizat cu culoarea roșie. În perioadele de vară, când temperatura de confort este obținută doar cu ajutorul sub-sistemului EAHX, unitatea MVHR a fost ocolită prin construirea unui bypass.

Un procent semnificativ din energia consumată cu operarea casei este acoperit cu ajutorul energiei produse de un sistem de panouri fotovoltaice (PV). Pe acoperișul fiecărei case este montat un sistem format din 13 panouri, având o putere instalată de 3 kW. Sistemul de producție mai conține un invertor ce realizează transformarea curentului continuu în curent alternativ și un program de achiziție de date. Sistemul PV este conectat direct la rețeaua electrică internă a Universității, evitându-se astfel necesitatea achiziționării unui sistem de stocare a energiei produse. Specificațiile panourilor fotovoltaice și a invertorului sunt detaliate în Tabelul 2.2. Pentru prepararea apei calde menajere este utilizat un sistem format dintr-un colector solar montat pe acoperiș sub un unghi de 15°, având o putere de 2,5 kW, un boiler acumulator de 20 de litri și o rezistență termică pentru perioadele de vârf.

Tabel 2.2. Datele de funcționare ale panourilor fotovoltaice și invertorului [54]

Parametru (PV)	Parametru (Invertor)
Tip	POWER ONE Aurora PVI
Putere nominală	3.0 kW
Număr de panouri	120-580 V
Suprafață activă totală	1
Orientare	50/60 Hz
Unghi de înclinare și azimut	-
Eficiență	-

2.2.1. Sistemul de monitorizare

Casa Laborator descrisă în subcapitolul 2.2 a fost construită cu scopul de a studia comportamentul standardului implementat de către Passivhaus Institute în condițiile climatice locale. Pentru această analiză, clădirea a fost prevăzută cu un sistem de monitorizare, compus din senzori, centrală de achiziție și un sistem de stocare a datelor colectate (server). Inițial au fost montați senzori cu fir ce permit colectarea datelor privind variația de temperatură de-a lungul sistemului HVAC și confortului interior. În urma unui proiect de cercetare demarat în 2010 și finalizat în 2013, denumit "Framework pentru compunerea serviciilor, bazat pe ontologii pentru agregarea cunoștințelor și informațiilor din clădirile inteligente (FCINT)", au

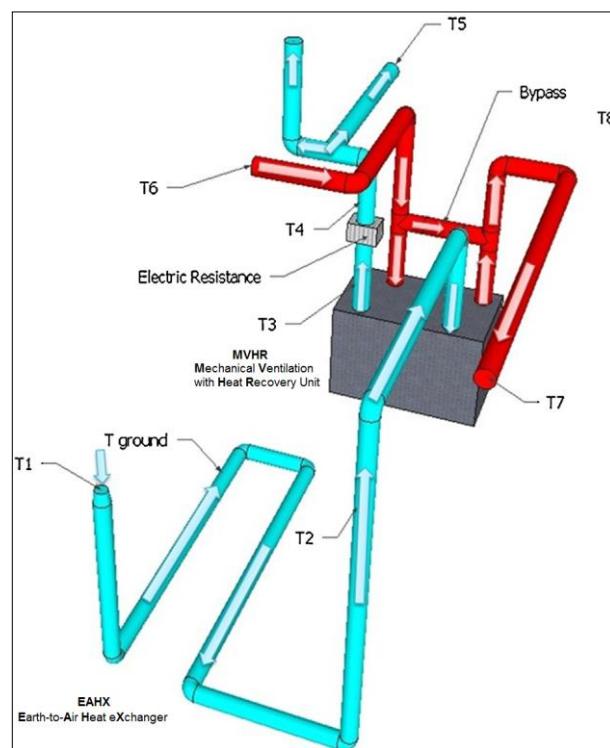


Figura 2.4. Sistemul HVAC al Casei Laborator și poziționarea senzorilor cu fir [54]

fost montați o serie de senzori wireless ce oferă informații despre factori de confort interior, cât și wattmetre în vederea monitorizării consumurilor energetice ale diferitelor subsisteme componente.

Variatația temperaturii în punctele importante ale sistemului HVAC este monitorizată prin intermediul a opt senzori Pt 100, fiind poziționați conform Figurii 2.4., numerotați în continuare de la T1 (temperatura exterioară) la T8 (temperatura interioară în zona nordică). Senzorul T1 este montat pe fațada nordică a clădirii, ferit de radiația solară directă ce ar putea induce erori de măsură și oferă detalii despre variația temperaturii aerului exterior. Variațiile temperaturii solului la adâncimea de 2,5 m și a temperaturii de ieșire din EAHX sunt date de senzorii Tground respectiv T2. Temperatura aerului proaspăt la ieșirea din sistemul MVHR este măsurată de senzorul T3. În vederea determinării câștigului energetic oferit de rezistențele electrice de încălzire suplimentară, senzorul T4 măsoară temperatura aerului în aval de acestea. Temperatura finală a aerului la introducerea în încăperi este măsurată cu senzorul T5. Pe traseul aerului viciat au fost montați 2 senzori ce monitorizează temperaturile la intrarea (T6) respectiv ieșirea (T7) din unitatea MVHR. Senzorul T8 măsoară variația temperaturii în living (considerată temperatura de confort interior), fiind poziționat în partea nordică a încăperii. Debitele celor două fluxuri de aer sunt măsurate cu ajutorul a debitmetrelor cu fir cald montate pe conductele de intrare și ieșire din unitatea MVHR. În interiorul camerei de zi au fost montați doi senzori ce oferă detalii despre confortul interior (concentrația de CO₂ și umiditate relativă)

În vederea monitorizării performanțelor panourilor fotovoltaice a fost montat un piranometru pe acoperișul clădirii, cu o orientare sudică, în același plan cu panourile. Echipamentul ce realizează legătura între panourile PV și rețeaua electrică a clădirii, invertorul Aurora, este conectat direct la server prin conexiune serială RS 232 și este echipat cu un software ce permite extragerea și interpretarea datelor. Acest program dedicat oferă informații privind puterea instantanee, energia produsă (inclusiv un istoric din momentul punerii în funcțiune a invertorului), temperatura de operare a panourilor, intensitatea și tensiunea la borne.

Puterea consumată este monitorizată de o serie de wattmetre conectate direct la sistemul de achiziție al datelor, măsurând următoarele grupuri de consumatori:

- corpuri de iluminat (E1);
- echipamente sufragerie (E2);
- echipamente bucătărie (E3);
- sistem de monitorizare (E4);
- rezistență electrică (E5);
- sistem MVHR (E6);
- baie nord (E7).

Senzorii wireless sunt numerotați de la W1 la W5 și au poziționarea conform Figurii 2.5. Aceștia oferă detalii despre temperatură, umiditate relativă și luminositate în zonele în care au fost montați. Senzorii au un interval de măsură de -40 ... 100 °C pentru temperatură, cu o eroare de măsură de maxim $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, 0 ... 100 % pentru umiditatea relativă, cu o eroare maximă de $\pm 2\%$ și 0 ... 1000 lx pentru nivelul de iluminare al camerei, cu eroarea maximă de ± 5 lx. Primul senzor a fost montat în partea sudică a livingului, pentru a observa diferența de temperatură între nordul și sudul camerei. Ceilalți sunt montați în camerele de la etaj (dormitor nord-est, birou, dormitor și baie sud-est). Senzorii wireless transmit datele către un receptor, montat în living lângă camera tehnică și care comunică cu baza de date prin conexiune USB.

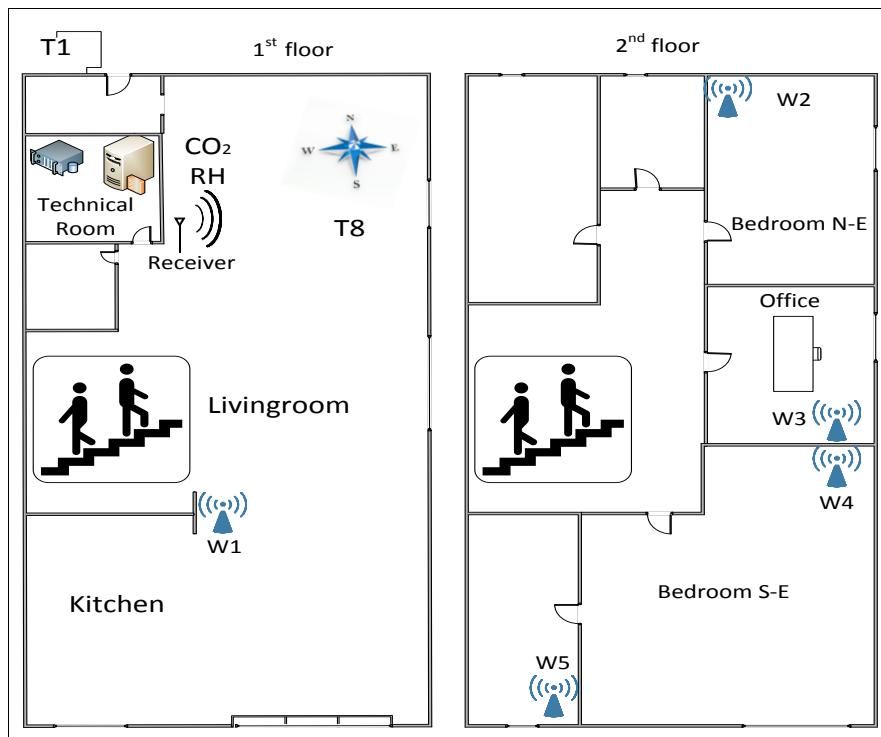


Figura 2.5. Poziționarea senzorilor wireless [54]

Senzorii au fost proiectați și realizati exclusiv în cadrul proiectului de cercetare menționat anterior și prezintă o structură multi-controller low-power ce permite funcționarea dispozitivului pe dure lungi de timp (ani) fără a exista necesitatea de a schimba bateria. Multi-controllerul integrează în cadrul același dispozitiv atât un controller cu stivă USB cât și controller radio, și permite stabilirea unui transfer de date cu o viteză de la 250 kbps până la 2 Mbps. Datele sunt prelucrate intern și transmise către receptor sub formă de pachete, facilitând procesarea lor. Datorită dimensiunilor reduse și constrângerilor legate de autonomie, acestea sunt alimentate cu baterii de tip CR24477N, ce au o tensiune nominală de 3V la o capacitate de 950 mAh și dimensiuni reduse (diametrul exterior de numai 24,5 mm).

Mărimile măsurate sunt colectate de sistemul de achiziție a datelor, instalat în camera tehnică, la un interval de eșantionare setat de utilizator. Datele colectate sunt stocate pe un server și pot fi accesate local și la distanță, prin intermediul conexiunii la internet.

2.2.2. Sistemul de control al clădirii (SBC – Smart Building Controller)

Sistemul de control al clădirii este compus atât din infrastructură software cât și hardware și servește centralizării și simplificării operațiunilor de monitorizare și management al clădirii. În plus, utilizarea sistemului SBC (Smart Building Controller) este extinsă în asigurarea unei funcționalități eficiente din punct de vedere energetic, unui mediu sănătos și sigur pentru locuitorii și minimizarea consumului de energie în clădire [55]. În esență, unitatea de control a clădirii este o aplicație programabilă ce oferă posibilitatea de a controla diverse echipamente (reprezentând outputul) în funcție de comenzi (inputurile) primite de la utilizatori, reprezentând totodată mediul de legătură între ocupant și sistemele componente ale clădirii. Inputurile permit controlerului să "cunoască" valoarea anumitor parametri de interes (temperatură, umiditate, concentrație de CO₂, presiune, etc.) în timp ce outputurile îi permit să comande infrastructura hardware și serviciile la care este conectat (sisteme HVAC, sistem de iluminat, electrocasnice, etc.).

În cadrul Casei Laborator a fost montat un SBC, fiind caracterizat de următoarele funcții principale:

- Controlul execuției serviciilor web pentru monitorizare și comanda dispozitivelor angrenate în clădire;

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

- Apelare serviciilor web de uz general, dacă acestea sunt implementate în sistem;
- Execuția ”politiciilor” definite de utilizatori în vederea realizării confortului dorit. Acestea sunt bazate pe un sistem de reguli ce permit comandarea dispozitivelor în funcție de anumite orare de funcționare sau evenimente anterioare;
- Execuția orarelor de funcționare în cazul în care nu au fost implementate ”politici”;
- Posibilitatea de a vizualiza în orice moment de timp dispozitivele conectate (stare, ierarhie) și comandarea acestora pe baza unui mecanism de securitate configurat local în sistem [56].

În operarea unei clădiri pot apărea diferite situații când simpla funcționare a dispozitivelor în funcție de un orar prestabilit nu este cea mai eficientă, dacă se dorește menținerea confortului termic în limite superioare și minimizarea consumului, fără a realiza un compromis. Plecând de la acest aspect, în infrastructura de control a Casei Laborator a fost implementată o aplicație desktop, Editor de Politici–Policy Editor, destinată editării și gestiunii politicilor de control ale componentei SBC asupra dispozitivelor și serviciilor instalate în clădire. Această aplicație reprezintă interfața între utilizatori și mecanismul de execuție și a fost gândită ca o abordare bazată pe un sistem de reguli. Astfel, în cadrul SBC-ului, o ”politică” este un set de reguli ce formează total sau parțial programul de control [56]. Fereastra aplicației desktop este reprezentată în Figura 2.6. Execuția regulilor se poate face izolat de alte reguli, sau corroborat cu alte reguli din cadrul altor politici. În acest sens, mecanismul de execuție al politicilor permite citirea, ștergerea, scrierea și interogarea acestora, astfel încât, după caz, utilizatorul să poată defini o logică mai complexă de execuție.

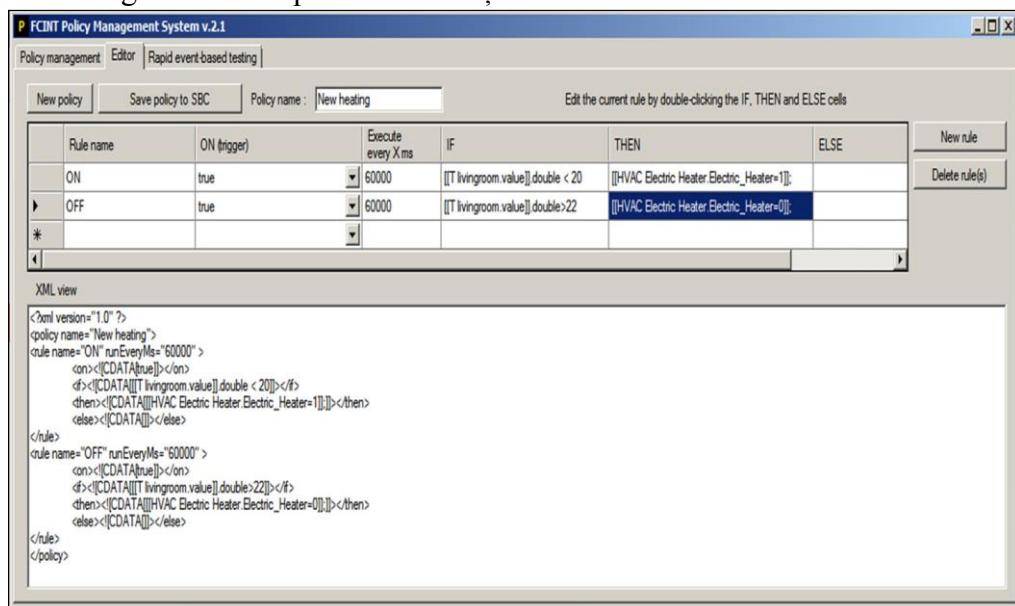


Figura 2.6. Fereastra aplicației desktop Policy Editor

Arhitectura mecanismelor de execuție a politicilor a fost gândită ca o arhitectură ”condusă” de evenimente (Event Driven Architecture). În acest sens, SBC-ul poate recepționa evenimente din mediul extern, pe care să le interpreteze în vederea acțiunării echipamentelor adiacente. La introducerea unui eveniment în sistem, utilizatorul poate specifica logica de control sub forma politicilor sau regulilor asociate aceluiași tip de eveniment. Astfel, în sistem se pot defini diferite tipuri de reguli, executate periodic sau declanșate la apariția unui anumit eveniment, scrise în pseudocod sub forma *IF ... THEN ... ELSE*.

Implementarea unei politici noi se realizează prin simpla acționare a butonului ”*New Policy*”, după care se introduce obligatoriu denumirea dorită. Regulile ce compun politica se introduc prin acționarea butonului ”*New Rule*”, după care, se denumesc obligatoriu. În interfață grafică s-a introdus posibilitatea stabilirii de către utilizator a pasului de timp (în milisecunde) în care regula respectivă este executată, prin introducerea unei valori pozitive și întregi în

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

câmpul *"Execute every ms"*. După ce au fost executate aceste operațiuni obligatorii, utilizatorul trebuie să editeze clauzele *IF* (condiția), *THEN* (acțiunea efectuată în cazul în care condiția este adevărată), *ELSE* (acțiunea efectuată în cazul în care condiția este falsă). Aceste clauze se introduc în câmpurile respective prin deschiderea automată (la acționarea unui dublu-click) a unui editor de expresii (Figura 2.7) ce permite introducerea expresiilor presetate din cadrul SBC-ului. Clauza *IF* se definește obligatoriu, în caz contrar politica nefiind compilată corect, întregul lanț de execuție al politicilor se dezactivează, apărând o eroare. Odată finalizată introducerea unei politici, aceasta poate fi dezactivată prin comutarea câmpului pe valoarea *"OFF"*, sau se poate șterge în cazul în care aceasta nu mai este necesară (de exemplu o politică implementată sezonier sau în cazul unui eveniment social). În zona *XML VIEW* se poate vedea și analiza politica implementată, fără a exista posibilitatea de editare.

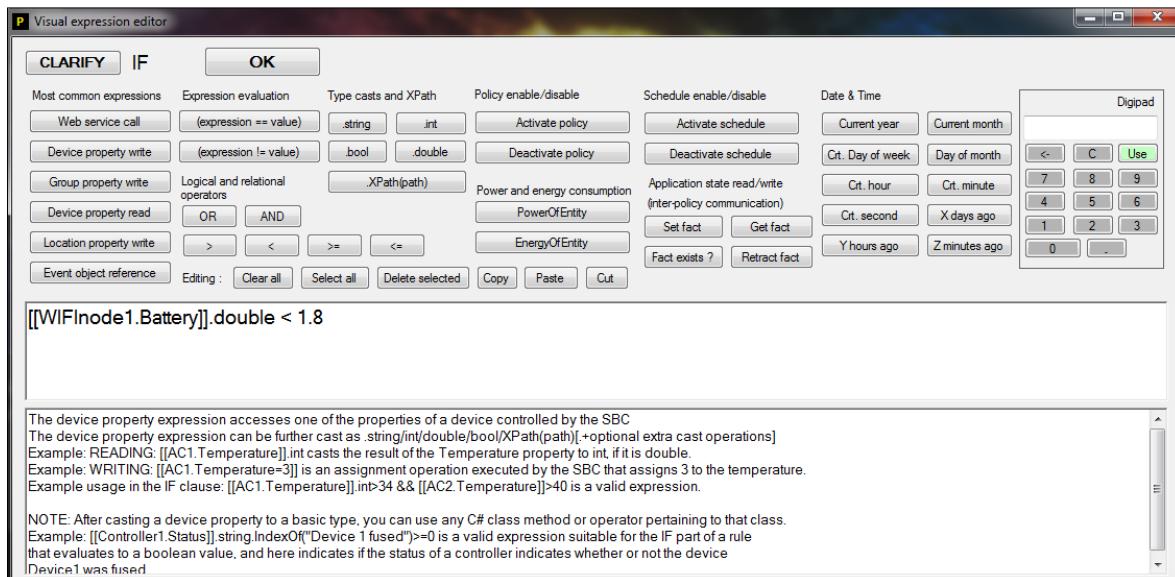


Figura 2.7. Fereastra editorului de expresii din cadrul SBC-ului [56]

Utilizând acest sistem a fost implementată o politică ce a funcționat în perioada de încălzire între 1 noiembrie 2013–30 aprilie 2014 (Figura 2.6), compusă din două reguli independente, bazate fiecare pe o subrutină, și care acționau rezistența electrică. Condițiile de activare a politicii au fost verificate la fiecare minut, și obiectivul principal a fost acela de a menține temperatura interioară (monitorizată cu ajutorul senzorului T8 în living) la valori de peste 20°C cu o funcționare minimă a rezistenței electrice. În acest sens, a fost creată subrutina numită *"Simple Heating"*, ce acționa rezistența electrică doar în cazul în care temperatura interioară înregistra valori cuprinse între 20 și 22°C. Cele două reguli implementate, *R1* – Schedule și *R2* – Simple Heating sunt declanșate de un prag de 15°C al temperaturii exterioare, măsurate cu ajutorul senzorului T1.

Înțial, regula *R1* verifică dacă timpul se află în intervalul definit de utilizator și compară temperatura exterioară cu valoarea pragului impus. Activează subrutina și implicit rezistența electrică doar în cazul în care evenimentul se petrece în intervalul orar 5:00 AM și 18:00 PM și temperatura exterioară este mai mică decât 15°C. A doua regulă, *R2*, nu are implementat un orar de funcționare, și doar compară temperatura exterioară cu cea de referință, decuplând rezistența electrică în cazul în care senzorul T1 indică o valoare mai mare de 15°C. În intervalul orar 18:00 PM – 5 AM, politica este dezactivată.

Rezultatele implementării sistemului de achiziție al datelor și SBC-ului sunt prezentate în subcapitolele 2.3 și 2.4.

2.3. REZULTATELE IMPLEMENTĂRII SISTEMULUI SBC. BILANȚUL ENERGETIC AL CASEI LABORATOR PENTRU PERIOADA DE ÎNCĂLZIRE

Datele prezentate au fost colectate în perioada 1 noiembrie 2013–30 aprilie 2014, și definesc începutul și sfârșitul perioadei de încălzire. În general, clima din România este caracterizată de ierni geroase în care temperatura medie multianuală exterioară nu depășește 3°C în zonele joase și -15°C în zonele muntoase. În București, temperatura medie într-un an caracteristic prezintă o amplitudine ce variază de la $-2,4^{\circ}\text{C}$ în ianuarie până la un maxim de 22°C în iulie [57,58]. În Figura 2.8 este reprezentată temperatura exterioară măsurată cu ajutorul senzorului T1, și se poate observa faptul că acesta a înregistrat o valoare medie orară minimă (-12°C) pe 31 ianuarie.

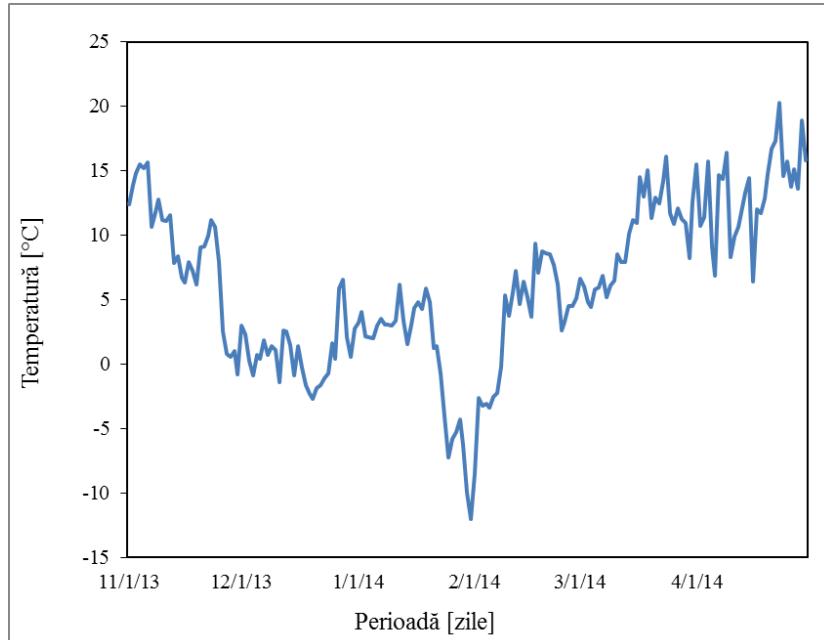


Figura 2.8. Temperatura exterioară măsurată în perioada de monitorizare [54]

Comportamentul Casei Laborator în perioada de încălzire a fost analizat ținând cont atât de necesitatea menținerii unui confort termic interior superior (descriș în secțiunea 2.3.1), cât și de preocupările curente ale UE privind eficientizarea energetică în sectorul clădirilor. În vederea obținerii unui raport consum-beneficiu optim, a fost utilizată infrastructura descrisă în subcapitolul 2.2.

2.3.1. Confortul interior

În analiza confortului interior s-a ținut cont de asigurarea temperaturii de confort pe timp de iarnă (peste 20°C) și calitatea aerului, reprezentată de concentrația de CO_2 în aerul interior (cuprinsă între 400 și 1500 ppm sau sub 0,1% [44,59]).

Ca dată de referință a fost aleasă ziua cea mai rece din perioada analizată (31 ianuarie 2014), data în care clădirea nu a fost locuită. În această zi, temperatura medie a fost de -12°C având un maxim ce nu a depășit valoarea de -8°C . Pentru a analiza confortul termic interior, au fost analizate datele (ca medii orare) oferite de senzorii wireless amplasați în camerele de interes din Casa Laborator. După cum se poate observa în Figura 2.9 cea mai joasă temperatură a fost înregistrată în dormitorul sudic datorită faptului că aici nu se introduce aer proaspăt (cald), ci acesta circulă prin fantele din partea de jos a ușii comune. În cursul nopții, în această zonă, s-a înregistrat o scădere a temperaturii până în jurul valorii de $17,7^{\circ}\text{C}$. În jurul orei 14:00 a fost înregistrată cea mai ridicată temperatură ($18,8^{\circ}\text{C}$), în principal datorită aerului cald introdus în dormitor și circulației libere a acestuia prin orificiul din ușă. Cele mai ridicate temperaturi au fost înregistrate în dormitorul nord și birou, unde, temperatura medie pe cele 24 de ore analizate a fost în jurul a 22°C . Chiar dacă sistemul HVAC a funcționat după aceeași politică pentru

întreaga casă, temperaturile în aceste două camere nu au scăzut sub 22°C nici pe timpul noptii, datorită suprafeței relativ mici a suprafețelor vitrate pe peretele singular exterior, pierderile prin anvelopă fiind mai mici decât în cazul camerelor cu mai mulți pereți exteriori. În Figura 2.9 se poate observa faptul că, în afară de dormitorul nordic, temperatura înregistrează valori în jurul a 20°C, cu mențiunea că, pe timp de noapte, după cum a fost implementată politica de funcționare a SBC-ului, încălzirea este oprită.

Pentru a obține această temperatură interioară în 31 ianuarie, sistemul HVAC a consumat 28,43 kWh (0,2 kWh/m²), această valoare fiind datorată în proporție de 93% rezistenței electrice și doar 7% ventilatoarelor din MVHR.

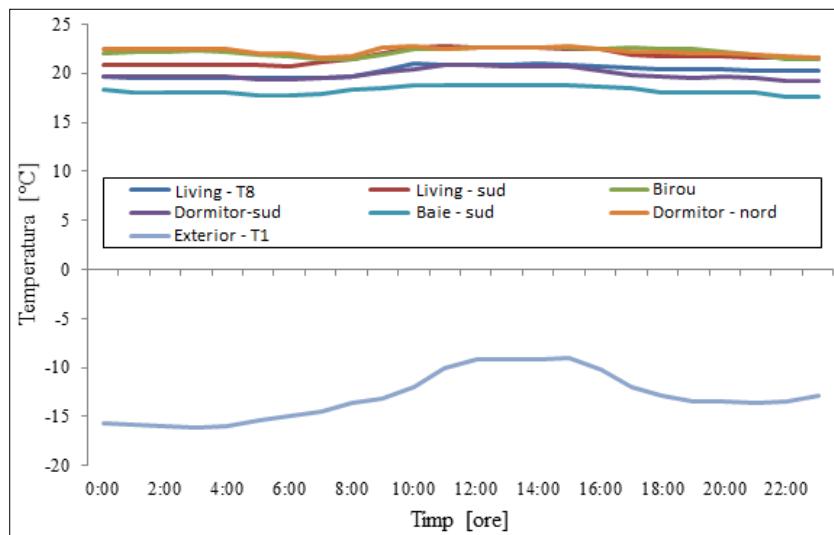


Figura 2.9. Variația temperaturii interioare pe 31 ianuarie 2014 [54]

Influența raportului mare a suprafeței vitrate pe suprafața sudică a clădirii este cuantificată de diferența de temperatură între cei doi senzori amplasați în living (senzorul W1–zona sudică și T8–zona nordică). Montarea celor doi senzori a fost realizată la o înălțime ce nu permite influența radiației solare ce ar putea induce erori de măsurare. Diferența medie înregistrată în ziua de 31 ianuarie a fost de 1,47°C, cu un maxim de 1,85°C înregistrată în jurul orei 11, datorită radiației solare și a coeficientului-G mare al geamurilor. În Figura 2.10 este detaliată diferența de temperatură între senzorul W1 și T8, exprimată ca medii orare pentru ziua de 31 ianuarie 2014.

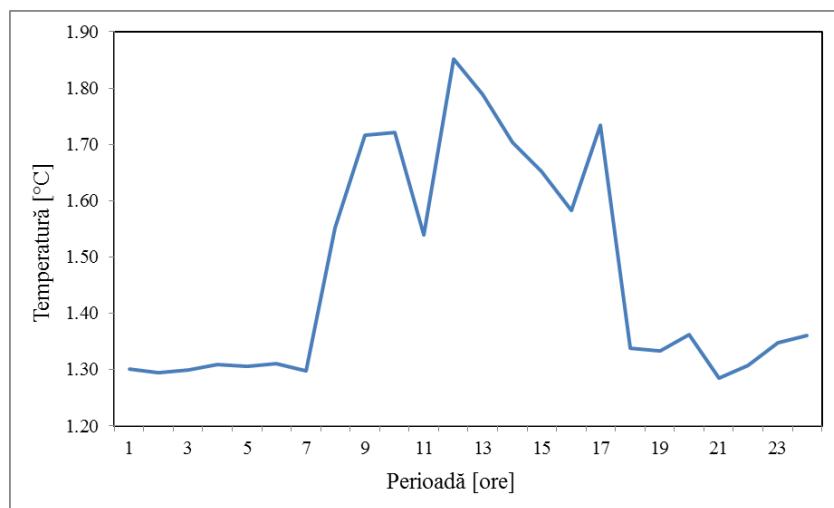


Figura 2.10. Diferența între temperatura medie orară din sudul și nordul livingului [54]

În Figura 2.11 este prezentată variația temperaturii în interiorul sistemului HVAC în aceeași zi (31 ianuarie 2014), calculând valorile reprezentate ca medii orare. Chiar dacă temperatura exterioară a înregistrat variații semnificative (între -16,3 și -8,4°C), temperatura

solului, care a variat între 7,1 și 7,3°C, a stabilizat termic debitul de aer la intrare în MVHR. Aici, temperatura aerului a înregistrat valori cuprinse între 6,1 și 6,6°C. La ieșirea din MVHR, aerul proaspăt a fost încălzit la valori cuprinse între 18,27 și 21,24°C. Fluxul de aer viciat, fluidul care cedează căldură în interiorul recuperatorului de căldură, a scăzut de la un maxim de 20,6°C (la intrarea în unitatea MVHR), până la un minim de 13°C (la ieșirea din unitatea MVHR).

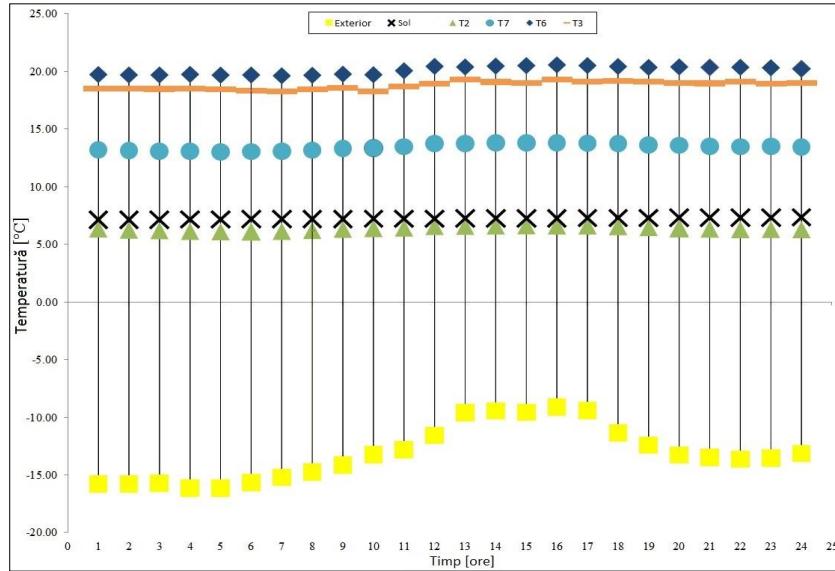


Figura 2.11. Variația temperaturii în sistemul HVAC în 31 ianuarie 2014 [54]

Eficiența de transfer termic a unității MVHR (ε), calculată ca raportul dintre fluxul termic real transferat și fluxul termic maxim posibil transmis între cele două fluide în ipoteza în care schimbătorul de căldură ar avea o lungime infinită [60], a variat între 0,89 și 0,92, indicând un randament foarte bun al recuperatorului de căldură.

Concentrația de CO₂ este monitorizată în living. Conform cercetărilor efectuate de ASHRAE (American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers) [59], în clădirile neindustriale, concentrația de CO₂ trebuie să nu depășească valoarea de 1500 ppm pentru perioade lungi, în vederea obținerii unei calități optime a aerului interior. În condiții normale de exploatare a Casei Laborator, concentrația de CO₂ nu depășește valoarea de 750 ppm (pentru patru locuitori), după cum se poate observa în Figura 2.12.

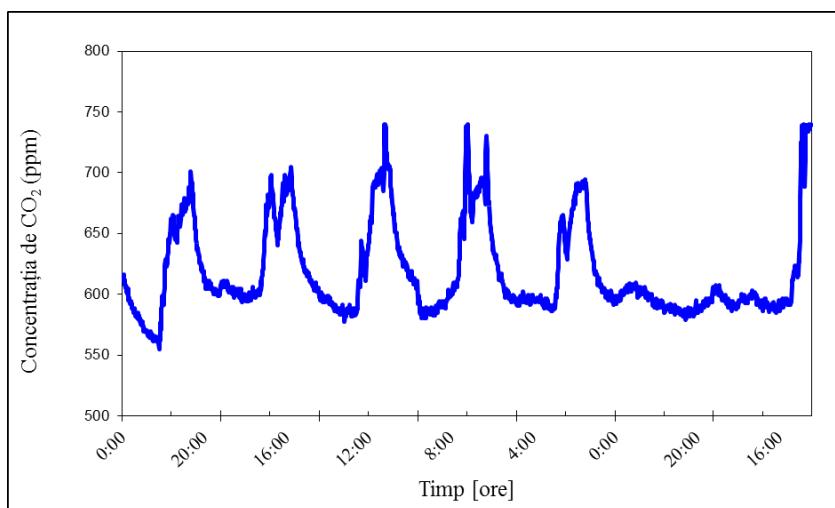


Figura 2.12. Variația concentrației de dioxid de carbon în condiții normale de funcționare [54]

Se poate observa faptul că variația concentrației de CO₂ are o distribuție atipică, asemănătoare cu orarul de ocupare. În timpul nopții, când clădirea nu este ocupată, concentrația scade la valori de aproximativ 600 ppm, aceasta înregistrând valori ascendente odată cu venirea

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică locutorilor în jurul orei 9:00 AM. În momentul efectuării studiului, în clădirea pasivă își desfășurau activitatea de cercetare doi doctoranți.

Pentru o mai bună reprezentare a modului în care sistemul de ventilație menține aerul interior la o calitate superioară, s-a realizat un experiment în care ventilatoarele unității MVHR au fost setate pe treapta 2 (un debit circulat de $85 \text{ m}^3/\text{h}$ și o putere a ventilatoarelor de 24 W). Pe durata a două ore, au fost desfășurate activități didactice implicând 20 de studenți și un cadru didactic, timp în care concentrația de CO₂ a fost atent monitorizată. După cum se poate observa în Figura 2.13, concentrația de CO₂ crește rapid până la valori de 1950 ppm în jurul orei 14:00, după care, în mai puțin de 6 ore, revine la condițiile inițiale, indicând o eficiență foarte bună a sistemului de ventilație.

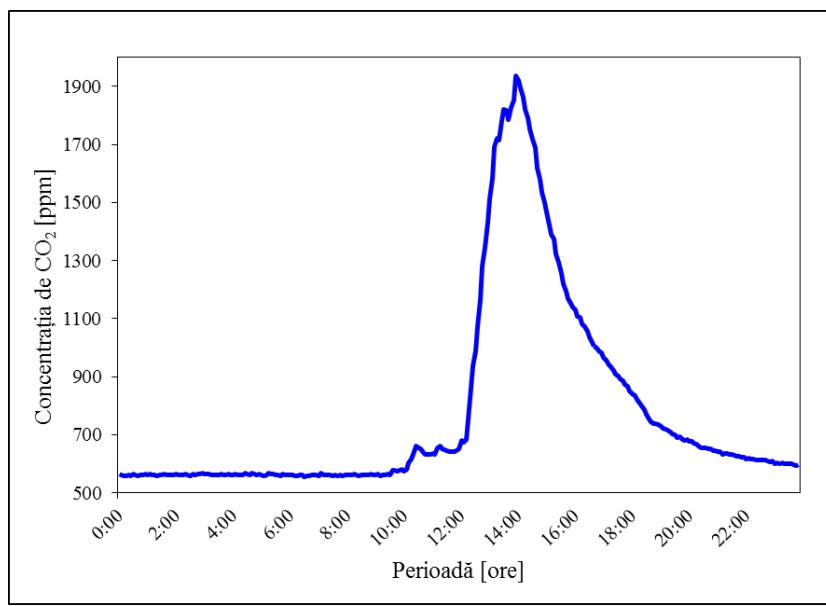


Figura 2.13. Variația concentrației de CO₂ pe durata experimentului [54]

2.3.2. Consumul energetic

Consumul de energie pe perioada de încălzire este datorat rezistenței electrice și ventilatoarelor de circulare a aerului, în timp ce datele măsurate au fost culese cu un pas de timp de o zi. La începutul perioadei de încălzire (1–9 noiembrie 2013), temperatura de confort a fost asigurată doar cu ajutorul celor două subsisteme de tratare termică a aerului proaspăt (EAHX și MVHR) și consumul de energie a fost datorat exclusiv ventilatoarelor. Rezistența electrică a fost pornită pentru prima dată pe 10 noiembrie, rezultând un consum în vederea menținerii temperaturii interioare la valori de peste 20°C de doar 227 kWh (1,65 kWh/m²).

În decembrie 2013, energia totală consumată de sistemul HVAC în vederea încălzirii spațiului a fost de 536 kWh (3,82 kWh/m²), în timp ce în ianuarie a fost înregistrat cel mai mare consum, însumând 542 kWh (3,87 kWh/m²). În februarie, datorită faptului că au fost doar 28 de zile, consumul de energie a înregistrat o valoare relativ mică comparativ cu lunile anterioare. Sistemul HVAC a consumat în această perioadă 3,1 kWh/m² (435 kWh). În martie, sistemul de achiziție de date a indicat un consum de 277 kWh (1,97 kWh/m²), fapt datorat temperaturilor exterioare relativ ridicate, în timp ce, în aprilie rezistența electrică a fost oprită, rezultând un consum de doar 66 kWh (0,47 kWh/m²), datorat exclusiv ventilatoarelor din unitatea MHVR. În Figura 2.14 sunt prezentate consumurile lunare de energie în vederea asigurării temperaturii de confort.

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

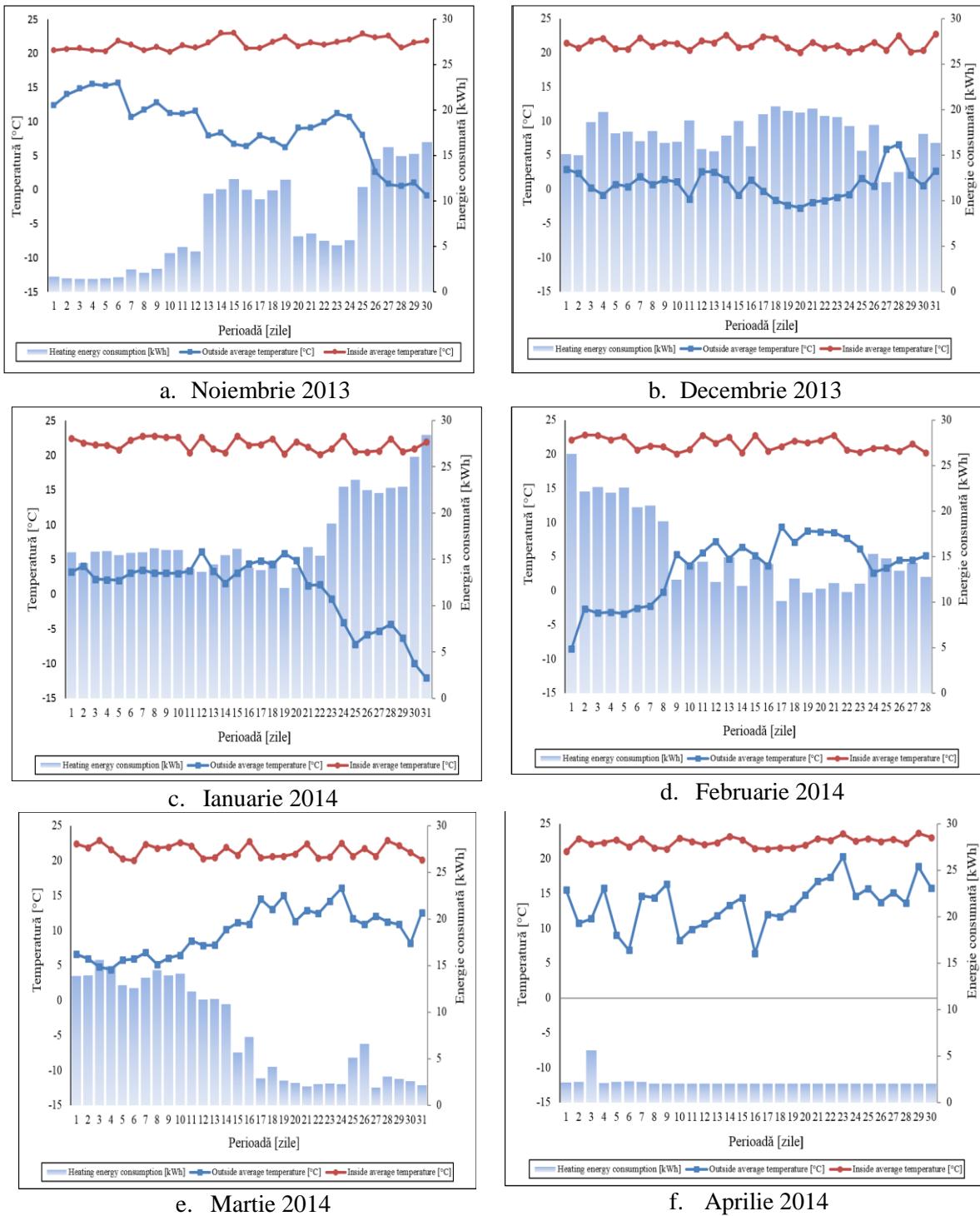


Figura 2.14. Analiza consumului de energie pentru încălzire în perioada monitorizată [54]

Simulațiile efectuate pentru Casa Laborator [61,62,63] au indicat faptul că energia consumată în vederea menținerii unei temperaturi operaționale de 20°C, utilizând un sistem HVAC ideal, este de 14,8 kWh/m²/an. Modulul de calcul oferit de către PHI (PHPP – Passivhaus Planning Package), o aplicație efectuată în Microsoft Excel prin intermediul unor foi de calcul utilizează aceeași temperatură operațională în perioada rece, în vederea estimării necesarului de energie pentru încălzire și răcire. Folosind date despre proprietățile termo-fizice ale elementelor constructive ale anvelopei, orarul de locuire, estimări ale căștigurilor interne și solare, sistemul HVAC și date climatice, modulul de calcul PHPP a estimat un necesar de energie pentru încălzirea casei testate de 11,43 kWh/m²/an. În toate scenariile prezentate a fost considerată aceeași rată de ocupare.

În studiul efectuat, prin implementarea sistemului SBC și a politicilor prezentate anterior, pentru menținerea unui confort interior, energia totală consumată a fost de 2084 kWh, însemnând un consum specific de 14,88 kWh/m²/an, considerând faptul că încălzirea a fost necesară doar în perioada considerată.

ACTIONÂND elementul activ de încălzire (rezistență electrică) prin intermediul SBC-ului, funcționalitatea acestuia a fost minimizată. Prin implementarea politicilor de funcționare, perioada totală de funcționare a fost de doar 783 de ore, însemnând aproximativ 18% din timpul total de monitorizare. După cum se poate observa în Figura 2.15, perioada de funcționare cea mai lungă a coincis cu cea mai geroasă zi din an (31 decembrie), când aceasta a funcționat în total 12 ore în vederea menținerii temperaturii de confort. În medie, datorită sistemului de control, aceasta a funcționat doar 4,3 ore pe zi în perioada studiată.

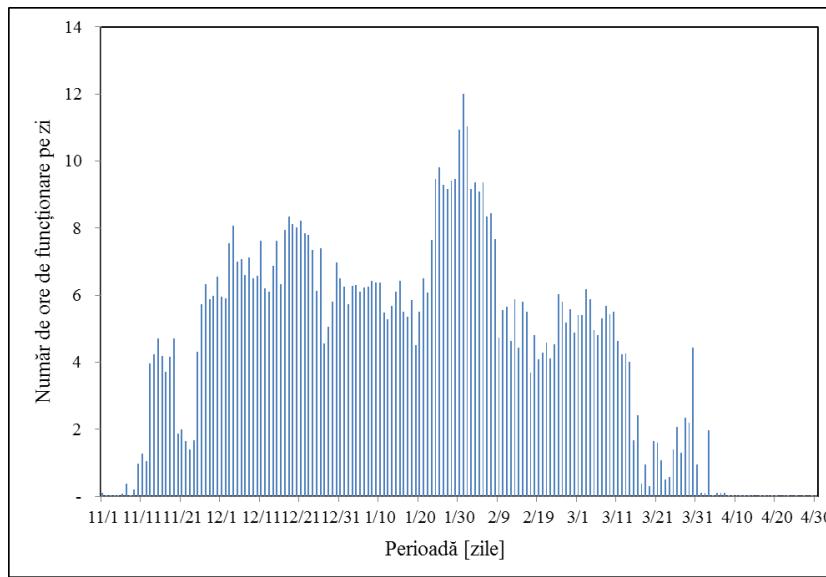


Figura 2.15. Numărul de ore de funcționare a rezistenței electrice în perioada monitorizată [54]

Consumul total de energie în Casa Laborator este compus din energia necesară încălzirii și ventilării spațiului, electrocasnice, sistem de monitorizare și iluminat. În Tabelul 2.3. sunt prezentate detaliat consumurile energetice pentru fiecare consumator monitorizat între 1 noiembrie 2013 și 31 aprilie 2014.

Tabel 2.3. Distribuția energiei consumate în perioada monitorizată [kWh] [54]

	Iluminat	Living	Bucătărie	Sistem de monitorizare	Rezistență electrică	MVHR	Baie
Wattmetru	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
Nov	34.2	210.5	26.3	94	169.8	57.2	1.1
Dec	24.1	635.8	8.4	111.2	473.5	62.6	68.3
Jan	23.5	596.8	103.6	105.1	479.2	62.6	44.1
Feb	18.3	622.4	17.9	94	379.1	56.6	14.8
Mar	25.9	122.0	19.7	104.5	214.6	62.6	16.3
Apr	22.3	39.4	2.5	100.4	5.6	60.6	4.3
Total	148.3	2226.9	178.4	609.2	1721.8	362.2	148.9

Energia totală electrică consumată între 1 noiembrie 2013 și 31 aprilie 2014 a fost de 5395,7 kWh (38,5 kWh/m²/an), din care, 39% a fost utilizată pentru încălzirea spațiului (Figura 2.16). Sistemul de monitorizare (SM) este responsabil cu 11% din consumul total, dar acesta se poate omite, ținând cont de faptul că într-o clădire standard acesta nu este implementat. Fără acest sistem consumul total de energie a fost de 4786,5 kWh (34,2 kWh/m²/an). Comparat cu o clădire standard consumul de energie este atipic, bucătăria contribuind cu doar 3% din total, aceasta fiind foarte rar utilizată. Livingul este responsabil cu 41%, fapt datorat existenței unui număr de 4 calculatoare și monitoare, 4 laptopuri, dar și de faptul că există montat un panou electric radiant utilizat pentru încălzire în perioadele de vârf.

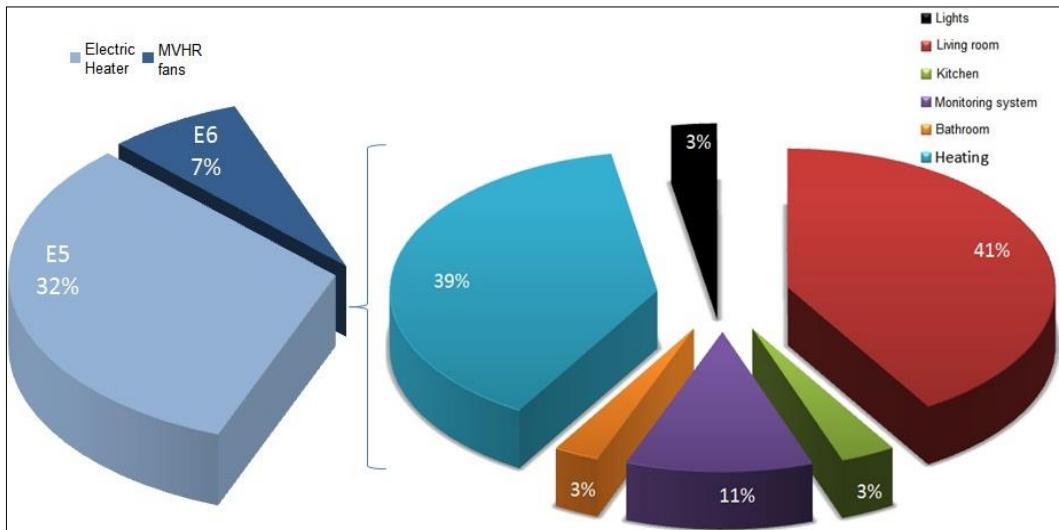


Figura 2.16. Distribuția consumului de energie pentru Casa Laborator în perioada monitorizată [54]

2.3.3. Bilanțul energetic al Casei Laborator în perioada monitorizată

Energia produsă de sistemul de panouri fotovoltaice a fost monitorizat cu ajutorul software-ului invertorului. În perioada de monitorizare producția totală de energie a fost de 441 kWh. Luna cu cea mai scăzută rată a energiei produse a fost ianuarie, cu un total de 24,6 kWh (detaliat în Tabelul 2.4). Acest lucru s-a datorat faptului că, pe lângă valoarea redusă a radiației solare, panourile fotovoltaice au funcționat doar 20 de zile, între 6 și 26 februarie, fiind acoperite cu zăpadă în rest. Scenariul s-a repetat și între 26 februarie și 4 martie, după cum se poate vedea în Figura 2.17. În aprilie producția de energie a fost de 133,7 kWh, fiind luna în care, fără să se țină cont de sistemul de monitorizare, energia produsă a acoperit în proporție de 99% energia consumată, datorită faptului că sistemul de încălzire a fost oprit. În perioada noiembrie–aprilie, panourile au acoperit doar 8,17% din energia consumată (9,21% dacă se omite sistemul de monitorizare–SM).

Tabel 2.4. Comparație între energia produsă și consumată [kWh]

Lună	Producție	Consum		Procent [%]	
		Cu SM	Fără SM	Cu SM	Fără SM
Noiembrie	53.4	593.1	499.1	9.00	10.70
Decembrie	39.6	1383.9	1272.7	2.86	3.11
Ianuarie	24.6	1414.9	1309.8	1.74	1.88
Februarie	64.3	1203.1	1109.1	5.34	5.80
Martie	125.3	565.6	461.1	22.15	27.17
Aprilie	133.7	235.1	134.7	56.87	99.26
Total	440.9	5395.7	4786.5	8.17	9.21

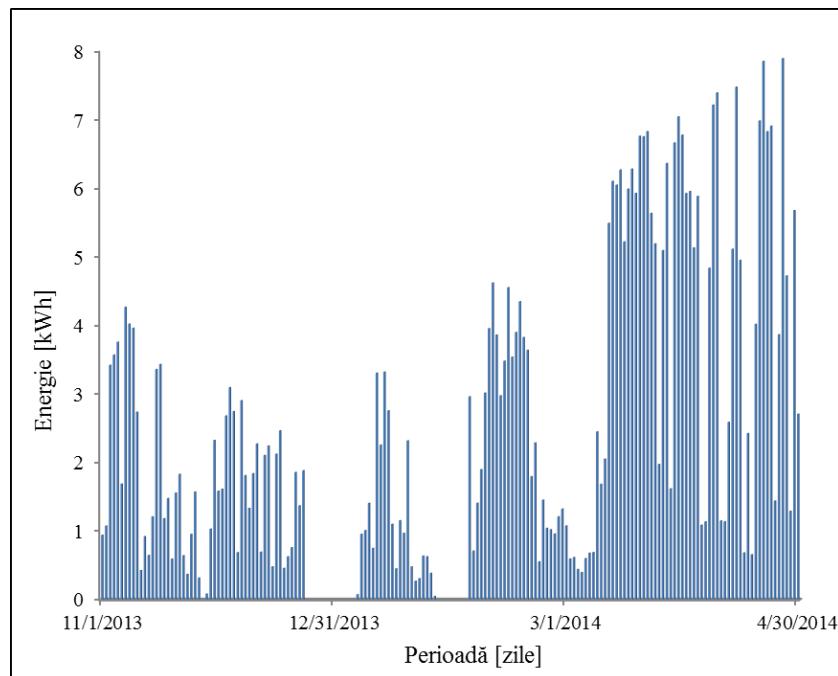


Figura 2.17. Energia produsă zilnic în perioada monitorizată [54]

Ziua în care s-a produs cea mai mare cantitate de energie a fost pe 26 aprilie, când panourile au produs 7,9 kWh (6% din energia produsă în luna aprilie), fapt datorat radiației solare mari și perioadei lungi de funcționare a sistemului fotovoltaic. În orele de funcționare sistemul a înregistrat o putere maximă de 1240 W, corespunzătoare unei radiații solare de 1000 W/m².

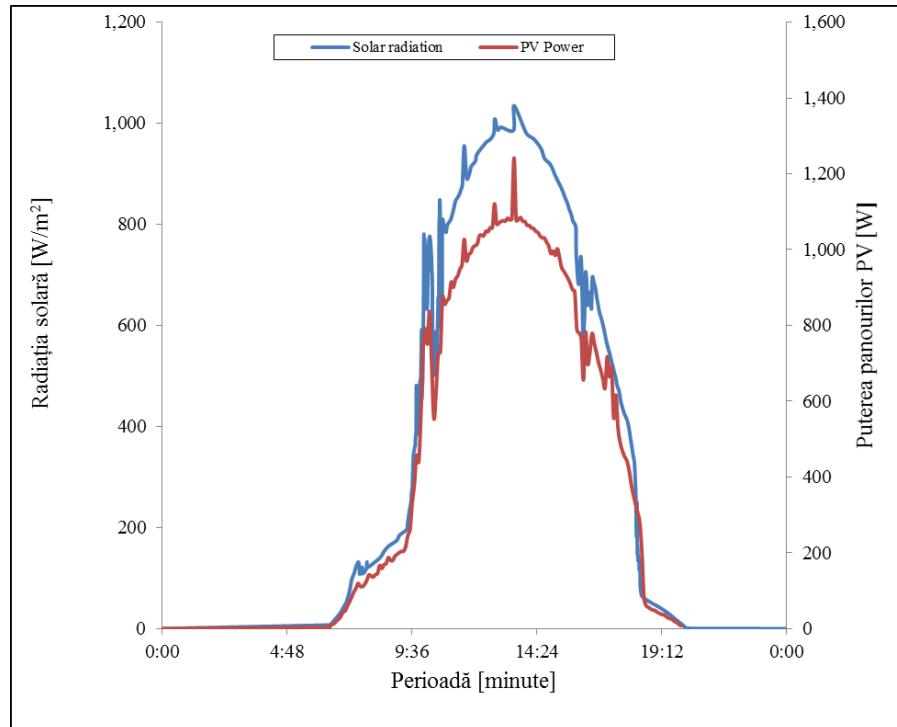


Figura 2.18. Radiația solară și puterea produsă de panourile PV pe 26 aprilie [54]

Conexiunea panourilor fotovoltaice direct la rețeaua de electricitate din campus a permis realizarea unui studiu detaliat despre cantitatea de energie injectată în rețea. Astfel, în aprilie, când sistemul fotovoltaic acoperă o parte importantă din consumul total de energie, au existat 7 zile când energia produsă a fost în surplus. Cea mai importantă zi a fost 21 aprilie, când au fost stocați în rețeaua electrică 1,76 kWh, reprezentând 22,4% din energia produsă.

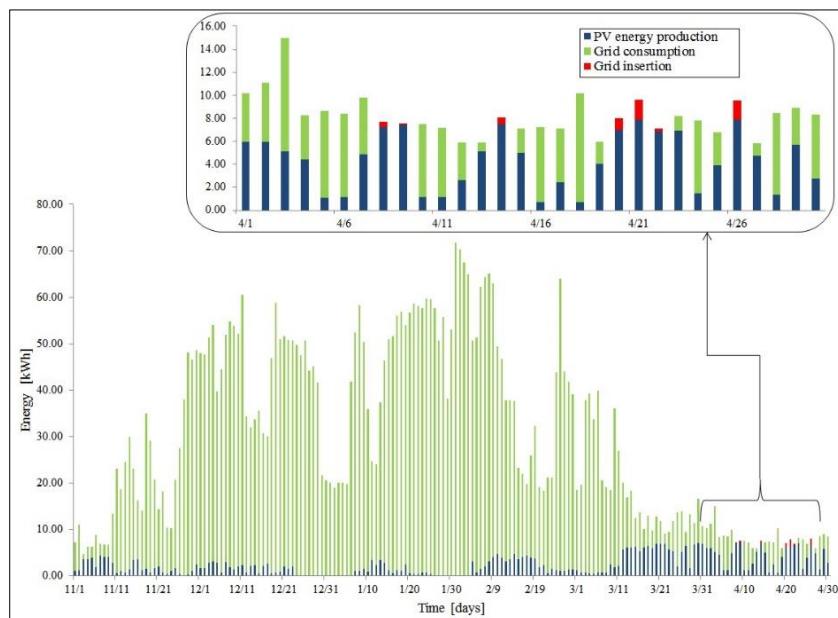


Figura 2.19. Distribuția sursei de energie utilizată în Casa Laborator în perioada monitorizată [54]

După cum se poate observa în Figura 2.19, variația producției de energie este invers proporțională cu consumul, și, începând cu aprilie, sistemul injectează periodic o cantitate de energie în rețea. Acest lucru permite să estimăm faptul că, pe timpul verii, când sistemul de încălzire nu va mai funcționa, energia produsă va fi mai mare decât cea consumată, fapt ce poate încadra Casa Laborator în standardul clădirilor plus energie (plus-energy buildings).

Acest studiu poate fi utilizat ca suport în perioada implementării conceptului nZEB în România. Perioada analizată a fost caracterizată de variații ale temperaturii exterioare similare cu cele ale anului caracteristic pentru București, atribuind studiului prezentat un caracter de referință pentru cercetările viitoare.

2.3.4. Concluzii

Prin studiul descris anterior autorul își propune să realizeze o analiză completă a comportamentului unei clădiri construite conform standardelor PHI în vederea implementării clădirilor cu consum aproape zero de energie în condițiile climatice din România. Pentru aceasta, pe lângă analiza confortului termic și calității aerului interior, a fost efectuat și un studiu amănunțit atât asupra consumului de energie (pentru încălzire și global), cât și a producției energiei electrice din surse locale de energie regenerabilă (panouri fotovoltaice).

În perioada analizată, ce s-a întins pe durata a șase luni (1 noiembrie–31 aprilie), temperatura de confort a fost întotdeauna menținută la valori de peste 20°C cu ajutorul unui sistem SBC. În mod normal, concentrația de CO_2 variază între 650 și 750 ppm, dar în cazul în care datorită unui eveniment aceasta crește la valori peste limita admisă, sistemul de ventilație asigură revenirea la condițiile normale într-o perioadă scurtă de timp.

Energia consumată în Casa Laborator are o distribuție atipică în comparație cu o casă standard din sectorul rezidențial, datorită faptului că aceasta este locuită în regim de clădire de birouri. Pe durata celor șase luni de monitorizare, wattmetrele au indicat un consum total de 5395,7 kWh, însemnând un consum specific de $38,5 \text{ kWh/m}^2$ (sau $34,2 \text{ kWh/m}^2$ dacă se omite sistemul de monitorizare). Prin implementarea celor două politici de funcționare a rezistenței electrice, aceasta a funcționat în doar 18% din timpul monitorizat, rezultând un consum specific datorat încălzirii spațiului de doar $14,88 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$, valoare sub pragul admisibil în vederea certificării de către PHI.

Importanța utilizării surselor de energie regenerabilă în domeniul clădirilor este stipulată și în definiția nZEB din legislația Europeană. Sistemul de panouri PV instalat pe acoperișul

Casei Laborator a acoperit 8,17% din energia totală consumată în perioada de monitorizare. În aprilie procentul acoperit prin surse regenerabile a crescut la 56,87%, iar dacă nu este luat în considerare sistemul de monitorizare (ce consumă 11% din total), procentul crește la 99%. Acest lucru permite estimarea faptului că în perioada de vară, când nu există sistem activ de răcire, clădirea poate fi plus-energy building, accentuând utilitatea sistemului PV în obținerea standardelor nZEB.

Diseminarea rezultatelor din acest subcapitol a fost făcută prin intermediul articolului intitulat „Reducing energy consumption in low energy buildings through implementation of a policy system used in automated heating systems”, autori: B. Cărăușiu, V. Tanasiev, C. Ionescu, A. Danu, H. Necula, A. Badea, publicat în revista „Energy and Buildings”, Nr. 94, 2015, pag. 227–239, ISSN 0378-7788.

2.4. ANALIZA ENERGIE TERMICE RECUPERATE PRIN IMPLEMENTAREA SISTEMULUI HVAC

După cum a fost descris în subcapitolul 2.2, sistemul HVAC al Casei Laborator este compus din două schimbătoare de căldură, și anume: un schimbător exterior sol-aer (EAHX) și un schimbător aer-aer (MVHR), ce au rolul de a pre-trata aerul de ventilație, scăzând astfel cantitatea de energie finală consumată. În acest capitol au fost analizate aceste două subsisteme componente din punct de vedere al energiei termice câștigate, realizându-se un bilanț energetic pentru perioada monitorizată.

Analiza a avut loc între 17 februarie și 13 mai 2015, când au fost interpretate datele oferite de senzorii T1 (temperatura exteroară), T_{ground} (temperatura solului), T2 (temperatura la ieșirea din sistemul EAHX) și T3 (temperatura la ieșirea din MVHR), amplasăți pe traseul sistemului HVAC conform Figurii 2.4. Perioada cuprinsă între februarie și mai oferă o variație semnificativă a temperaturii exteroare, permitând o analiză atât a perioadei de încălzire cât și în inter-sezon.

În vederea analizării energiei termice câștigate prin implementarea celor două schimbătoare de căldură, au fost calculate inițial puterile termice instantanee, utilizând relațiile de mai jos, în care variația de căldură latentă a putut fi variată, datorită faptului că procesele descrise au loc la un conținut de umiditate constant:

$$P_{\text{EAHX}} = V_{\text{EAHX}} \cdot \rho_{\text{aer.EAHX}} \cdot \Delta h_{\text{EAHX}} \quad (3.1.)$$

$$P_{\text{MVHR}} = V_{\text{MVHR}} \cdot \rho_{\text{aer.MVHR}} \cdot \Delta h_{\text{MVHR}} \quad (3.2.)$$

unde,

$$\Delta h_{\text{EAHX}} = c_{p_{\text{aer}(t_2)}} \cdot t_2 - c_{p_{\text{aer}(t_1)}} \cdot t_1 \quad (3.3.)$$

$$\Delta h_{\text{MVHR}} = c_{p_{\text{aer}(t_3)}} \cdot t_3 - c_{p_{\text{aer}(t_2)}} \cdot t_2 \quad (3.4.)$$

- P_{EAHX} – puterea termică a schimbătorului de căldură sol-aer [W]
- P_{MVHR} – puterea termică a schimbătorului de căldură aer-aer [W]
- V_x – debitul de aer proaspăt circulat prin sub sistemul considerat [$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$]
- Δh_x – diferența de entalpie a aerului între intrarea și ieșirea în subsistemul considerat [$\frac{\text{J}}{\text{Kg}}$]
- $\rho_{\text{aer},x}$ – densitatea aerului la temperatură medie în subsistemul considerat [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]
- $c_{p_{\text{aer}}}$ – căldura specifică a aerului la temperatură medie [$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$]
- t_1 – temperatură exteroară [$^{\circ}\text{C}$]
- t_2 – temperatură de ieșire din sistemul EAHX / de intrare în unitatea MVHR [$^{\circ}\text{C}$]
- t_3 – temperatură de ieșire din unitatea MVHR [$^{\circ}\text{C}$]

Densitatea aerului pentru fiecare schimbător de căldură a fost calculată considerând temperatură medie pe traseul respectiv, în timp ce căldura specifică a fost calculată pentru fiecare din cele trei temperaturi analizate.

2.4.1. Rezultatele analizei

Variația temperaturilor de interes în luna februarie este reprezentată în Figura 2.20. După cum se poate observa, temperatura exterioară prezintă o amplitudine mare, ea variind între $-5,3^{\circ}\text{C}$ și $14,3^{\circ}\text{C}$, în timp ce temperatura solului variază nesemnificativ în jurul valorii de $7,7^{\circ}\text{C}$. Temperatura de ieșire din EAHX (considerată și temperatura de intrare în MVHR) prezintă doar valori pozitive, indicând o eficiență crescută a sistemului. După transferul termic din interiorul unității MVHR, temperatura aerului proaspăt a înregistrat valori cuprinse între 10 și $17,6^{\circ}\text{C}$.

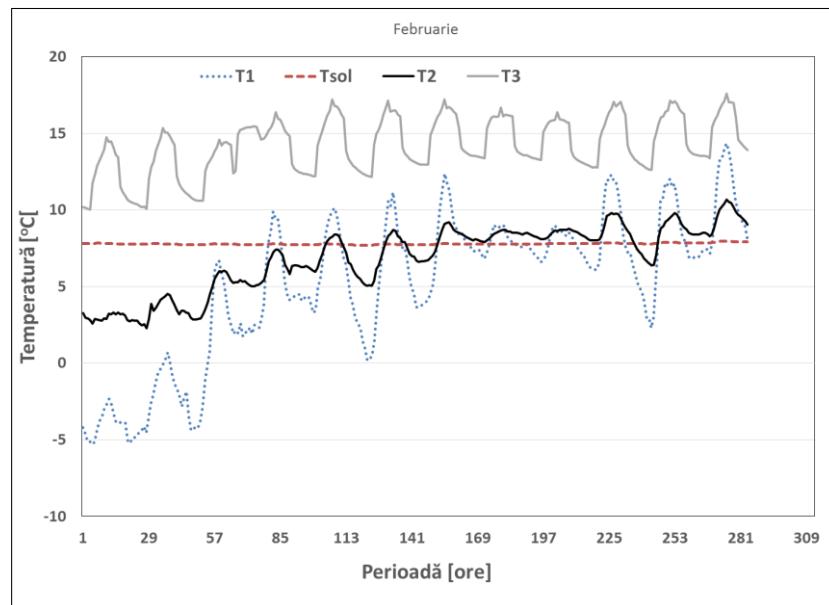


Figura 2.20. Variația temperaturii în sistemul HVAC în luna februarie [64]

Utilizând aceste valori, au fost calculate câștigurile termice oferite de sistemul HVAC, integrând puterea termică instantanee rezultată. În interiorul schimbătorului de căldură EAHX, funcție de diferența între temperaturile aerului și solului, fluxul termic poate fi transmis de la sol la aer (încălzind aerul) sau de la aer la sol (răcind aerul). Această variație a direcției de propagare a fluxului termic este cel mai des întâlnită în perioadele de tranziție între anotimpuri. Acest fenomen induce apariția unor fluxuri termice negative, rezultând o scădere a energiei termice câștigate de EAHX.

Energia termică câștigată prin intermediul sistemului EAHX în perioada analizată din februarie a fost de 33,4 kWh (Figura 2.21), având un maxim de 0.474 kWh. Această valoare maximă corespunde diferenței maxime dintre temperatura medie orară exterioară și cea a solului. Prin implementarea unității MVHR s-a câștigat un total de 111,5 kWh termici în perioada 17–28 februarie, rezultând un total furnizat de cele două subsisteme de 145 kWh.

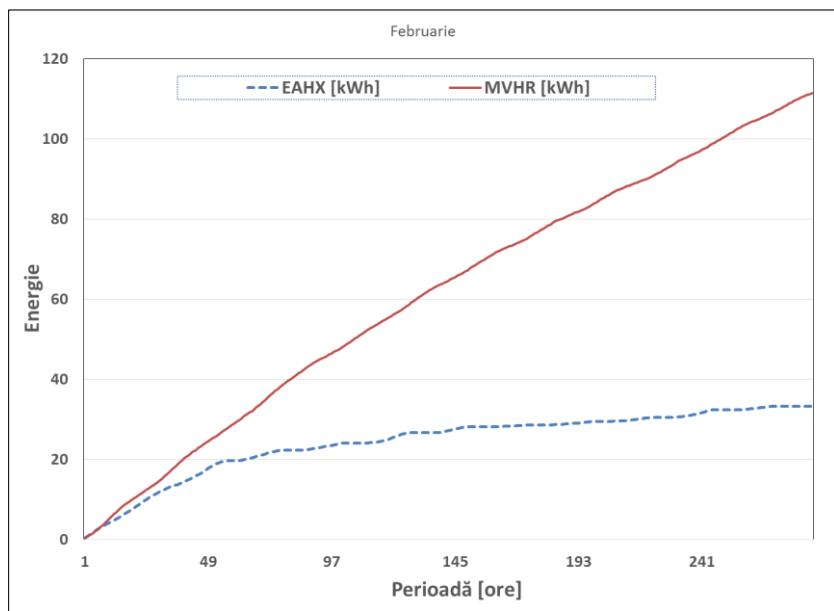


Figura 2.21. Energia termică câștigată de sistemul HVAC în luna februarie [64]

În perioada martie – aprilie, temperatura exterioară a variat între -0.9°C și 26°C , în timp ce temperatura solului a înregistrat o creștere ușoară față de perioada anterioară, înregistrând o valoare medie de 9.2°C (Figura 2.22). La ieșirea din MVHR, temperatura a înregistrat o variație între 11 și 21°C , indicând faptul că, pentru scurte perioade de timp, temperatura de confort poate fi atinsă fără utilizarea unui sistem activ de încălzire. În această perioadă, debitul de aer a variat între 95 și $166 \text{ m}^3/\text{h}$, în funcție de necesarul de aer în vederea obținerii confortului interior optim și de orarul de ocupare al clădirii.

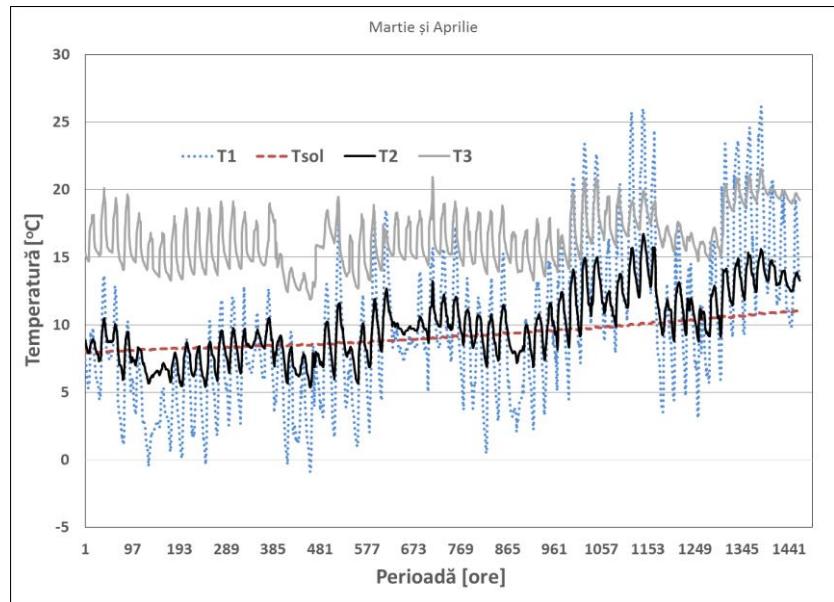


Figura 2.22. Variația temperaturii în sistemul HVAC în lunile martie și aprilie [64]

Datorită variațiilor mari ale temperaturii exterioare, puterea termică oferită de EAHX a înregistrat valori negative în 38% din timp, rezultând un total energetic util de 109 kWh pe cele două luni în discuție. Puterea termică câștigată în recuperatorul de căldură a variat între 0,134 și 0,597 kW, iar totalul de energie a fost de 456 kWh, rezultând 565 kWh termici furnizați de cele două subsisteme (Figura 2.23).

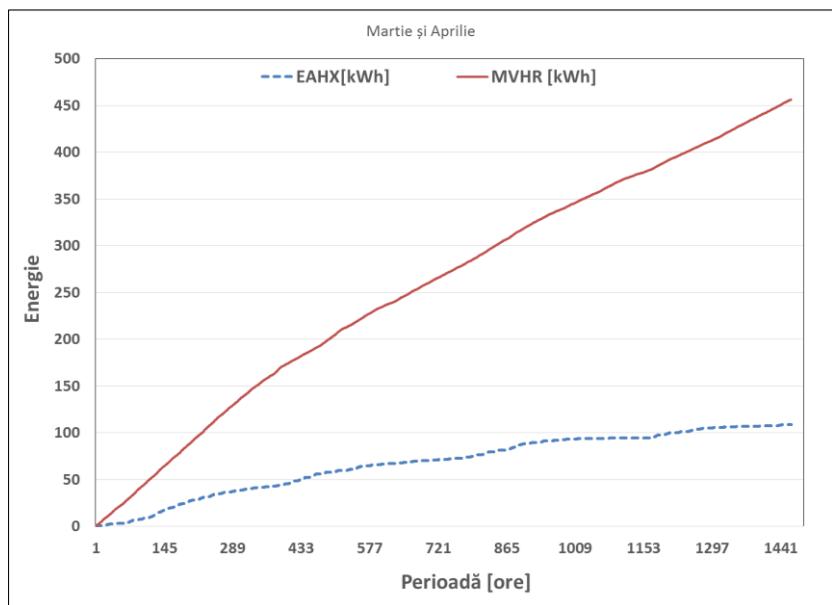


Figura 2.23. Câștigurile de energie termică oferite de sistemul HVAC în lunile martie și aprilie [64]

În luna mai, temperatura exterioară a înregistrat valori cuprinse între 11,2 și 29,3°C și în majoritatea orelor monitorizate a fost superioară temperaturii solului (care a variat între 11 și 12,2 °C). După cum se poate observa în Figura 2.24, temperatura aerului la ieșirea din unitatea MVHR are valori care se situează în intervalul de asigurare a confortului termic, rezultând faptul că în inter-sezon, utilizarea unui sistem suplimentar de încălzire (rezistență electrică) nu este întotdeauna necesară.

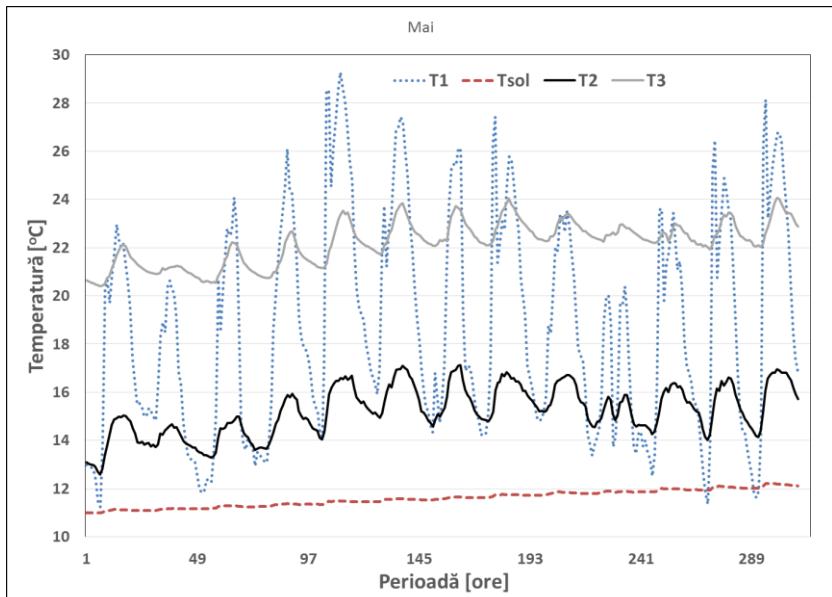


Figura 2.24. Variația temperaturii în sistemul HVAC în luna mai [64]

Datorită variației temperaturii exterioare, puterea termică dată de sistemul EAHX este în proporție de 76% negativă - fluxul termic se propagă de la aer către sol (Figura 2.25). Datorită acestui fenomen termic, energia câștigată de sistemul EAHX în luna mai, a fost de doar 2,7 kWh, în timp ce, datorită unității MVHR, energia termică totală oferită de sistem a fost de 124 kWh.

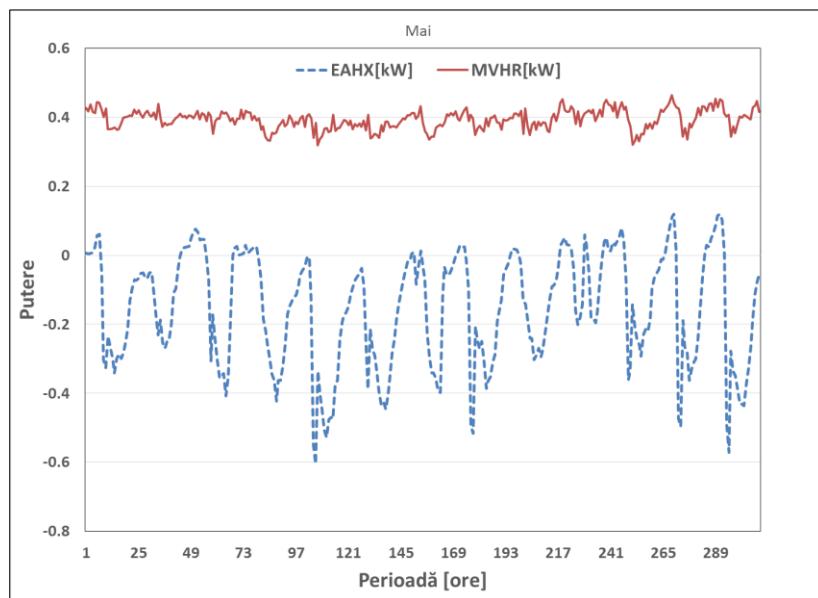


Figura 2.25. Variația sarcinilor termice ale sistemului HVAC în luna mai [64]

Se poate observa faptul că eficiența sistemului EAHX este direct proporțională cu diferența de temperatură pe tronson (dintre temperatura solului și cea exterioară). În perioadele când cele două temperaturi au valori apropiate, puterea termică câștigată de sistem este minimă, ea având valori negative în momentul în care temperatura exterioară este mai mare decât cea a solului. Acest fenomen stă la baza răcirii aerului de ventilație în perioadele de vară, când câștigul termic este reprezentat de cantitatea de energie transferată de aer către sol.

Sub-sistemele analizate oferă un procent semnificativ din energia totală necesară obținerii temperaturii de confort interior. Astfel, în perioada analizată, sistemul EAHX a contribuit cu 8,5% în bilanțul total de energie utilizată pentru încălzire în casa pasivă. Unitatea MVHR a contribuit cu aproximativ 34%, în timp ce un procent de 57,5% este oferit de elementul electric. Energia termică câștigată prin implementarea sistemelor de preîncălzire a aerului proaspăt a redus aşadar energia totală utilizată pentru încălzirea aerului cu peste 42% comparativ cu ipoteza în care încălzirea s-ar efectua integral electric. În Figura 2.26 se poate observa faptul că energia termică oferită de sub-sistemul EAHX este invers proporțională cu temperatura exterioară. Rezistența electrică a fost oprită spre sfârșitul perioadei, când, datorită inerției termice ridicate a clădirii, aportul energetic adus de aceasta nu a mai fost necesar. În această perioadă, 16 aprilie – 13 mai, temperatura de confort termic a fost furnizată exclusiv de sistemul HVAC (sistemul EAHX și unitatea MVHR).

În perioada 10–15 aprilie temperatura exterioară medie zilnică a înregistrat valori peste 10°C, observându-se în ultimele trei zile că aportul elementului electric nu mai este necesar. Datorită inerției termice mari a clădirii, aceasta poate menține temperatura de confort interioară, chiar și în condițiile unei scăderi a temperaturii exterioare, caz întâlnit în perioada imediat următoare (21–23 aprilie).

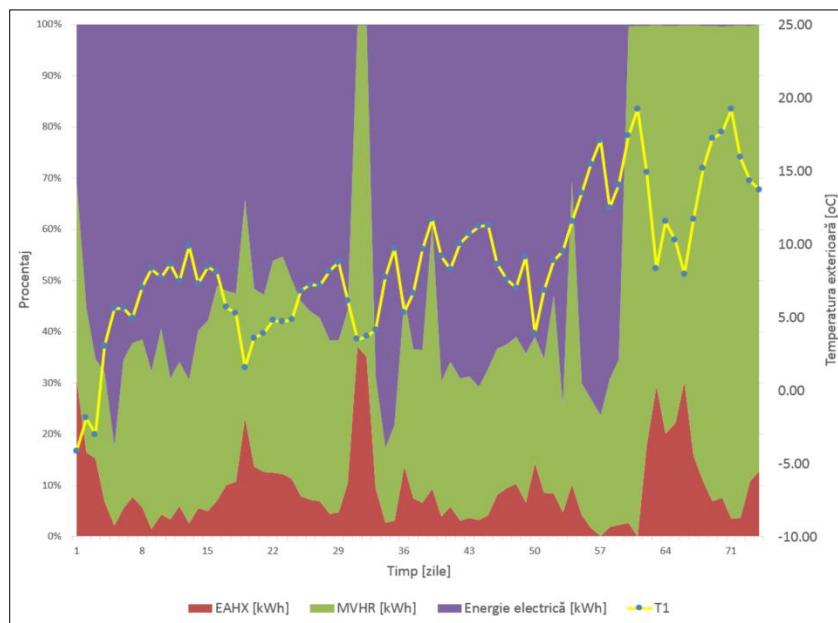


Figura 2.26. Procentul de energie utilizat în vederea obținerii temperaturii interioare de confort [64]

2.4.2. Concluzii

În acest subcapitol s-a studiat comportamentul termic al sistemului de încălzire al casei pasive din incinta Universității POLITEHNICA din București. Clădirea este echipată cu două schimbătoare de căldură (sol-aer și aer-aer), ce oferă un procent semnificativ din puterea termică necesară pentru obținerea temperaturii de confort. Beneficiile utilizării unui astfel de sistem în vederea climatizării unei clădiri sunt cuantificate prin puterea termică transmisă în sub-sistemele componente (EAHX și MVHR).

Temperatura exterioară a înregistrat variații semnificative în perioada monitorizată (17 februarie–13 mai), având un minim de -13°C și un maxim de aproximativ 30°C, dar amplitudinea acesteia a fost redusă prin implementarea subsistemului EAHX. Temperatura de ieșire din acesta, respectiv de intrare în subsistemul MVHR a fost întotdeauna pozitivă, indicând faptul că schimbătorul de căldură sol-aer are și rolul de a proteja la îngheț echipamentele din aval, el funcționând ca un mediu de amortizare termică.

În perioada studiată, utilizarea sub-sistemelor asigură un procent semnificativ din energia necesară asigurării confortului termic al clădirii. Astfel, prin implementarea sistemului HVAC s-a obținut un câștig de 710,5 kWh termici (142,5 kWh în EAHX și 568 kWh în MVHR), reprezentând aproximativ 42% din totalul energiei utilizate pentru asigurarea confortului interior în casa studiată. Randamentul subsistemului EAHX este puternic influențat de diferența între temperatura aerului exterior și a solului.

S-a observat faptul că sistemul activ de încălzire (rezistență electrică) devine inutil în momentul în care temperatura exterioară medie a înregistrat valori de peste 10°C în mai mult de 3 zile consecutive. Elementele pasive pot asigura menținerea temperaturii de confort, chiar dacă, pentru scurte perioade de timp, temperatura exterioară scade sub valoarea de 10°C.

Diseminarea rezultatelor din acest subcapitol a fost făcută prin intermediul articolului intitulat „Gestiunea eficientă a energiei termice într-o clădire cu consum redus de energie / The efficient management of thermal energy gained in a low energy building”, autori: B. Cărăușăiu, C. Ionescu, H. Necula, A. Badea, acceptat spre publicare în revista „Calitatea-acces la succes / Quality-Access to Success”, Vol.16, Nr. 149, 2015, ISSN 1582-2559.

CAPITOLUL 3.

SIMULĂRI DINAMICE PRIVIND COMPORTAMENTUL ENERGETIC AL CASEI PASIVE UPB

Ponderea mare de energie consumată în sectorul clădirilor este datorată în principal componentei HVAC, responsabilă cu peste 50% din energia consumată într-o clădire standard [7]. Operarea eficientă a sistemului HVAC reprezintă aşadar unul din factorii esențiali în vederea reducerii consumului de energie. Studiile efectuate de către Departamentul de Energie al SUA (US Department of Energy [65]) au indicat faptul că majoritatea clădirilor prezintă curențe în modul de operare a sistemului HVAC, rezultând într-o scădere a confortului interior și o risipă a energiei utilizate. De exemplu, între 4 și 20% din energia utilizată în clădirile din Statele Unite ale Americii s-a datorat diverselor probleme în operarea sistemelor HVAC și de iluminat [65]. Se poate afirma faptul că alegerea strategiei optime de funcționare a sistemelor componente ale clădirii este esențială în creșterea eficienței energetice a sectorului. Aceste strategii de eficientizare pot fi analizate cu ajutorul unor estimări (predicții) ale consumului de energie într-o clădire, prin realizarea unor modele matematice ce satisfac similaritatea cu sistemul analizat. Estimarea consumului de energie a devenit, aşadar, un element fundamental în analiza strategiilor în vederea îmbunătățirii performanțelor energetice ale clădirilor.

Sistemele clădirii sunt, în general, sisteme complexe neliniare deoarece ele sunt influențate puternic de o gamă variată de factori: tipul și geometria clădirii, condiții meteorologice, modalități de operare și utilizare, orar de operare și ocupare, etc. Datorită complexității problemei, o estimare precisă a consumului de energie este relativ dificil de realizat. În literatura de specialitate, pentru simplificarea problemei, formele de energie utilizate în operarea unei clădiri sunt: energia necesară pentru încălzirea/răcirea spațiului interior, energia necesară pentru prepararea apelor calde menajere și energia electrică [66].

Modelele matematice ce pot estima în mod dinamic consumul dintr-o clădire sunt esențiale pentru dezvoltarea strategiilor optime de control și operare în vederea creșterii confortului termic interior și minimizarea necesarului de energie. Literatura de specialitate în domeniul modelării energetice a clădirilor pune accent pe trei abordări de bază [67]:

- modelare pe termen *lung* a necesarului de energie (în proiectarea sistemului HVAC);
- modelare pe termen *mediu* a necesarului de energie (în întreținerea sistemului HVAC);
- modelare pe termen *scurt* a necesarului de energie (în optimizarea modului zilnic de operare, planificări, etc.).

Totodată, modelarea dinamică pe termen scurt a consumului de energie într-o clădire, în funcție de tipul abordării matematice alese, poate fi clasificată în: modele *white–box*, *black–box* și *gray–box*. Deoarece metodele de simulare dinamică sunt bazate pe abordarea *white–box*, în acest capitol acestea vor fi tratate exhaustiv.

Metodele *white–box*, denumite în literatură și *metode ingineresci* sau *abordări directe*, sunt metode pur fizice ce utilizează sisteme de ecuații complexe în vederea modelării sistemelor și subsistemelor ce intră în componența unei clădiri, cu scopul de a estima comportamentul acestora, consumul de energie și factorii de confort interior. Datorită sistemului complex de ecuații matematice utilizate, abordarea *white–box* poate estima eficient dinamica clădirii și implicit efectele în schimbarea unei strategii de operare a sistemelor [67,68]. Rezolvarea analitică a ecuațiilor ce guvernează consumul de energie într-o clădire este dificilă, dacă nu imposibilă, apărând astfel necesitatea dezvoltării unor software-uri specifice, dezvoltate și îmbunătățite constant, cum ar fi: EnergyPlus [69], ESP-r [70], TRNSys [71], ce utilizează datele meteorologice, descrieri detaliate privind clădirea și un set de ecuații complexe în vederea determinării bilanțului energetic și confortului interior. Pe site-ul Departamentului Energetic al

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

USA se poate găsi o listă, actualizată în mod constant, ce conține toate programele ce pot fi utilizate în domeniul [72].

Cu toate că aceste unelte elaborate sunt eficiente și pot estima cu precizie comportamentul energetic al unei clădiri în funcție de modul de operare, acestea sunt dificil de implementat, rezolvat și interpretat, necesitând în cele mai multe cazuri intervenția unui personal instruit. Din moment ce modelele ce compun software-urile dedicate sunt bazate pe principii fizice, în vederea obținerii unui rezultat cu erori minime, acestea necesită, drept date de intrare, o descriere detaliată a proprietăților termo-fizice ale clădirii, a sistemului HVAC utilizat și a datelor meteorologice. Aceste date sunt, de cele mai multe ori, greu sau imposibil de procurat, mai ales pentru clădirile vechi sau de dimensiuni mari ce servesc unor utilizări multiple. În plus, efortul depus în vederea colectării datelor nu este justificabil, iar imprecizia inputurilor utilizate produce erori mari de estimare. În plus, calibrarea modelului este dificil de realizat cu o informație minimă oferită de senzorii cu care este echipată o clădire standard (termometre și wattmetre) [68].

Fluxul general de date și procedura de calcul care stau la baza dezvoltării și simulării unui model white-box sunt prezentate în Figura 3.1. Inputurile sunt compuse din datele meteo caracteristice amplasamentului respectiv (temperatură exterioară, radiație solară, viteza vântului, etc.), descrierea detaliată a clădirii (geometrie, orientare, factori de umbră, caracteristici termo-fizice ale anvelopei, etc.), sistemele și echipamentele componente (sisteme HVAC, panouri solare, panouri PV, etc.). Motorul de simulare este format din sistemul complex de ecuații matematice cu ajutorul căruia este simulația modul de operare al clădirii (și sistemelor componente) și calculată ieșirea modelului, constituită în mod ușual din energia consumată și de factori de confort interior.

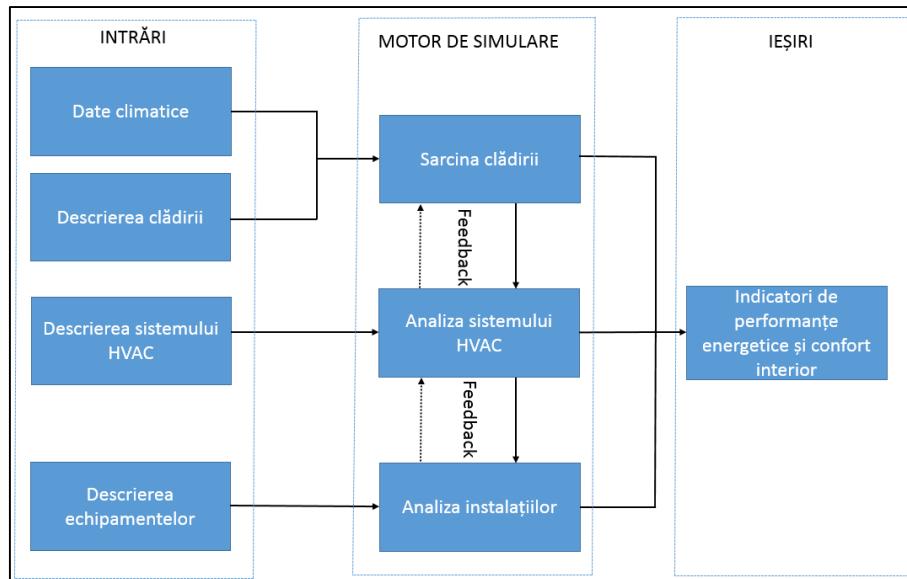


Figura 3.1. Fluxul general de date în interiorul unui model white-box [67]

În ultima vreme cercetătorii au propus o serie de alternative în vederea minimizării dezavantajelor întâlnite la implementarea modelelor white-box, dezvoltând o serie de ipoteze ce au rolul de a simplifica și reduce numărul mare al parametrilor de intrare.

Ținând cont de influența majoră pe care datele climatice o au în acuratețea modelului matematic, anumite studii s-au axat pe simplificarea acestora. Astfel, White și Reichmuth [73] au utilizat o abordare bazată pe temperaturi medii lunare, obținând o acuratețe mai mare în estimarea consumului de energie lunar pentru încălzire și răcire, comparând cu metodele existente, bazate pe metoda *grade-zile* (metodă statică) și metoda *coșului de temperatură* (metodă dinamică). Westphal și Lamberts [74] au estimat consumul de energie anual într-o clădire din sectorul terțiar, bazându-se pe câțiva parametri atmosferici (temperatura maximă și

minimă lunară, presiunea atmosferică, nebulozitatea și umiditatea relativă). Etapa de validare a modelului a constat în compararea rezultatului modelului simplificat cu rezultatele software-urilor dedicate simulării dinamice (DOE-2, BLAST), iar acuratețea de estimare a fost satisfăcătoare. În privința simulării energiei consumate de o clădire, Yao și Steemers [75] au dezvoltat o metodă simplificată ce poate estima profilul zilnic al consumului de energie în clădirile din sectorul rezidențial. Energia consumată în clădire a fost împărțită pe fiecare consumator important în parte (electrocasnice, producere apă caldă menajeră și încălzire), iar fiecare componentă a fost modelată separat, utilizând atât abordări statistice, cât și matematice.

Utilitatea dezvoltării modelelor complexe white-box este demonstrată prin reducerea consumului de energie în clădirile în care acestea au fost implementate și combinate cu sistemul BAS al clădirii (Building Automation System–Sistemul de Automatizare al Clădirii). În funcție de rezultatele simulării, sistemul BAS poate lua cele mai bune decizii în operarea sistemelor clădirii pentru a atinge eficiență maximă posibilă. În această privință, Wetter și Haves [76] au dezvoltat un program terț (BCVTB–Building Controls Virtual Test Bed) ce permite transferul bidirectional de date între programele de simulare și sistemul de control al clădirii. Utilizând acest program în vederea creării unei legături între EnergyPlus și mediul Matlab, cu ajutorul căruia fost implementat un Model de Control Predictiv (MPC–Model Predictive Control), Ma et al. [77] au reușit să reducă consumul de energie cu 25,3% și cu 28,5% costurile, într-o clădire comercială din Chicago. Acest lucru a fost posibil prin minimizarea unei funcții obiectiv economice, implementată direct în controlerul dezvoltat în Matlab. Un alt program ce permite optimizarea controlului sistemelor într-o clădire este Genopt, dezvoltat de Wetter și utilizat de Coffey et al. [78] în vederea combinării unui algoritm genetic modificat cu un model realizat în EnergyPlus. Acest model complex a fost utilizat în studierea comportamentului energetic al unei clădiri de birouri încălzită progresiv cu ajutorul unui controler MPC.

3.1. DESCRIEREA PROGRAMELOR UTILIZATE

În vederea simulării comportamentului energetic al caselor pasive UPB au fost folosite o serie de programe dedicate, printre care EnergyPlus, cu ajutorul căruia a fost estimat necesarul de energie pentru încălzire și răcire, PHPP pentru estimarea consumului total de energie a Casei Laborator și PVsyst pentru simularea producției de energie a sistemelor instalate pe amplasament.

3.1.1. *EnergyPlus*

EnergyPlus este un instrument de simulare ”bazat de text”, cu ajutorul căruia sunt create și înmagazinate informații despre condițiile pe frontieră și sistemele clădirii în interiorul unui fișier text având formatul IDF (Input Data File). Software-ul a fost dezvoltat de Departamentul de Energie al SUA. EnergyPlus este un software modular ce permite calculul necesarului de energie pentru încălzirea și răcirea unei locuințe, funcție de sistemul energetic ales, proprietățile termice ale anvelopei, condiții meteorologice, etc. Acest lucru este realizat prin simularea dinamică a clădirii studiate și sistemelor energetice componente când acestea sunt expuse diferitelor condiții operaționale și meteorologice [79]. Printre caracteristicile principale ale programului de simulare se numără:

- Crearea de soluții integrate, simultane pentru răspunsurile clădirii, sistemelor și subsistemelor componente (putând fi utilizate și soluții iterative pentru convergența rezultatului);
- Utilizarea unui pas de timp definit de utilizator (poate fi setat și la valori mai mici de o oră) pentru interacțiunea dintre zonele termice, factorii de mediu și sistemele HVAC;
- Fișiere de intrare bazate pe text ASCII și posibilitatea alegerii de către utilizator a tipului de raport de ieșire;
- Calculul conductionei termice prin anvelopă în regim dinamic utilizând funcții de transfer;

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

- Modelarea transferului termic prin pardoseala clădirii, utilizând modele dinamice, tridimensionale, bazate pe principiul diferențelor finite.
- Modelarea combinată a transferului de masă și căldură ce stă la baza proceselor de adsorbție și desorbție a umezelii, prin utilizarea metodei de integrare strat-cu-strat a envelopei termice a clădirii sau a metodei EMPD (Effective Moisture Penetration Depth);
- Modele de estimare a confortului interior, bazate pe activitatea ocupanților și factori de confort interior (temperatură, umiditate, concentrație de CO₂, etc.);
- Model de calcul a radiației solare pe suprafețe inclinate;
- Modelarea sistemelor HVAC;
- Calculul avansat pentru suprafețele vitrate, ce include jaluzele controlabile, bilanț energetic calculat pentru fiecare strat al geamului, calculul energiei solare absorbite prin suprafața vitrată și o librărie ce conține un număr mare de suprafețe vitrate existente pe piață [80].

Interfața programului EnergyPlus este prezentată în Figura 3.2, fiind compusă din fișierele de intrare și date meteo, ce sunt încărcate ținând cont de adresa de stocare din calculatorul utilizat. Fișierul de intrare (fișierul IDF) conține date introduse de utilizator cu referire la: parametrii simulării, locație și climă, orare de ocupare, elementele de construcție a suprafețelor envelopei, zone și suprafețe termice, algoritmi de calcul pentru coeficientii de convecție și conducției prin elementele envelopei, aporturi interne de căldură, sistem HVAC, controlere, sisteme bazate pe surse regenerabile, modalități de raportare a rezultatelor, etc. Acestea se pot edita cu ajutorul opțiunilor "Edit-IDF Editor" și "Edit-Text Editor".

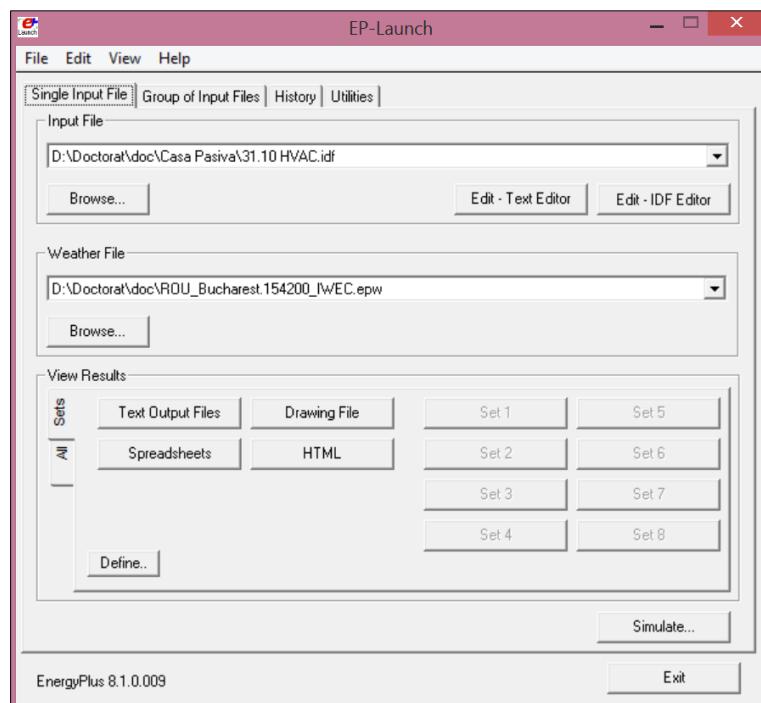


Figura 3.2. Interfața programului EnergyPlus

În vederea simulării dinamice a performanțelor energetice a clădirii, programul EnergyPlus utilizează un fișier de date meteo sintetice în format EPW (EnergyPlus Weather). Aceste date sunt calculate pe baza datelor meteorologice colectate și prelucrate într-o perioadă lungă de timp (peste 18 ani) de către ASHRAE (Asociația Americană a Inginerilor pentru Sisteme de Încălzire, Răcire și Condiționare a Aerului). Fișierul conține informații orare despre temperatura exterioară, temperatura punctului de rouă, umiditatea relativă, presiunea atmosferică, radiația solară globală, difuză și directă, viteza și direcția vântului, gradul de înnorare, etc.

Fiind un program de simulare bazat pe text, ce nu oferă utilizatorilor o interfață grafică apără necesitatea utilizării unui mediu pentru editarea geometriei clădirii. Pentru acest lucru este folosit programul Google SketchUP ce permite proiectarea tridimensională a clădirii. Google SketchUP este un program de grafică 3D, utilizat de o gamă largă de utilizatori pentru crearea schițelor, texturare, mapare UV, etc. Pentru a facilita interconexiunea celor două programe, Laboratorul Național pentru Energie Regenerabile al SUA a dezvoltat software-ul Open Studio, ce se va regăsi, după instalare, în interfața grafică a programului Google SketchUp sub forma unui plug-in. Cu ajutorul acestui program trept se pot importa fișiere IDF, ce conțin date caracteristice ale anvelopei clădirii, orare de funcționare, etc, după care se poate construi geometria clădirii, creând fiecare componentă într-o zonă termică separată. Open Studio permite vizualizarea rezultatelor direct în mediul grafic sau salvarea lor în fișierul IDF, care poate fi analizat în prealabil. În Figura 3.5 este reprezentată geometria casei pasive UPB realizată utilizând cele trei software-uri prezentate.

Pentru a realiza simulările dinamice utilizând mediile software prezentate, a fost adoptată următoarea strategie:

- S-a editat fișierul de intrare (IDF) în programul EnergyPlus. Aici au fost introduse date privind: algoritmi de calcul, caracteristicile termice și fizice ale elementelor anvelopei (fiind compuse apoi în structuri-pereți, pardoseală, acoperiș, ferestre, etc.), număr de ocupanți, tipul de sistem HVAC, perioadă de operare, temperaturi dorite, parametrii de ieșire, etc.
- Fișierul IDF editat a fost importat în Google SketchUP, cu ajutorul plug-in-ului Open Studio, fiind posibilă crearea geometriei clădirii. Fiecare cameră a fost creată într-o zonă termică separată, lipind între ele componente comune. După crearea geometriei, aceasta este salvată în fișierul IDF prin intermediul programului de conectare Open Studio.
- Noul fișier este simulat în EnergyPlus, după ce a fost verificat. Rezultatele pot fi vizualizate în formatul dorit.

3.1.2. *Passive House Planning Package (PHPP)*

Dezvoltat de Institutul Caselor Pasive (PHI) din Darmstadt în 1998, PHPP (Passive House Planning Package) este un modul de calcul al performanțelor energetice, realizat în Microsoft Excel. Acesta pachet de foi de calcul este utilizat în vederea certificării clădirii studiate drept clădire pasivă. Printre rezultatele calculului, se pot aminti [81]:

- Necesarul anual de energie pentru încălzire [$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$] și sarcina maximă de încălzire [W/m^2];
 - Necesarul anual de energie pentru răcire [$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$] și sarcina maximă de răcire [W/m^2] – în cazul existenței unui sistem activ;
 - Confortul interior pe timpul verii – în cazul răcirii pasive și frecvența de supraîncălzire [%];
 - Necesarul de energie primară și necesarul de energie provenită din surse regenerabile de energie – în vederea realizării cerințelor NZEB [$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$];
 - Evaluarea potențialului amplasamentului de producere a energiei din surse regenerabile [$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$].

Ca date de intrare, PHPP utilizează o descriere detaliată a caracteristicilor clădirii privind arii, volume, alcătuirea pereților, valorile punților termice, tipul și performanțele echipamentelor de instalație componente, numărul și tipul electrocasnicelor, numărul ocupanților și date climatice. În vederea determinării performanțelor clădirii studiate, PHPP utilizează două metode statice de calcul a necesarului de energie pentru încălzire și răcire (metoda anuală și metoda lunară), conform Standardului European EN 13790, cu privire la performanțele energetice ale clădirilor. Confortul termic în sezonul rece este analizat prin prisma aporturilor termice provenite de la radiația solară și din surse interne (echipamente,

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică locuitori), în timp ce, elementele de umbrire au o contribuție majoră la minimizarea supraîncălzirii casei.

Cu ajutorul foilor de calcul se poate estima în regim staționar energia necesară pentru încălzire și răcire, câștigurile termice totale, potențialul amplasamentului de utilizare a surselor regenerabile de energie precum și realizarea strategiilor de reducere a consumului de energie (utilizarea ventilației naturale pe timp de vară în vederea răcirii pasive a clădirii). Datele de verificare a cerințelor obligatorii în vederea estimării sunt centralizate pe prima pagină a modulului de calcul pentru a facilita accesul.

În urma calculului realizat de Anastasiu et al. [82] s-a constatat faptul că peste 55% din energia termică necesară preparării apei calde menajere este acoperită de energia solară a amplasamentului, aceasta contribuind cu $18 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ în necesarul total de energie al Casei Laborator. Panourile PV amplasate pe acoperișul clădirii pot produce, într-un an caracteristic, $178 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Aparatura electrocasnică iluminatul și sistemul HVAC consumă aproximativ $70 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ energie primară, în timp ce necesarul total de energie în vederea operării clădirii este de $119 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Câștigurile termice totale sunt de $2,1 \text{ W/m}^2$, ceea ce conduce la un necesar de energie pentru încălzire (la o temperatură de referință de 20°C) de doar $12 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$, valoare sub cerințele standardului PH ($15 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$). Pentru perioada de răcire, simpla montare a elementelor de umbrire și adoptarea strategiei de răcire pe timpul nopții poate menține temperatură operațională de 25°C fără montarea unui sistem activ de răcire (Figura 3.3).

Specific Demands with Reference to the Treated Floor Area	
Treated Floor Area:	<input type="text" value="140.0"/> m ²
Applied:	Monthly Method
Specific Space Heat Demand:	12 kWh/(m ² a)
Pressurization Test Result:	0.5 h ⁻¹
Specific Primary Energy Demand (DHW, Heating, Cooling, Auxiliary and Household Electricity):	119 kWh/(m ² a)
Specific Primary Energy Demand (DHW, Heating and Auxiliary Electricity):	75 kWh/(m ² a)
Specific Primary Energy Demand Energy Conservation by Solar Electricity:	178 kWh/(m ² a)
Heating Load:	15 W/m ²
Frequency of Overheating:	0 %
Specific Useful Cooling Energy Demand:	1 kWh/(m ² a)
Cooling Load:	1 W/m ²
PH Certificate:	15 kWh/(m²a) 0.6 h ⁻¹ 120 kWh/(m ² a)
Fulfilled?	Yes Yes Yes
over	25 °C 15 kWh/(m ² a)

Figura 3.3. Detaliu privind calcularea necesarului de energie pentru încălzire și răcire utilizând PHPP

3.1.3. Photovoltaic System Software (PVsyst)

PVsyst (Photovoltaic System Software) este un software dedicat simulării, dimensionării și analizei sistemelor de producere a energiei electrice cu ajutorul panourilor fotovoltaice. Cu ajutorul lui pot fi analizate sisteme PV conectate la o rețea de transport a energiei electrice, sisteme independente (ce utilizează baterii în vederea înmagazinării energiei produse), dar și integrarea acestora în sisteme de pompare, utilizând date meteorologice ale amplasamentului și o bază de date cuprinzătoare, compusă din modele de sisteme PV aflate pe piață [83].

Software-ul este gândit ca un sistem pe 3 nivele de studiu prin care se dorește o transpunere în mediul virtual a etapelor de urmat în vederea dezvoltării proiectelor reale a sistemelor PV. Cei trei pași de urmat în realizarea unui proiect în PVsyst sunt [83]:

- *Proiectarea preliminară.* Acest modul permite o evaluare rapidă, lunată, a performanțelor panourilor PV analizate, utilizând doar generalități privind caracteristicile sistemului. De asemenea, se poate realiza o estimare grosieră a costului de implementare a sistemului. În vederea realizării unui sistem integrat într-o clădire (conectat la rețeaua de electrificare existentă), este suficientă introducerea unor informații legate de amplasament (suprafață, umbrire, etc.), tehnologia panourilor PV (culoare, transparentă, etc.) și puterea

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

necesară (sau investiția dorită). Pentru sistemele independente, unde apare necesitatea utilizării unui sistem de stocare a energie produse, modulul permite, pe lângă dimensionarea sistemului PV, și dimensionarea capacitații sistemului de înmagazinare, ținând cont de profilul sarcinii și de probabilitatea ca utilizatorul să nu fie satisfăcut.

- *Proiectarea detaliată.* În acest modul este posibilă o proiectare amănunțită a sistemului, utilizând o simulare detaliată cu pas orar. În cadrul modulului detaliat se pot realiza mai multe simulări utilizând diferiți parametri ai panourilor și este posibilă o comparație în vederea alegerii soluției optime, ce poate satisface necesitățile utilizatorului cu un cost minim al investiției inițiale. Datele de intrare trebuie să conțină, pe lângă cele din cazul simplificat, orientarea panourilor (rezultând posibilitatea de a simula și panouri PV flexibile sau diferite scenarii de umbrărire a acestora) și alegerea componentelor specifice ale sistemului. În cadrul acestui modul, prin introducerea informațiilor suplimentare, se poate analiza sistemul și din alte puncte de vedere, cum ar fi: comportamentul termic (în vederea implementării unui sistem de răcire sau de preparare apă caldă menajeră), diverse pierderi ale sistemului (prin cablaj, datorate unghiului de orientare, umbririi parțiale sau totale datorată corpurilor înconjurătoare), etc. De asemenea, se poate realiza o evaluare economică detaliată.

- *Analiza sistemului bazată pe date reale.* Acest modul permite validarea modelului, în cazul în care există un sistem de monitorizare a sistemului real. Modulul permite importarea datelor măsurate (introduse în format ASCII) în vederea realizării unei comparații între modelul detaliat și performanțele reale ale sistemului.

Adițional, software-ul include un modul de management al bazelor de date utilizate (datele meteo și datele tehnice ale panourilor PV), cu ajutorul căruia se pot realiza operații de import date climatice (din diferite surse, inclusiv grafice, tabele, modele matematice, etc.), modificarea parametrilor geometrici ai panourilor existente în baza de date, realizarea unor scenarii de optimizare a sistemului prin ajustarea orientării și a tensiunii de operare, etc. Interfața programului este prezentată în Figura 3.4.



Figura 3.4. Interfața software-ului PVsyst și a modulului *Project Design*

După selectarea modului de simulare dorit și a tipului de sistem analizat, se va introduce zona climatică de care aparține amplasamentul, selectând din baza de date țara și orașul. PVsyst utilizează date climatice oferite de către MeteoNorm, centralizate într-un fișier ce conține peste 30 de parametri climatice (direcția și viteza vântului, intensitatea radiației solare, luminozitatea, umiditatea relativă, durata zilei, temperatura exterioară la o altitudine de 2m, presiunea atmosferică, factorul de turbiditate, etc. [84]). Următorul pas în realizarea unei simulări constă în alegerea parametrilor de intrare, formați din parametri obligatori (orientarea și detaliile

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică tehnice ale panourilor) și parametri optionali (editarea liniei orizontului amplasamentului și introducerea elementelor de umbrire).

3.2. SIMULAREA DINAMICĂ A NECESARULUI DE ENERGIE PENTRU ÎNCĂLZIRE ȘI RĂCIRE

În vederea simulării necesarului de energie pentru încălzirea și răcirea Casei Laborator a fost utilizat programul EnergyPlus 7.0, în timp ce geometria clădirii a fost realizată în Google SketchUP, cu ajutorul programului de legătură Open Studio, prezentate în paragraful 3.1.1. În Figura 3.5 este prezentată schița clădirii realizată în Google SketchUP.

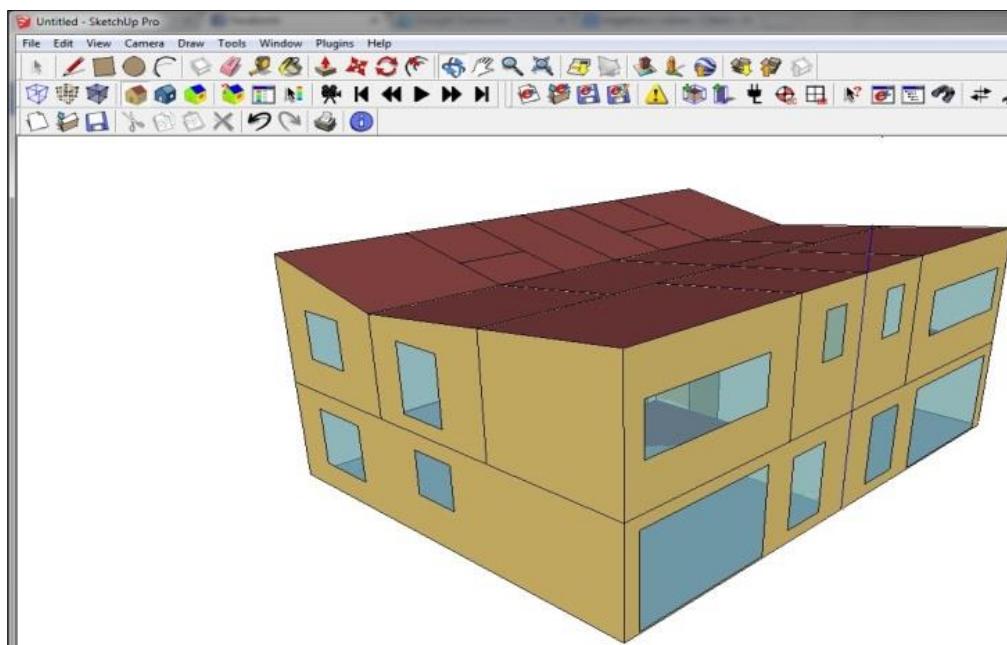


Figura 3.5. Schița duplexului realizată în Google SketchUP (vedere sud-vest) [62]

Software-ul de simulare utilizează date meteorologice sintetice, în format IWEC (International Weather for Energy Calculations), fișierul conținând date orare despre temperatura exterioară, radiația solară, viteza vântului, etc. Variația temperaturii exterioare a orașului București utilizată în vederea realizării simulărilor este prezentată în Figura 3.6. și se poate observa o amplitudine între -10°C în ianuarie și 35°C .

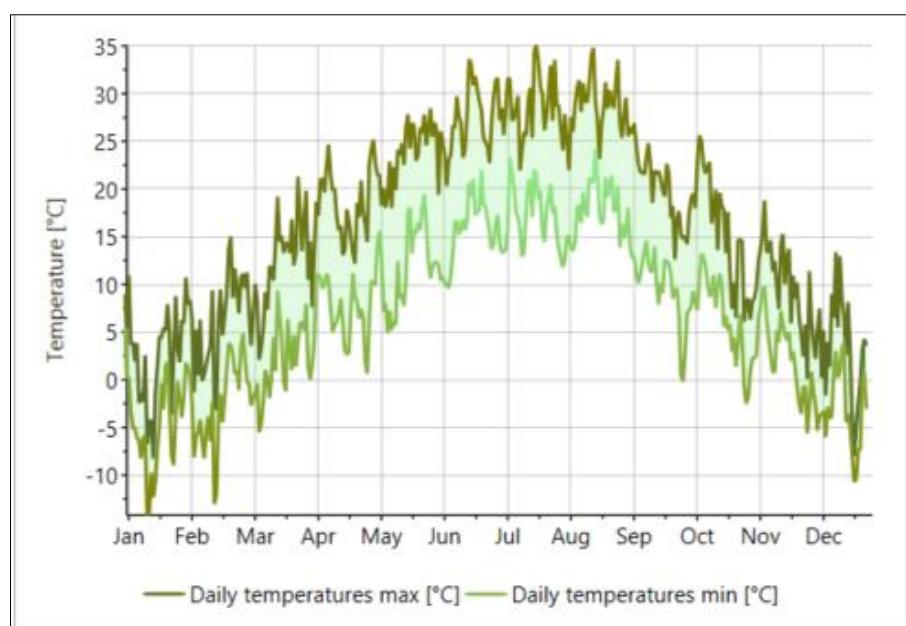


Figura 3.6. Temperatura exterioară orară caracteristică orașului București simulată în MeteoNorm

Ca prim experiment, clădirea a fost simulată fără a ține cont de existența unui sistem HVAC (a fost simulația modul *"free-running temperature"*, metodă utilizată în principal în vederea adoptării soluției optime de eficientizare a consumului de energie într-o clădire). În Figura 3.7 este prezentată temperatura orară înregistrată în livingul Casei Laborator. Se poate observa faptul că temperatura minimă este superioară valorii de 5°C (datorită capacitatei termice a clădirii și a câștigurilor termice, temperatura interioară prezintă valori pozitive și pe timpul iernii), în timp ce, pe timpul verii, datorită radiației solare și suprafeței vitrate mari pe zona sudică, temperatura înregistrează valori superioare celei exterioare. În vederea realizării unei comparații, în Figura 3.7 a fost reprezentat și consumul de energie pentru încălzire, în ipoteza implementării unui sistem HVAC ideal.

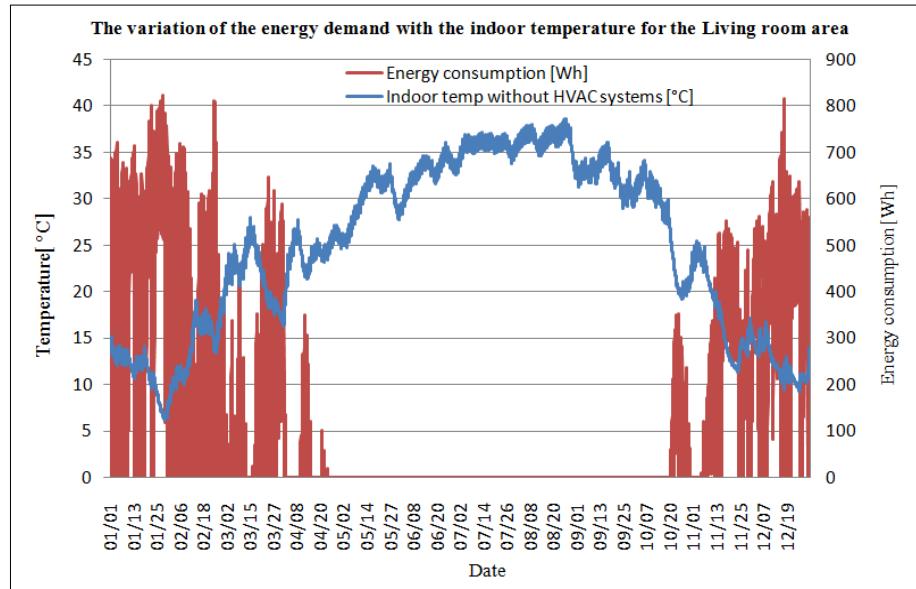


Figura 3.7. Variația temperaturii interioare în casa pasivă în cazul simulării fără sistem HVAC [62]

A doua simulare a fost realizată implementând un sistem HVAC ideal, care funcționează în baza a două termostate ce pornesc sau opresc sistemul HVAC. Primul termostat a fost utilizat pentru perioada de încălzire, iar temperatura setată a fost de 20°C, în timp ce, cu ajutorul celui de-al doilea termostat a fost menținută temperatura pe timpul verii la valori sub 25°C. Cu ajutorul acestui scenariu, consumul total de energie necesar încălzirii a fost de 14.48 kWh/m²/an, după cum poate fi observat în Tabelul 3.1.

Tabel 3.1. Rezultatul simulării necesarului de energie pentru încălzire [62]

Zonă termică	Necesar de energie pentru încălzire [kWh/an]	Suprafața zonei [m ²]
Living	1103,17	70,4
Baie Sud	62,97	8,64
Dormitor Sud	156,99	17,64
Birou	121,67	12,43
Dormitor Nord	203,77	12,6
Cameră Tehnică	52,17	5,16
Vestibul	120,99	2,88
Depozit	102,33	4,39
Baie Nord	67,29	6,75
Hol	90,26	16,2
Suprafață totală [m ²]	140	
Total [kWh/ m ² /an]	14.86	

Necesarul de energie în vederea menținerii unei temperaturi de 20°C pe timpul iernii este direct proporțională cu suprafața zonei analizate. Astfel, 53% din energia totală este consumată în living, care are o suprafață utilă de aproximativ 70 m². Consumul cel mai mic este atribuit

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

camerei tehnice, datorită faptului că aceasta nu are niciun perete expus direct condițiilor climatice. Dormitorul nordic este responsabil cu aproximativ 10% din consumul total, în timp ce în dormitorul sudic, datorită suprafeței vitrate mari, consumul de energie este mai scăzut, reprezentând doar 8% din total. Consumul de energie zilnic poate fi analizat în Figura 3.7, înregistrând un maxim de 800 Wh.

Pentru simularea dinamică a consumului de energie pentru răcire au fost gândite două scenarii: cu (cazul 2) și fără (cazul 1) existența unor elemente de umbră montate pe suprafața sudică. Temperatura operațională a fost cea introdusă în termostatul sistemului HVAC (25°C).

Tabel 3.2. Comparație între necesarul de energie pentru răcire în cele două cazuri simulate [62]

Zona termică	Necesar de energie pentru răcire -caz 1- [kWh/an]	Necesar de energie pentru răcire -caz 2- [kWh/an]	Suprafață [m ²]
Living	682,67	539,95	70,4
Baie Sud	176,01	148,14	8,64
Dormitor Sud	668,14	570,43	17,64
Birou	344,34	311,37	12,43
Dormitor Nord	247,33	224,86	12,6
Cameră Tehnică	16,08	12,46	5,16
Vestibul	8,85	7,77	2,88
Depozit	54,02	50,80	4,39
Baie Nord	38,6	36,77	6,75
Hol	93,93	84,12	16,2
Total [m ²]		140	
Total [kWh/m ² /an]	16,64	14,19	

După cum se poate observa în Tabelul 3.2., simpla montare a elementelor de umbră pe suprafețelor vitrate sudice, reduce necesarul de energie pentru răcire cu aproximativ 14%, de la 16,64 kWh/m²/an la 14,19 kWh/m²/an. Cel mai mare necesar de energie în vederea răcirii spațiului interior se regăsește în living și dormitorul sudic, unde se consumă aproximativ 29% din total energie în ambele cazuri simulate, fapt datorat suprafeței mari a geamurilor existente.

Izolația superioară a elementelor opace ale envelopei termice este principalul element ce minimizează schimbul de căldură între clădire și exterior. Plecând de la datele termo-fizice ale izolației adoptate pentru Casa Laborator (prezentate în Tabelul 2.1) s-a realizat o simulare în care doar grosimea stratului izolator a fost modificată, în vederea studierii variației necesarului de energie pentru încălzire. În acest scop, grosimea izolației pereților exteriori a fost variată între 300 și 600 mm, grosimea materialului izolator aplicat acoperișului a fost variată între 400 și 700 mm, în timp ce grosimea stratului izolator pentru pardoseală a fost variată între 150 și 450 mm. Pentru a realiza o analiză comparativă, variația grosimii a fost realizată pe rând, pentru fiecare componentă, situație în care celelalte două componente aveau grosimea reală, prezentată în Tabelul 2.1. Rezultatele analizei sunt prezentate în Figura 3.8, Figura 3.9 și Figura 3.10.

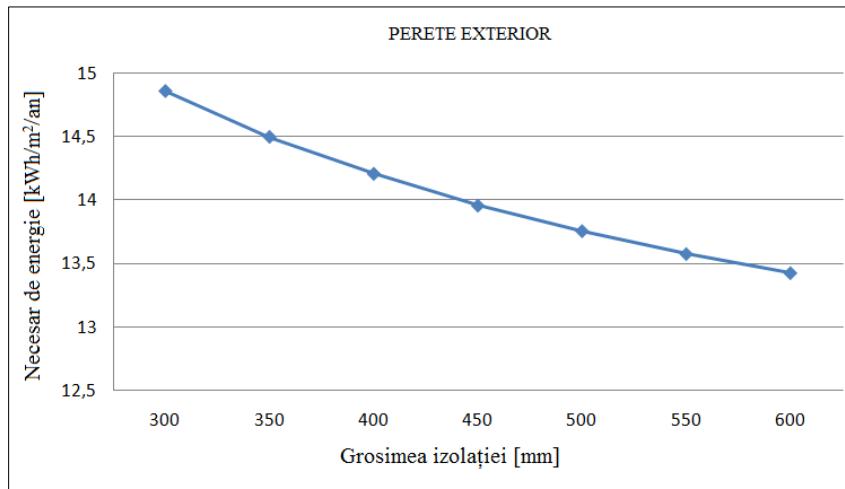


Figura 3.8. Variația necesarului de energie pentru încălzire cu grosimea izolației pereților exteriori

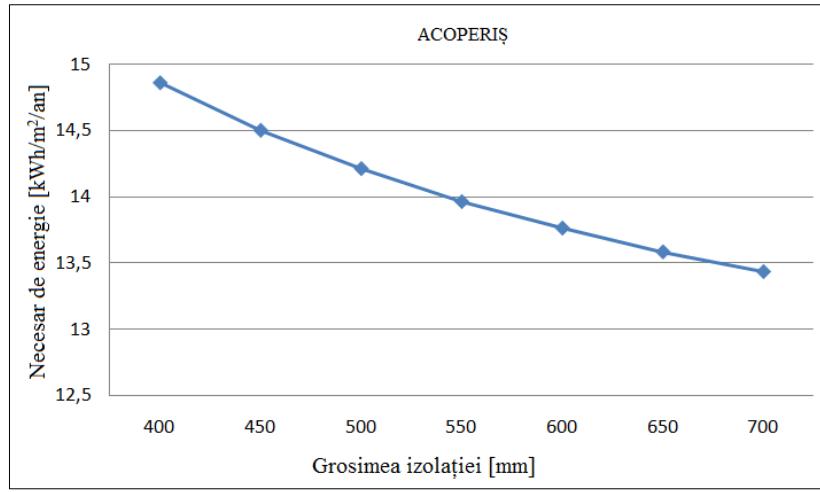


Figura 3.9. Variația necesarului de energie pentru încălzire cu grosimea acoperișului [62]

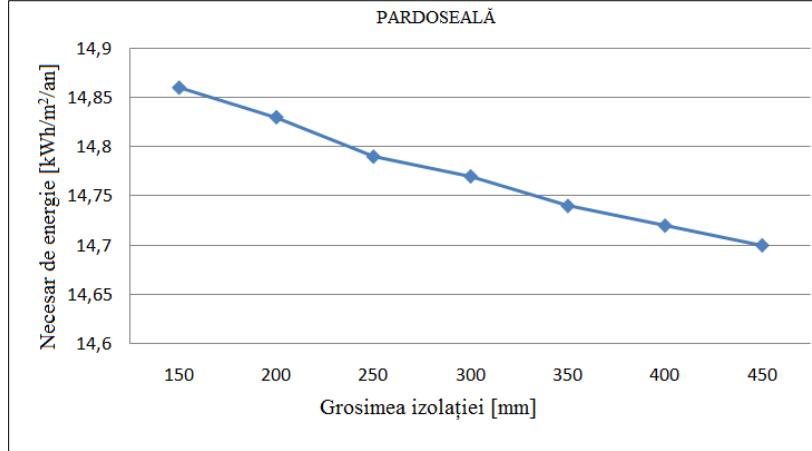


Figura 3.10. Variația necesarului de încălzire pentru încălzire cu grosimea izolației pardoselii [62]

După cum era de așteptat, necesarul de energie scade odată cu creșterea grosimii stratului izolator, dar acest lucru nu este întotdeauna avantajos din punct de vedere economic, de cele mai multe ori prețul investiției într-o supra izolare nu se justifică prin procentul reducerii energiei consumate. În analiza de față, mărirea izolației pereților exteriori de la 300 la 600 mm corespunde unei reduceri a necesarului de energie pentru încălzire de doar 9,8%, investiția nefiind justificată. În plus, o astfel de investiție nu este fezabilă. Același lucru se poate observa și în cazul în care grosimea izolației acoperișului este variată de la valoarea reală de 400 mm la 700 mm. În cazul pardoselii, o creștere ipotecică a izolației de la 150 la 450 mm aduce un

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică beneficu de doar 0,94%, reducând necesarul de energie pentru încălzire cu doar 0.14 kWh/m²/an.

3.3. SIMULAREA DINAMICĂ A SISTEMELOR DE PRODUCERE A ENERGIE ELECTRICE

După simularea necesarului de energie pentru încălzirea și răcirea Casei Laborator, a fost studiat potențialul amplasamentului și al echipamentelor instalate în vederea producerii energiei electrice. Casa Laborator este echipată cu 13 panouri fotovoltaice SCHOT POLY 225, cu o putere nominală de 2,9 KW. Detalii despre caracteristicile de funcționare ale panourilor și invertorului se pot găsi în Tabelul 2.2. În cadrul studiului s-a folosit programul PVsyst 6.3.9, cu ajutorul căruia au fost simulate diferite scenarii în vederea utilizării la maximum a potențialului de producere a energiei a amplasamentului.

Simulatorul PVsyst folosește date climatice pentru un an caracteristic (1990), apărând problema acurateței acestor date climatice. Pentru validare, datele meteo pentru anul 2014 au fost simulate cu ajutorul software-ului dedicat MeteoNorm. Simulatorul de date meteorologice permite integrarea datelor pe o perioadă lungă de timp, acuratețea datelor rezultate fiind mai bună. În Figura 3.11 este prezentată o comparație între radiația solară utilizând cele două programe.

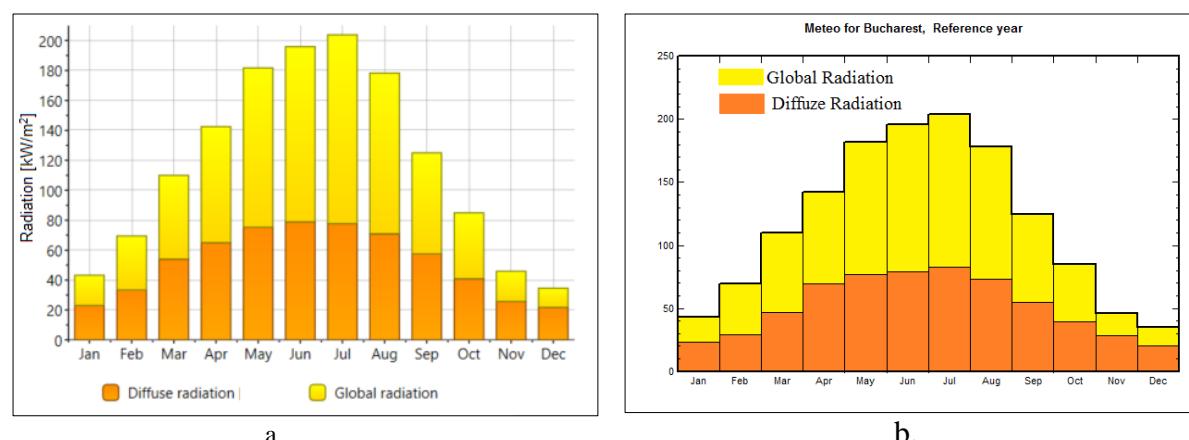


Figura 3.11. Comparație între radiația solară din București utilizând MeteoNorm (a) și PVsyst (b)

După cum se poate observa în figura anterioară valorile celor două forme ale radiației solare (difuză și globală) sunt aproximativ egale, înregistrând un minim de doar 40 kW/m² (radiație globală) în ianuarie și un maxim de aproximativ 200 kW/m² în iulie.

După validarea datelor climatice utilizate în simularea panourilor PV, a fost inițializat un nou proiect în cadrul programului PVsyst. Aici, pe lângă zona climatică, au fost alese orientarea și configurația panourilor. Sistemul PV montat pe Casa Laborator este conectat la rețeaua electrică internă a UPB (pentru evitarea necesității de a folosi un sistem de stocare a energiei produse) și are o înclinație de 15° spre sud. Aceste considerente au fost utilizate în etapa de configurare a modelului.

Orientarea panourilor PV se poate face atât ținând cont de unghiul de înclinare cât și de unghiul de azimut, modificarea acestor parametri influențând randamentul sistemului. În vederea alegării variantei optime, se calculează automat în funcție de valorile introduse, un procent de scădere a randamentului în comparație cu poziționarea optimă. Pentru condițiile climatice din București, orientarea optimă (pentru care procentul de scădere a randamentului este 0%) este caracterizată de o înclinare a panourilor cuprinsă între 35° și 39° și un unghi de azimut cuprins între -3° și 3° (variația acestui parametru este influențată de unghiul de înclinare), cu un potențial maxim de producere la o înclinare de 37° și un unghi azimut de 0°.

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

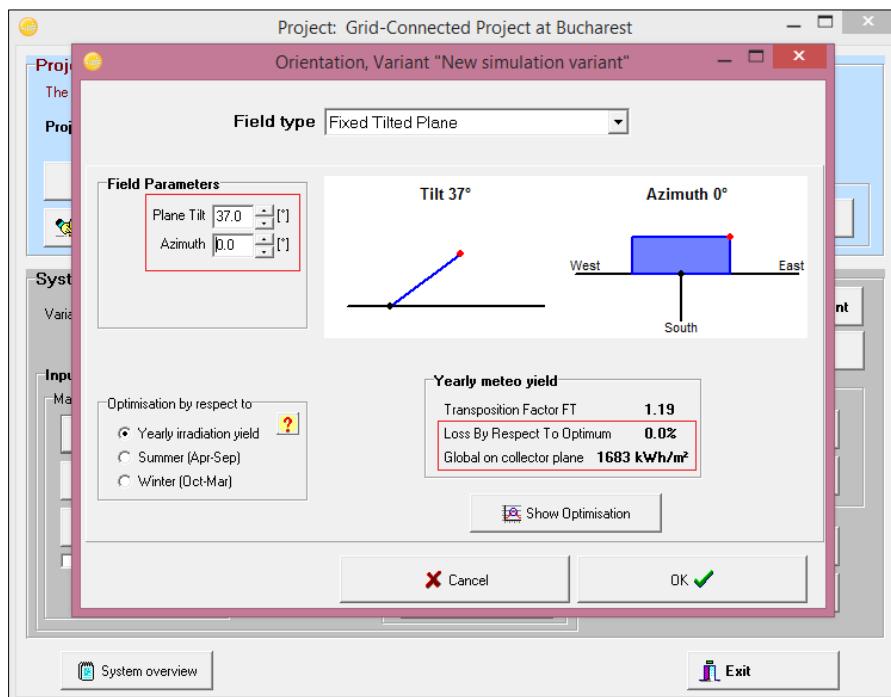


Figura 3.12. Alegerea orientării optime a panourilor PV pentru clima din București

Caracteristicile de funcționare a sistemului (panourile fotovoltaice și invertorul) sunt alese dintr-o bază de date, actualizată în mod constant de către firmele producătoare de echipamente PV. Programul de simulare oferă, prin intermediul interfeței grafice, diferite sugestii în vederea optimizării procesului, de la auto-estimarea numărului optim de panouri ce trebuie ales în vederea obținerii puterii dorite, până la alegerea invertorului optim, anunțând utilizatorul dacă acesta este sub sau supra dimensionat. Nu este necesară introducerea datelor tehnice ale celulelor PV sau a invertorului, decât dacă acestea nu se regăsesc în lista elementelor presetate.

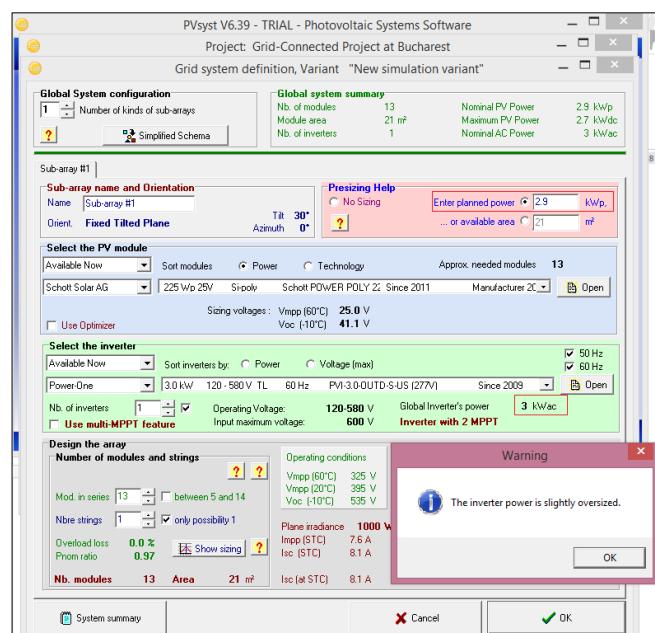


Figura 3.13. Alegerea caracteristicilor de funcționare a sistemului PV

În Figura 3.13 este prezentată interfața de introducere a parametrilor caracteristici ai sistemului fotovoltaic. Avertizarea afișată este cauzată de faptul că puterea panourilor fotovoltaice nu coincide cu cea a invertorului, fapt ce poate induce un cost global mai ridicat al sistemului. Utilizând această configurație au fost simulate mai multe scenarii în vederea alegerii soluției optime. Prima simulare a fost făcută pentru cazul real de înclinare al panourilor (15°) și un unghi azimut de 0° , rezultând un procent de scădere al producției de energie față de optim de 5,8%. Necesarul de energie total a fost estimat cu ajutorul sistemului de calcul PHPP, rezultând $120 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ ($16800 \text{ kWh}/\text{an}$, ținând cont că suprafața utilă a clădirii este de 140 m^2). Acest necesar de energie a fost introdus ca intrare în PVsyst, rezultând posibilitatea de a vizualiza procentul de energie acoperit prin producția proprie.

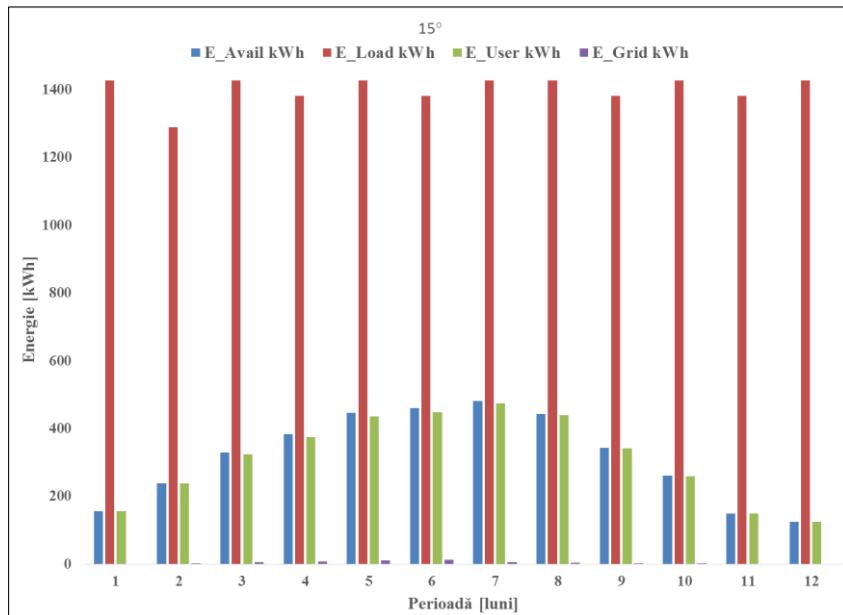


Figura 3.14. Distribuția producției și necesarului total de energie simulate pentru o orientare de 15° a panourilor PV

În Figura 3.14 E_Avail reprezintă energia utilă produsă (la ieșirea din invertor), E_Load necesarul total de energie pentru operarea clădirii, E_user energia furnizată de sistemul PV către utilizator și E_grid este energia injectată în rețea la care este conectat sistemul. Se poate observa faptul că necesarul total de energie a fost distribuit aproximativ la fel pe toată perioada, ipoteză care, pentru casa supusă studiului este valabilă, ținând cont că simulările efectuate și prezentate în subcapitolul anterior, au indicat faptul că necesarul de energie pentru încălzire este aproximativ egal cu energia necesară pentru răcire. Consumul suplimentar de energie primară (până la valoarea estimată de $120 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$) are un profil aproximativ constant, fiind compus din energia consumată de electrocasnice, prepararea apei calde menajere și a altor echipamente utilizate într-o clădire rezidențială.

În urma simulării a rezultat o producție totală de 3811 kWh , din care 3763 kWh au fost utilizati în operarea clădirii, reprezentând aproximativ 23% din totalul de energie necesară. Din rețea au fost utilizati 13037 kWh , în timp ce, 48 kWh au fost injectați în rețea pe parcursul anului caracteristic (Figura 3.15), maximul înregistrându-se în iunie, lună în care au fost transferați către rețeaua electrică $12,2 \text{ kWh}$.

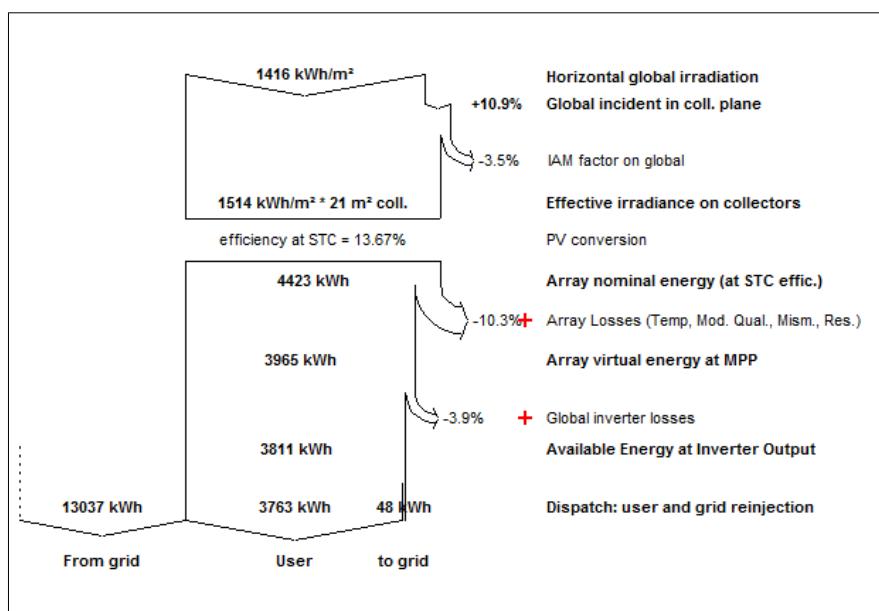


Figura 3.15. Diagrama pierderilor și distribuția de energie rezultate în urma simulării ipotezei 1

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

Pentru următoarea simulare a fost considerat doar necesarul de energie pentru încălzire și răcire (aproximativ $30 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ sau $4200 \text{ kWh}/\text{an}$), ceilalți parametri rămânând aceeași. În Figura 3.16 se poate observa faptul că un procent mai mare din energia produsă este direcționat către rețeaua de electricitate. Astfel, din energia totală produsă (3811 kWh/m^2), 2189 kWh au fost injectați în rețea, reprezentând un procent de 57,5%. Pentru a asigura necesarul de energie de $4200 \text{ kWh}/\text{an}$, 2578 kWh au fost consumați din rețea, restul energie provenind de la panourile PV.

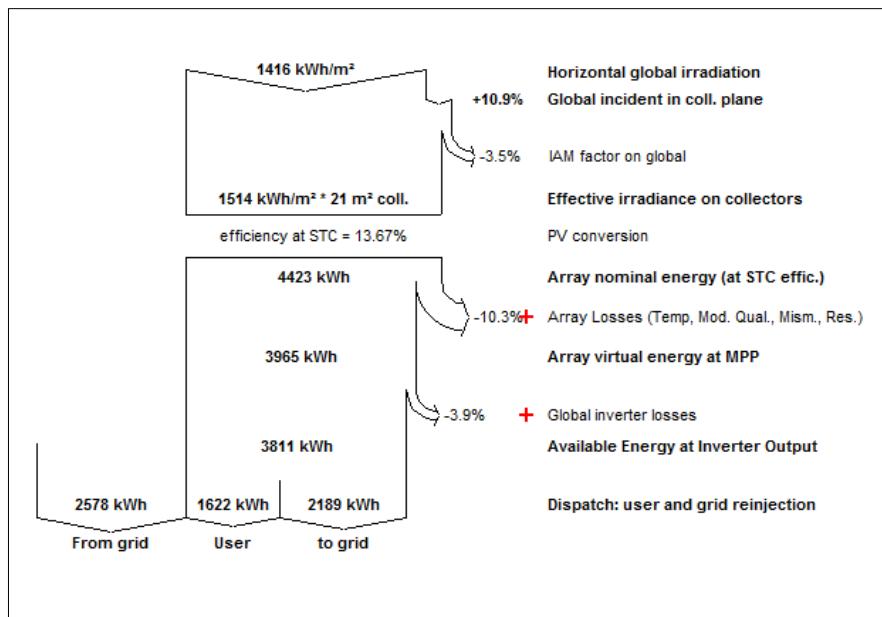


Figura 3.16. Diagrama pierderilor și distribuția de energie rezultate în urma simulării ipotezei 2

În vederea realizării celei de-a treia simulări s-a ținut cont de faptul că înclinarea optimă a panourilor PV este între 35° și 39° , alegându-se valoarea medie (37°). A fost simulațat același sistem, indicând un necesar de energie total de $120 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Prin simplă modificare a unghiului, energia utilă (la ieșirea din invertor) a crescut de la $3811 \text{ kWh}/\text{an}$ (în primele două cazuri) la $4008 \text{ kWh}/\text{an}$. În aceste condiții aproximativ 99 kWh au fost injectați în rețea, în timp ce, din necesarul de energie total de $16800 \text{ kWh}/\text{an}$, 3910 kWh au fost acoperiți de sistemul fotovoltaic. Din rețeaua electrică au fost utilizați 12890 kWh , reprezentând aproximativ 77% din total. În Figura 3.17 este reprezentată distribuția de energie pentru al treilea caz considerat.

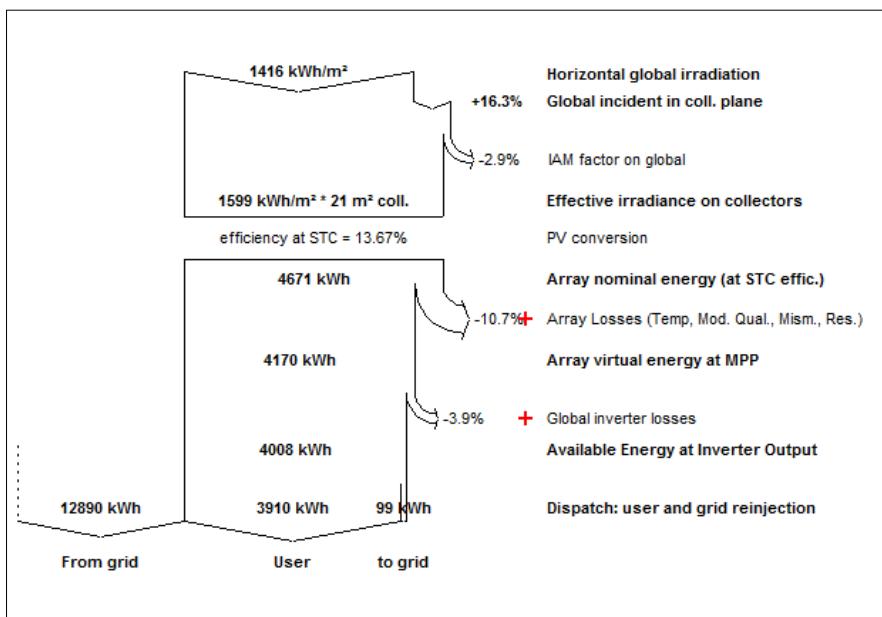


Figura 3.17. Diagrama pierderilor și distribuția de energie rezultate în urma modificării unghiului de înclinare a panourilor PV

3.4. CONCLUZII

În CAPITOLUL 3 au fost folosite modele matematice *white-box* implementate în software-uri dedicate simulării dinamice a clădirilor și echipamentelor componente. Analiza efectuată s-a bazat pe două direcții de cercetare: simularea dinamică a necesarului de energie pentru încălzirea și răcirea Casei Laborator și simularea dinamică a energiei produse de sistemul format din panouri fotovoltaice amplasat pe acoperișul clădirii.

Pentru efectuarea simulărilor privind necesarul de energie a fost utilizat programul EnergyPlus, dedicat modelării proceselor termo-fizice din clădiri, în timp ce geometria a fost realizată utilizând programul dedicat Google SketchUP. Simulările au evidențiat faptul că anvelopa și elementele pasive ale clădirii permit menținerea unei temperaturi de confort cu un consum redus de energie. Astfel, pentru perioada de încălzire, utilizând un sistem HVAC ideal care are rolul de a menține temperatura interioară la o valoare indicată de utilizator prin intermediul unui termostat, energia necesară menținerii confortului termic a fost de 14,84 kWh/m²/an, valoarea sub limita energetică impusă de PHI. În perioada de răcire, prin simpla montare a elementelor de umbrărire pe suprafața sudică și utilizând același sistem HVAC ideal și temperatura de confort de 25°C, necesarul de energie pentru răcire a scăzut de la 16,64 kWh/m²/an la 14,19 kWh/m²/an.

Utilizând programul EnergyPlus a fost posibilă efectuarea unei analize privind influența grosimii stratului de izolație termică asupra consumului de energie în Casa Laborator. Pentru aceasta, grosimile izolațiilor componentelor anvelopei au fost variate pe rând, simulându-se necesarul de energie în vederea menținerii temperaturii interioare la o valoare setată de 20°C. Simulările au indicat o scădere de 9,8% în cazul dublării izolației pereților exteriori (de la 300 la 600 mm), același procent înregistrându-se și în cazul măririi izolației acoperișului de la 400 la 700 mm. În cazul pardoselii, reducerea de energie indușă de mărirea izolației termice de la 150 la 450 mm a fost mai mică de 1%. Acest lucru indică faptul că metoda aleasă în vederea eficientizării energetice a clădirii nu este justificabilă din punct de vedere economic, costul aferent unei supra-izolări a clădirii fiind mai mare decât beneficiul adus.

În a doua parte a capitolului a fost simulația sistemul de producere a energiei electrice utilizând programul PVsyst. Acest software utilizează o bază de date în care sunt introduse de către producători diverse soluții complete în vederea producării energiei cu ajutorul panourilor fotovoltaice. După alegerea zonei analizate (datele meteorologice), se introduc parametrii de orientare (unghiul de înclinare și unghiul azimut) și tehnici (număr de panouri, putere, etc) și se simulează comportamentul dinamic al sistemului fotovoltaic. În studiu prezentat s-a dorit evidențierea importanței alegerii unghiului optim de înclinare a panourilor fotovoltaice. În cazul real, acestea sunt montate direct pe acoperișul clădirii, care este efectuat sub unghi de 15° înspre sud. Această orientare permite producerea a 3811 kWh/an, care acoperă în jur de 23% din necesarul total de energie în Casa Laborator (estimat la 120 kWh/m²/an cu ajutorul foilor de calcul PHPP). Orientarea panourilor la unghiul optim (37°) a mărit producția de energie la 4008 kWh/an, rezultând un potențial crescut de eficientizare a producției de energie pe amplasament.

Diseminarea rezultatelor din acest capitol a fost făcută prin intermediul a două conferințe internaționale:

1. *Conferința Internațională Energie Mediu (CIEM) 2011, prin articolul: V. Tanasiev, B. Căruțășiu, A. Badea, Dynamic simulation of energy consumption for a passive house in Romanian climate conditions: a case study,*
2. *Colloque Francophone en Energie, Environnement, Economie et Thermodynamique (COFRET), 2014, prin articolul: B. Căruțășiu, V. Tanasiev, C. Ionescu, A. Badea, Nearly zero energy buildings in temperate continental climate – a case study for Romania.*

CAPITOLUL 4.

ESTIMAREA CONSUMULUI DE ENERGIE PENTRU ÎNCĂLZIRE UTILIZÂND O ABORDARE MATEMATICĂ HIBRID BAZATĂ PE INTELIGENȚĂ COMPUTAȚIONALĂ

Modelele matematice ce descriu comportamentul energetic al clădirilor sunt esențiale în vederea realizării diagnosticării sistemului HVAC, creării strategiilor de control al sistemelor sau chiar în evidențierea strategiilor optime de eficientizare a consumurilor de energie și estimarea reducerii costurilor de exploatare. În procesul de realizare a unui model ce poate descrie fidel consumul (sau necesarul) de energie într-o clădire, este important să se calculeze cât mai precis transferul termic conductiv în regim tranzitoriu prin elementele envelopei. În literatura de specialitate privind transferul de căldură și masă, în rezolvarea unei astfel de probleme, sunt considerate o serie de ipoteze simplificatoare, privind rezistențele termice interne, externe și dimensiunile domeniului analizat [85], ipoteze ce nu se pot aplica în domeniul energeticii clădirilor.

La modul general, conductiona tranzitorie printr-un perete omogen sau multistrat este descrisă de două ecuații fundamentale: legea lui Fourier, care caracterizează conductiona termică tranzitorie, unidirecțională, fără surse interioare de căldură (ecuația 4.1) și prima lege a termodinamicii, ce descrie bilanțul de energie într-un punct din spațiul analizat (ecuația 4.2).

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla^2 T \quad (4.1)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\nabla q \quad (4.2)$$

unde:

a – difuzivitatea termică [m^2/s], $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$;

λ – conductivitatea termică [$\text{W}/\text{m}/\text{K}$];

T – temperatura [$^\circ\text{C}$];

τ – timpul [s];

ρ – densitatea [kg/m^3];

c_p – căldura specifică [$\text{J}/\text{kg}/\text{K}$];

q – flux termic [W/m^2].

Rezolvarea simultană a celor două ecuații nu este facilă, iar metodele numerice de rezolvare (metoda elementelor finite, metoda diferențelor finite, etc.) sunt dificil de aplicat și necesită un efort computațional mare. Totodată, rezultatele metodelor clasice s-au dovedit a fi inexacte în descrierea fidelă a comportamentului energetic al unei clădiri, erorile de calcul fiind semnificative, comparat cu metode experimentale [86].

În prezent, pentru calculul fluxurilor termice într-o clădire, există o serie de abordări analitice ce au rolul de a modela dinamica transferului termic conductiv prin elementele envelopă. Astfel, există două abordări de bază în tratarea acestor probleme: metoda bazată pe răspunsul clădirii la factorii termici ce influențează consumul energetic [87,88] (response factor method - RFM) și metoda funcțiilor de transfer (Conduction Transfer Function – CTF) [86,89], ce va fi detaliată în secțiunea următoare. Metodele bazate pe determinarea unei funcții de transfer s-au dovedit a fi mai exacte și mai ușor de aplicat în modele de calcul a întregii clădiri.

Termenul de *funcție de transfer* este utilizat cu precădere în domeniul automatizărilor și controlului sistemelor, unde este definit ca raportul dintre transformata Laplace (sau transformata Z) a ieșirii dintr-un sistem considerat și transformata Laplace (sau transformata Z) a intrării în sistem. În domeniul transferului de căldură în clădiri, chiar dacă are aceeași

denumire, funcția de transfer este definită ca o ecuație recursivă, care realizează corelarea dintre: ieșirea unui sistem liniar, invariabil în timp la un anumit moment de timp (τ), o serie de intrări curente (la același moment de timp: τ) și anterioare (la momente anterioare de timp: $\tau-1, \tau-2, \dots, \tau-n$) și o serie de ieșiri anterioare (la momente de timp: $\tau-1, \tau-2, \dots, \tau-n$). Intrările sistemului trebuie să fie modelate sub forma unei curbe continue, liniară pe porțiuni, sau o serie de impulsuri triunghiulare [86].

Cele două metode (RFM și CTF) sunt mai eficiente decât soluțiile metodelor Euler sau Crank–Nicolson în rezolvarea problemelor de transfer termic dintr-un motiv esențial: metodele Euler și Crank–Nicolson calculează toate temperaturile nodale la fiecare pas de timp (ce trebuie ales de obicei mai mic decât metoda funcțiilor de transfer), chiar dacă acestea nu reprezintă mereu o valoare de interes în modelarea termică a unei clădiri. Prin implementarea unei funcții de transfer, doar ieșirile dorite sunt calculate, micșorând semnificativ timpul de calcul [86].

4.1. METODE DE DETERMINARE A FUNCȚIILOR DE TRANSFER

4.1.1. Determinarea funcției de transfer utilizând transformata Laplace

În majoritatea modelelor matematice ce descriu conductiona tranzitorie printr-un element al anvelopei clădirii, se presupune că direcția de propagare a fluxului termic este unidirectională, simplificând astfel problema (Figura 4.1).

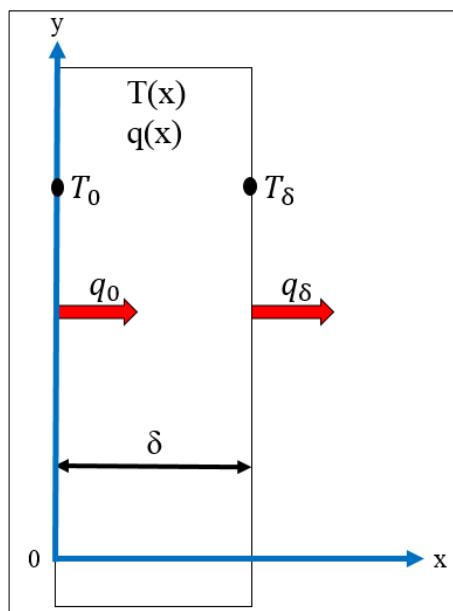


Figura 4.1. Distribuția fluxului termic și a temperaturii printr-un perete omogen

În Figura 4.1 este reprezentată distribuția unidirectională a fluxului termic și a temperaturii printr-un perete omogen de grosime δ , expus unei perturbații exterioare. Aplicând o funcție de transfer ce realizează legătura între valorile pe cele două limite ale spațiului ($x = 0$ și $x = \delta$), s-a eliminat necesitatea de a determina profilul distribuțiilor temperaturii și fluxului termic pe întreaga grosime a peretelui. În vederea tratării problemelor de transfer termic în clădiri, un pas important a fost acela de realiză o analogie între teoria circuitelor electrice și termice, și de a modela transferul conductiv prin transformări matriceale ale cuplului temperatură–flux de căldură. Analogia electric–termic este determinată de următoarele cupluri de mărimi [85]:

- Temperatură [K]–Potențial electric [V];
- Flux termic [W]–Intensitatea curentului [A];
- Rezistență termică [K/W]–Rezistență electrică [Ω];
- Capacitate termică [J/Kg/K]–Capacitate electrică [F].

Definind rezistența termică ca fiind inversul conductivității termice ($R = \frac{1}{\lambda}$) și capacitatea termică drept produsul dintre densitatea și căldura specifică a materialului ($C = \rho \cdot c_p$), ecuațiile 4.1 și 4.2 se pot scrie:

$$-\frac{\partial T}{\partial x} = R \cdot q \quad (4.3)$$

$$-\frac{\partial q}{\partial x} = C \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (4.4)$$

Presupunând faptul că densitatea, conductivitatea termică și căldura specifică sunt constante pentru intervalul de timp considerat, și temperatura în punctul $(x, 0)$ este 0, se poate aplica transformata Laplace pentru sistemul de ecuații format din relațiile 4.3 și 4.4, rezultând:

$$-\frac{\partial T(s)}{\partial x} = R \cdot q(s) \quad (4.5)$$

$$-\frac{\partial q(s)}{\partial x} = C \cdot s \cdot T(s) \quad (4.6)$$

Aceste ecuații reprezintă imaginea sistemului anterior în domeniul Laplace, prin intermediul căruia, funcțiile de argument real ($\tau \geq 0$) sunt transformate în funcții echivalente de argument complex ($s = \sigma + i\omega$). Domeniul Laplace este utilizat în vederea rezolvării sistemelor de ecuații diferențiale, iar perechile corespunzătoare $f(t) - F(s)$ sunt grupate în tabele de transformate Laplace. Pentru o funcție oarecare $f(t)$, se definește drept transformata Laplace (imaginea după Laplace), funcția cu argument complex de forma [90]:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-s \cdot t} dt \quad (4.7)$$

Rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale scris în domeniul Laplace este mai simplă, iar rezultatul, scris sub formă matriceală a cuplului temperatură–flux termic are următoarea formă:

$$\begin{bmatrix} T_0(s) \\ q_0(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{\delta}(s) \\ q_{\delta}(s) \end{bmatrix} = H(s) \cdot \begin{bmatrix} T_{\delta}(s) \\ q_{\delta}(s) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Matricea $H(s) = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}$ este denumită matricea de transmisie, iar forma aceasta este valabilă pentru un perete omogen (format dintr-un singur strat), caracterizat de proprietăți termice și fizice constante. Pentru un perete format din mai multe straturi, având proprietățile termice și fizice constante pe intervalul de temperatură considerat, matricea de transmisie totală este determinată prin înmulțirea algebrică a matricelor de transmisie ce caracterizează fiecare strat considerat, iar forma sa este:

$$H(s) = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = H_n(s) \cdot H_{n-1}(s) \cdot \dots \cdot H_1(s) \text{ , unde:} \quad (4.9)$$

$$H_i(s) = \begin{bmatrix} A_i(s) & B_i(s) \\ C_i(s) & D_i(s) \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.10)$$

Elementele componente pentru fiecare matrice de transmisie, pot fi scrise sub formă de funcții hiperbolice, după cum urmează [91]:

$$A_i = D_i = \cosh(\delta_i \sqrt{R_i \cdot C_i \cdot s}) \quad (4.11)$$

$$B_i = \sqrt{\frac{R_i}{C_i \cdot s}} \sinh(\delta_i \sqrt{R_i \cdot C_i \cdot s}) \quad (4.12)$$

$$C_i = \frac{\sinh(\delta_i \sqrt{R_i \cdot C_i \cdot s})}{\sqrt{\frac{R_i}{C_i \cdot s}}} \quad (4.13)$$

În ecuațiile anterioare, δ_i reprezintă grosimea stratului i , în timp ce R_i, C_i reprezintă rezistență, respectiv capacitatea termică a stratului i . În cazul în care stratul considerat este pur rezistiv, adică valoarea capacității termice este foarte mică în comparație cu valoarea rezistenței termice, matricea de transmisie are următoarea formă:

$$H_R = \begin{bmatrix} 1 & R_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

În funcție de distribuția dorită a fi aflată (temperaturi sau fluxuri termice), ecuația 4.8 se poate scrie, rearanjând termenii:

$$\begin{bmatrix} q_0(s) \\ q_\delta(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & -\frac{1}{B(s)} \\ \frac{1}{B(s)} & -\frac{A(s)}{B(s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_0(s) \\ T_\delta(s) \end{bmatrix} = G(s) \cdot \begin{bmatrix} T_0(s) \\ T_\delta(s) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$\begin{bmatrix} q_\delta(s) \\ q_0(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{A(s)}{B(s)} & \frac{1}{B(s)} \\ \frac{1}{B(s)} & \frac{A(s)}{B(s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_\delta(s) \\ T_0(s) \end{bmatrix} = G(s) \cdot \begin{bmatrix} T_\delta(s) \\ T_0(s) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Aplicând transformata-Z asupra ecuației 4.15 (sau 4.16), Stephenson și Mitalas [89,92] au reușit să obțină o relație între semnalul de intrare și cel de ieșire din sistem (perete format din mai multe straturi în cazul de față) de forma:

$$O_n \cdot b_0 + O_{n-1} \cdot b_1 + \cdots + O_{n-P} \cdot b_P = I_n \cdot a_0 + I_{n-1} \cdot a_1 + \cdots + I_{n-J} \cdot a_J \quad (4.17)$$

unde: O_n este semnalul de ieșire (fluxul termic) și I_n reprezintă semnalul de intrare (temperatura), la timpul n , iar a și b sunt coeficienții polinoamelor ce definesc funcția de transformare-Z:

$$K(z) = \frac{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + \cdots + a_J \cdot z^{-J}}{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2} + \cdots + b_P \cdot z^{-P}} \quad (4.18)$$

unde: z este un operator matematic ce descrie defazajul dintre intrarea și ieșirea sistemului, definit ca: $z = e^{s\Delta\tau}$ (s – operatorul Laplace, $\Delta\tau$ – pasul de timp).

Rescriind ecuația 4.17, și substituind operatorul z cu $e^{j\omega\Delta t}$ (pentru a reveni în domeniul timpului), funcția de transfer ce descrie conducția termică unidirecțională, tranzitorie pentru fiecare suprafață a unui perete ($x = 0$ și $x = \delta$), reprezentat schematic în Figura 4.1, are următoarele expresii:

$$q_n^{x=0} = \sum_{k=0}^J a_k^{x=0} \cdot T_{n-k}^{x=0} - \sum_{k=0}^J a_k^{x=\delta} \cdot T_{n-k}^{x=\delta} - \sum_{k=1}^P b_k^{x=0} \cdot q_{n-k}^{x=0} \quad (4.19)$$

$$q_n^{x=\delta} = \sum_{k=0}^J a_k^{x=\delta} \cdot T_{n-k}^{x=\delta} - \sum_{k=0}^J a_k^{x=0} \cdot T_{n-k}^{x=0} - \sum_{k=1}^P b_k^{x=\delta} \cdot q_{n-k}^{x=\delta} \quad (4.20)$$

Găsirea coeficienților polinoamelor ce formează funcția-Z este un lucru dificil de făcut și necesită mult timp și multă putere computațională. În literatura de specialitate au fost propuse o serie de algoritmi ce simplifică procedeul complex de găsire a coeficienților a și b pentru fiecare parte a peretelui. Pentru simplificare, ASHRAE a introdus în metodologia de calcul pentru clădirile din America, valori pentru coeficienții funcției de transfer pentru o serie de pereții utilizati pe scară largă în industria construcției de clădiri. Hittie și Bishop [93] au propus o metodă îmbunătățită de calcul, ce reduce semnificativ timpul computațional, dar chiar și aşa, datorită transformărilor din domeniul timpului în domeniul frecvențelor (și invers), face ca metoda să fie greu de utilizat în afara unui instrument de calcul dedicat (programe de calcul pentru estimarea consumului de energie într-o clădire). Această metodă este implementată în software-ul TRNSys [91,94].

4.1.2. Determinarea funcției de transfer utilizând metoda State-Space

În vederea reducerii timpului de calcul a coeficienților funcției de transfer, Seem et al. [86,95] au propus rezolvarea sistemului de ecuații ce guvernează transferul conductiv prin

elementele de anvelopă a unei clădiri, utilizând o metodă bazată pe o descriere a stărilor în spațiul analizat, discretizat în prealabil prin metoda diferențelor finite (State Space – Spațiul Stărilor). În general, metoda state space este utilizată în domeniul Automaticii (analiza și controlul sistemelor) și este definit ca un model matematic cu ajutorul căruia sunt rezolvate ecuațiile diferențiale ce descriu dinamica unui sistem. Conceptual, *starea* unui sistem dinamic se referă la setul minim de variabile (cunoscute drept variabile de stare), cu ajutorul căruia sistemul analizat, cât și răspunsul acestuia la un impuls exterior, pot fi descrise total [96].

Reprezentarea state space (cunoscută drept abordarea în domeniul timpului) este o metodă ce utilizează calculul matriceal în vederea realizării unei corelații între intrările și ieșirile unui sistem liniar, invariabil în timp, definit de un spațiu finit. Utilizarea metodei reprezintă o variantă convenabilă și compactă de a analiza un sistem cu multe intrări și ieșiri, reducând numărul ecuațiilor utilizate. Spre exemplu, dacă se lucrează în domeniul frecvențelor (metoda prezentată în secțiunea 4.1.1), pentru un sistem caracterizat de p intrări și m ieșiri, este necesar să se scrie $p \cdot m$ transformate Laplace pentru a reprezenta fidel informația ce descrie sistemul. Reprezentarea sub formă state space a aceluiasi sistem (continu, liniar, invariabil în timp), caracterizat de p intrări, n stări și m ieșiri, are forma [86,96]:

$$\frac{dx}{d\tau} = A \cdot x + B \cdot u \quad (4.21)$$

$$y = C \cdot x + D \cdot u \quad (4.22)$$

unde:

x –vectorul celor n stări;

τ –timpul;

A –matrice cu coeficienți constanți de dimensiuni $n \cdot n$;

B –matrice cu coeficienți constanți de dimensiuni $n \cdot p$;

u –vectorul celor p intrări;

y – vectorul celor m ieșiri;

C –matrice cu coeficienți constanți de dimensiuni $m \cdot n$;

D –matrice cu coeficienți constanți de dimensiuni $m \cdot p$.

În sistemul de ecuații prezentat anterior, prima ecuație (4.21) se numește *ecuația de stare*, în timp ce ecuația 4.22 se numește *ecuația ieșirilor*. Plecând de la sistemul de ecuații diferențiale, pentru care a aplicat o metodă de calcul bazată pe teoria sistemelor și modelare matriceală, Seem [86,95] a propus o funcție de transfer echivalentă, ce implică soluția exactă a setului de ecuații diferențiale de ordinul întâi, cu intrările modelate ca funcții liniare, continue. Soluția la un moment oarecare de timp t , are forma:

$$y(t) = \sum_{k=0}^n S_k^T u_{t-k\Delta\tau} - \sum_{k=1}^n e_k y(t - k\Delta t) \quad (4.23)$$

Această formulare permite observarea interdependenței dintre ieșirea sistemului la un moment oarecare de timp și celealte mărimi (serii ale intrărilor curente/anterioare și serii ale ieșirilor anterioare), fiecare element fiind cuantificat cu ajutorul unei ponderi ce descrie gradul de influență al elementului respectiv asupra rezultatului final. În ecuația 4.23, ponderile ce influențează soluția modelului sunt vectorii S_k , care acționează asupra vectorului intrărilor și scalarii e_k , ce influențează seria de ieșiri anterioare, iar determinarea lor este descrisă în continuare.

- Vectorii S_k , pentru k de la 0 la n

$$S_0 = C \cdot R_0 \cdot \Gamma_2 + D \quad \text{for } j = 1 \quad (4.24)$$

$$S_j = C \cdot [R_{j-1} \cdot (\Gamma_1 - \Gamma_2) + R_j \cdot \Gamma_2] + e_j \cdot D \quad \text{for } 1 \leq j \leq (n-1) \quad (4.25)$$

$$S_n = C \cdot R_{n-1} \cdot (\Gamma_1 - \Gamma_2) + e_n \cdot D \quad \text{for } j = n \quad (4.26)$$

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

unde:

$$\Gamma_1 = \mathbf{A}^{-1} \cdot (\boldsymbol{\Phi} - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{B} \quad (4.27)$$

$$\Gamma_2 = \mathbf{A}^{-1} \cdot \left(\frac{\Gamma_1}{\Delta\tau} - \mathbf{B} \right) \quad (4.28)$$

- \mathbf{I} reprezintă matricea identitate;
- $\Delta\tau$ reprezintă pasul de timp (uzual, pentru aplicații energetice se alge o oră).

$$\boldsymbol{\Phi} = e^{\mathbf{A} \cdot \Delta\tau} \quad (4.29)$$

$$e^{\mathbf{A} \cdot \Delta\tau} = \mathbf{I} + \mathbf{A} \cdot \Delta\tau + \frac{\mathbf{A}^2 \cdot (\Delta\tau)^2}{2!} + \cdots + \frac{\mathbf{A}^n \cdot (\Delta\tau)^n}{n!} \quad (4.30)$$

Matricea exponențială se poate calcula utilizând aproximația Padé, care, în esență, reprezintă o trunchiere a seriei Taylor (ecuația 4.30) după un număr suficient de elemente mai mic decât n [95].

- Scalarii e_k , pentru k de la 1 la n , se determină împreună cu matricele \mathbf{R}_j (j de la 0 la $n-1$), urmând un algoritm recursiv, propus de Leverrier, prezentat prin intermediul ecuațiilor 4.31–4.33:

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{I} \quad e_1 = -\frac{\text{trace}(\boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{R}_0)}{1} \quad (4.31)$$

$$\mathbf{R}_1 = \boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{R}_0 + e_1 \cdot \mathbf{I} \quad e_2 = -\frac{\text{trace}(\boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{R}_1)}{2} \quad (4.32)$$

...

...

$$\mathbf{R}_{n-1} = \boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{R}_{n-2} + e_{n-1} \cdot \mathbf{I} \quad e_n = -\frac{\text{trace}(\boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{R}_{n-1})}{n} \quad (4.33)$$

- trace reprezintă urma matricei (suma elementelor de pe diagonala principală).

Elementele matricelor cu elemente constante ($\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$) se obțin aplicând ecuația bilanțului energetic, scrisă pentru fiecare din nodurile rezultate în urma discretizării spațiale a domeniului analizat.

Algoritmul de determinare a unei funcții de transfer echivalente plecând de la o reprezentare sub forma state space a sistemului, s-a dovedit a fi cel puțin la fel de exact ca metoda ce implică transformata Laplace (în condițiile în care spațiul este discretizat într-un număr suficient de elemente), în timp ce simplitatea în rezolvare și stabilitatea soluției îl recomandă în calculul transferului de căldură prin elementele anvelopei unei clădiri. Algoritmul este utilizat în prezent în simulatorul Energy Plus, pentru calculul conducției tranzitorii prin elementele de anvelopă. Totodată, a fost implementat de autorul tezei de doctorat într-un model matematic simplificat, optimizat utilizând elemente de inteligență computațională, detaliat în subcapitolul 4.4.

4.2. MODELE HIBRID DE ESTIMARE A ENERGIEI CONSUMATE PENTRU CLIMATIZAREA SPAȚIULUI INTERIOR ÎNTR-O CLĂDIRE

Literatura de specialitate împarte domeniul modelării clădirilor în două mari categorii: modelare *directă* și modelare *inversă* [97]. Modelarea **directă** (modele white-box) este alcătuită din abordări pur fizice, ce implică necesitatea unei descrieri amănunțite a materialelor de construcție ale clădirii, geometrie, amplasament, tipul sistemului HVAC, etc., cunoștințe ce nu sunt întotdeauna accesibile. Această abordare este în general utilizată pentru proiectarea și optimizarea sistemelor HVAC utilizate în clădiri. Datorită complexității lor, modele white-box sunt, de obicei, implementate cu ajutorul programelor de simulare a consumurilor energetice,

cum ar fi: EnergyPlus, ESP-r, TRNSys, ce utilizează datele meteorologice, descrieri detaliate privind clădirea și un set de ecuații complexe în vederea determinării bilanțului energetic și confortului interior Abordarea directă, sau white-box, a fost detaliată în CAPITOLUL 3.

La cealaltă extremă se află abordarea **inversă** (modele black-box), care utilizează modele bazate pe date reale și relații empirice pentru realizarea unei legături între intrări și ieșiri. În general, un model black-box este format dintr-o componentă statistică aplicată cu scopul de a corela consumul de energie de datele de operare ale clădirii [67]. Acest tip de modelare necesită date reale, măsurate la amplasamentul clădirii pe o perioadă lungă de timp. Aceste date trebuie să fie cât mai „bogate” în scenarii de operare a clădirii ca modelul să poată estima cu o acuratețe satisfăcătoare consumul de energie. Cea mai des întâlnită abordare în realizarea unui model black-box este Rețeaua Neuronala Artificială (RNA). Aceasta reprezintă o încercare de transpunere în mediul virtual a mecanismelor creierului uman. În esență, o RNA este un sistem instruibil, care folosește o cantitate relativ redusă de cunoștințe inițiale [98] și care are proprietatea de a se auto-ajusta. Aceste caracteristici dar și faptul că, spre deosebire de modelele analitice clasice (modele de regresie), pot lua decizii precise în eventualitatea apariției unei perturbări, au determinat cercetătorii să utilizeze acest sistem artificial de calcul în domeniul clădirilor. Până în prezent a fost realizată o serie vastă de modele bazate pe rețele neuronale artificiale, utilizând-se diferite tipuri de neuroni, de metode de ajustare a ponderilor, algoritmi de calcul, date de intrare, etc [99,100,101,102,103], modelele indicând o acuratețe satisfăcătoare în momentul în care sunt „antrenate” cu un număr suficient de mare de date de intrare. De exemplu, Ben-Nakhi et al. [102] au dezvoltat o RNA cu propagarea inversă a erorii (back-propagation network), utilizată pentru estimarea consumului de energie în trei clădiri de birouri, pe care au „antrenat-o” utilizând date măsurate în intervalul 1997–2000 și „validat-o” cu datele din anul 2001. În [68] este evidențiat faptul că, în cadrul concursului organizat de ASHRARE („Great Energy Prediction Shootout”), rețelele neuronale utilizate au fost antrenate cu date culese pe o durată de 4 luni, dar erorile în perioada de testare, au fost mult mai mari ca cele din perioada de validare, care a utilizat date măsurate pe perioada unei luni. În plus, faptul că acestea utilizează relații empirice în perioada de ajustare (pentru corelarea mărimilor de intrare cu cele de ieșire), nu descriu exact comportamentul termic al clădirii și nu se pot realiza scenarii de eficientizare utilizând capacitatea termică a acesteia. Cu toate că dezvoltarea unui model black-box este relativ ușoară, apărând în ultimul timp o serie de programe dedicate, printre care și MATLAB, volumul mare de date de intrare, precum și faptul că aceste modele nu respectă fenomenele reale de transfer de căldură în clădire, reprezintă dezavantaje majore. Mai mult, o schimbare bruscă în strategia de operare a clădirii, și care nu a fost efectuată în perioada de antrenare, poate induce erori mari în prezicerea consumului de energie în clădire [67,68].

Pentru a contracara dezavantajele abordărilor white-box și black-box, în ultimii ani au fost dezvoltate o serie de modele matematice hibrid, denumite în literatura de specialitate modele **gray-box**. Aceste modele sunt utilizate, în general, în momentul în care sistemul este parțial cunoscut și pot fi folosite în domeniul energeticii clădirii în momentul când există date incomplete sau parțial cunoscute [66]. Un model gray-box este practic o combinare între primele două abordări, rezultând un algoritm de calcul ce îmbină o descriere succintă a clădirii și date de antrenare și validare culese pe o perioadă scurtă de timp. Practic introducând într-un model pur empiric o descriere matematică a clădirii și a sistemului utilizat de acesta, necesarul de date de intrare în vederea „antrenării” modelului scade, rezultând un timp de calcul sensibil redus față de abordările white și black-box. Aceste metode de determinare a necesarului de energie pentru încălzirea și răcirea unei clădiri reprezintă o abordare relativ nouă, ideea de utilizare a modelului hibrid conturându-se odată cu analiza efectuată de Wang et al. [104] din anul 1999. Aceștia au utilizat teoria gray-box pentru a estima consumul de energie al unui sistem HVAC dintr-o clădire, erorile fiind în limite accesibile, chiar dacă datele de intrare utilizate au fost mai puține ca în cazul utilizării unei rețele neuronale artificiale.

Lucrarea cea mai reprezentativă este modelul dezvoltat de Braun et al. [68], care a propus o procedură ce utilizează trei pași unici în vederea estimării necesarului de energie pentru răcirea unei clădiri din sectorul terțiar. Acesta a utilizat o reprezentare simplificată a clădirii, considerând-o ca fiind compusă dintr-o singură zonă termică. Fiecare componentă a clădirii (pereți exteriori, acoperiș, pardoseală, zona interioară) a fost modelată sub forma unei reprezentări simple, compusă din trei rezistențe și două capacitați termice (3R2C). Utilizarea rețelei termice permite captarea transferului termic în clădire și a capacitații termice, permitând o simulare mai bună a dinamicii clădirii, comparat cu un model black-box. Această reprezentare a fost utilizată drept discretizare spațială, asupra căruia s-a utilizat metoda prezentată în secțiunea 4.1.2 în vederea obținerii funcției de transfer echivalente. În rezolvare au fost utilizate doar intrările ce influențează direct clădirea, ceea ce a indus erori mari, rezultând necesitatea implementării unei metodologii de calibrare a modelului simplu. Această procedură de optimizare și calibrare presupune un proces recursiv, realizabil în trei pași [68]:

1. Obținerea limitelor spațiului de variație a parametrilor ce compun rețeaua termică a clădirii, utilizând o metodă statistică (mai simplu de utilizat comparând cu modelul white-box), rezultată în urma unei descrieri succinte a elementelor componente ale envelopei termice.
2. Aplicarea unui algoritm global de căutare în spațiul obținut la punctul anterior în vederea estimării parametrilor ce satisfac funcția de transfer implementată.
3. Aplicarea unui algoritm regresiv, bazat pe informația derivatelor locale, utilizat pentru a determina parametrii optimi ce minimizează eroarea între estimarea modelului simplificat și un model detaliat (a fost utilizat programul TRNSys în studiu).

Schema logică a modului de optimizare este prezentată în Figura 4.2, unde se pot observa cele trei etape utilizare.

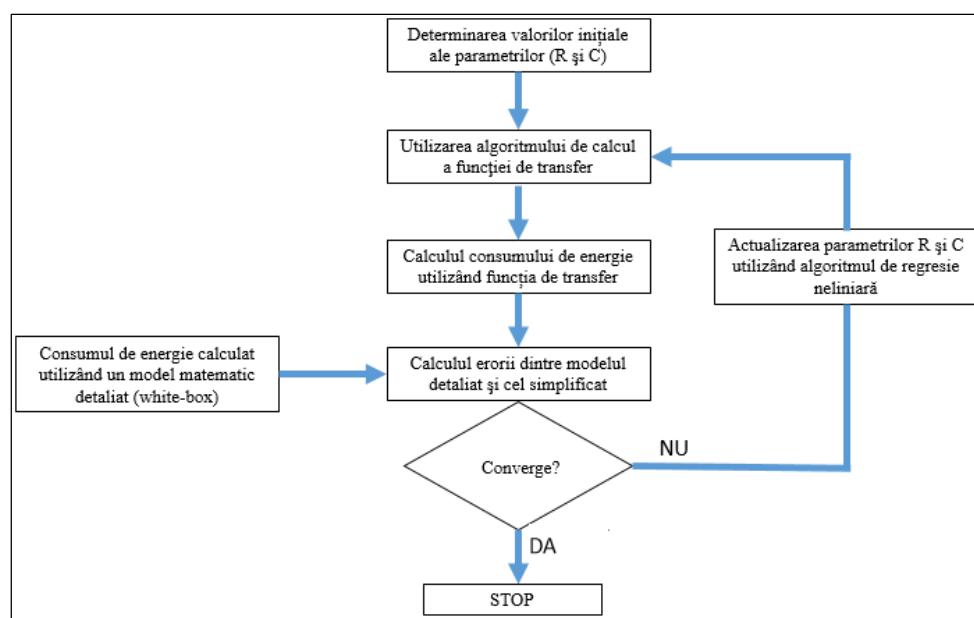


Figura 4.2. Schema logică ce descrie proceul de optimizare al modelului gray-box [68]

Procedul de optimizare a fost utilizat pentru a obține cele mai bune valori ale rezistențelor și capacitaților termice, folosite ulterior în calculul consumului de energie pentru răcirea clădirii, utilizând un nou set de date de intrare. Autorii au concluzionat faptul că, pentru a asigura convergența către valoarea măsurată, este nevoie de o perioadă de „antrenare” cuprinsă între una și două săptămâni, o îmbunătățire majoră comparând cu necesarul de date pentru convergența unui model black-box. Erorile induse de modelul simplificat, comparat cu modelul TRNSys au fost de maxim 2%, când modelul a fost antrenat cu date măsurate pe o perioadă de două săptămâni [68].

Printre alte cercetări în modelarea gray-box, merită menționați algoritmii implementați de Xu și Wang [105,106,107,108], care au utilizat aceeași abordare în reprezentarea clădirii

(rețele termice), diferența constând în metoda de obținere a funcției de transfer, pentru care au utilizat metoda transformatei-Z (detaliată în secțiunea 4.1.2) și metoda de optimizare, pentru care au utilizat un algoritm genetic simplificat. Sugerând faptul că, în practică, dinamica anvelopei exterioare este diferită de cea a părții interioare (datorită factorilor externi ce acționează direct asupra anvelopei), a fost adoptată o rețea termică formată din 2 rezistențe, 2 capacitați (2R2C) pentru zona interioară a clădirii și 3 rezistențe, 2 capacitați (3R2C) termice pentru modelarea părții de cuplare cu mediul exterior (Figura 4.3). Parametrii din rețeaua termică sunt determinați utilizând algoritmul genetic, ce poate găsi valoarea optimă ce minimizează eroarea dintre model și date măsurată în spațiul analizat. În studiul efectuat în referință [108], algoritmul genetic este utilizat în vederea estimării parametrilor ce compun masa termică interioară a clădirii, în timp ce, parametrii ce compun anvelopa sunt considerați cunoscuți, ei provenind de la o descriere detaliată a materialelor ce o compun. Eroarea medie dintre modelul gray-box și măsurători a fost de doar 7,8%, aceasta crescând la 9,7% în momentul în care spațiul de căutare aplicat algoritmului genetic a suferit o modificare în numărul de puncte considerate.

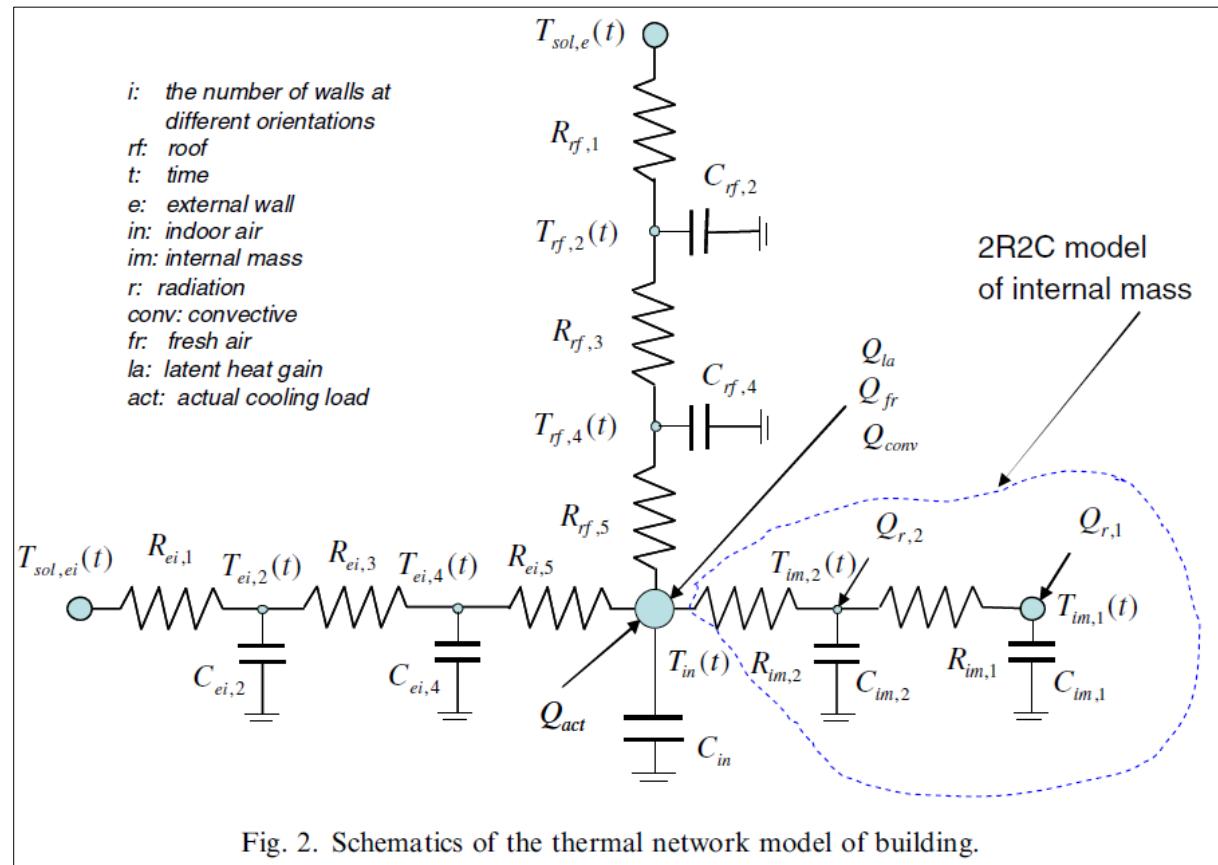


Fig. 2. Schematics of the thermal network model of building.

Figura 4.3. Schema rețelei termice utilizate în modelul gray-box [108]

4.3. ELEMENTE TEORETICE ALE ALGORITMILOR GENETICI (GA)

Algoritmii evolutivi (AE) sunt o familie de programe de calcul stocastice, bazate pe elemente din teoria evoluționistă emisă de Darwin. Aceștia copiază procesele naturale evoluționiste, cum ar fi selecția naturală, supraviețuirea celui mai bun individ, mutația, împerecherea, etc. și, cu ajutorul modulelor de calcul implementate, formează un instrument eficient de căutare stochastică a unei soluții optime pentru o problemă dată. Plecând de la această paradigmă, găsirea unei soluții optime într-o problemă dată, este tratată ca o luptă de supraviețuire între indivizi, competiția fiind forța motrice din spatele evoluției [109]. Fundamentalul algoritmilor evolutivi constă în implementarea unor „indivizi” artificiali, care permit analiza problemei implementate. Aceștia concurează între ei în vederea găsirii soluției optime, după care, doar cei cu rezultatele cele mai bune sunt păstrați și trec în etapa următoare,

procesul repetându-se de un număr fix de ori (număr de iterații) sau până când soluția converge către rezultatul dorit sub un anumit prag. Algoritmii evolutivi pot fi împărțiți în trei mari categorii: *Algoritmi Genetici* (GA – Genetic Algorithms), *Strategii Evolutive* (ES–Evolutionary Strategies) și *Programare Evolutivă* (EP – Evolutionary Programming) [110]. Toate aceste modalități de calcul evolutiv imită, mai mult sau mai puțin, teoria darwiniană. În Figura 4.4 este reprezentată ciclul de funcționare al unui algoritm evolutiv.

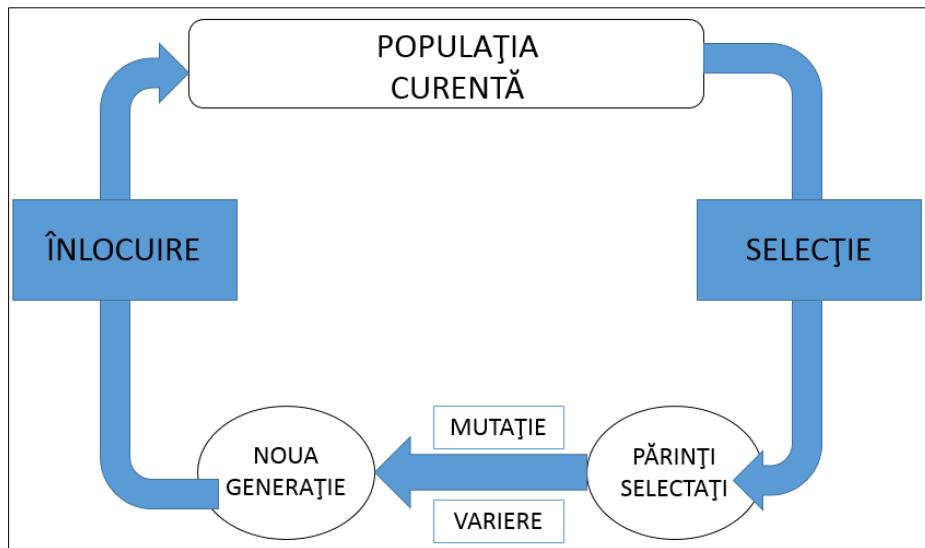


Figura 4.4. Un ciclu de bază utilizat în funcționarea algoritmilor evoluționisti [adaptare din 110]

Idea calculului evoluționist a fost introdusă la începutul anilor 50, când mai mulți cercetători independenți au studiat, simultan, ideea de a utiliza teoria evoluției speciilor în domeniul optimizării problemelor, fără foarte mare succes [109,111]. Ideea de bază în aceste încercări era aceea de a evoluă o populație de bază, formată dintr-un set de soluții posibile la o problemă dată, utilizând operatori regăsiți în selecția naturală [111]. Prima reușită care a avut un impact în rândul cercetătorilor, i-a aparținut lui I. Rechenberg, care a publicat lucrarea intitulată „*Evolution Strategies*”, în care era prezentată ideea de strategie evolutivă, cu ajutorul căreia a optimizat un model matematic ce calculează un profil aerodinamic [111].

Ideea a fost apreciată și îmbunătățită de alți programatori, printre care și John Holland, care a creat fundamentele teoretice ale algoritmilor genetici (GA–Genetic Algorithms) și primele aplicații în cartea intitulată „*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”. Spre deosebire de abordările anterioare, Holland nu a dorit crearea unui algoritm de calcul pentru o problemă anume, ci a dorit mai mult studierea fenomenului natural de adaptare precum există el în natură și găsirea unei practici general valabile de a transpună fenomenul în sisteme computaționale. Aceasta a propus un model universal, ce avea capacitatea de a „evoluă” prin recombinarea informației și transmiterea acesteia la generații următoare, fiind la bază o euristică de căutare, ce s-a dovedit foarte eficientă într-o gamă largă de aplicații descrise de un număr limitat de parametri, ce pot reacționa între ei într-un mod complex și neliniar [111,112]. Noutatea propusă de Holland a fost în crearea unei populații inițiale formată din cromozomi artificiali (șiruri de 1 și 0) ce are capacitatea de a evoluă într-o populație nouă, compusă din indivizi mai adaptați cerințelor problemei, utilizând conceptul de „selecție naturală”, combinat cu operatori inspirați din natură precum recombinarea, mutația și inversarea cromozomilor. Fiecare cromozom reprezintă o posibilă soluție la problema dată. Forma canonică a unui GA, în viziunea lui Holland este următoarea [113]:

1. Inițializarea unei populații compusă din μ indivizi inițializați aleatoriu.
2. Fiecare individ îi este atribuită o funcție de fitness (potrivire).
3. Selecție aleatorie a $\mu/2$ perechi de părinți, care vor forma o nouă populație.

4. Formarea urmașilor cu o probabilitate oarecare P_c , (crossover probability) utilizând operația de încrucișare pentru cele $\mu/2$ perechi de părinți. Urmașii vor înlocui părinții în noua populație.

5. Operația de mutație este efectuată cu o probabilitate oarecare P_m (mutation probability) asupra populației noi.

6. Noua populație devine populația curentă.

7. În ipoteza în care condiția de finalizare este îndeplinită se termină iterațiile, dacă nu, se reia procesul de la punctul 3.

Din populația inițială ce conținea μ indivizi, cele mai bune $\mu/2$ perechi de părinți sunt alese pentru a forma o nouă populație. Cu o probabilitate dorită, notată cu P_c , fiecare pereche aleasă se recombină cu ajutorul operatorului de încrucișare (crossover), rezultând o pereche de progenituri. Inițial, progenitura reprezintă o dublare a unuia dintre părinți, după care, introducând un punct de separare al informației (cross point) în interiorul cromozomului, se formează doi indivizi diferenți ce cei inițiali (părinți), dar identici între ei și vor înlocui indivizii vechi în cadrul populației implementate. După această etapă, prin introducerea unei probabilități de mutație (P_m), sunt amestecate aleatoriu informațiile în interiorul fiecărui cromozom, rezultând o populație complet nouă. Acest procedeu iterativ se repetă până când este satisfăcut un criteriu de terminare. De obicei, algoritm rulează de un număr fix de ori (număr de iterații), sau până în momentul când unul sau mai multe criterii de convergență sunt îndeplinite în interiorul populației [113].

În prezent, algoritmii genetici sunt utilizați într-o gamă foarte largă de aplicații, precum: bioinformatică, aplicații de tip programare, inginerie mecanică, design molecular și.a.. În vederea modelării unei probleme utilizând algoritmi genetici, inițial trebuie identificați parametrii de interes. Uzual, o parte din acești parametri sunt fixați și pot fi utilizați direct, în timp ce restul parametrilor trebuie variați în vederea obținerii estimării optime a rezultatului. În Figura 4.5 sunt prezentate schematic acțiunile ce au loc în interiorul unui algoritm genetic generic. Acești parametri de interes formează "cromozomul" algoritmului. O rutină GA începe prin inițializarea aleatorie a unei populații de indivizi, fiecare cu un cromozom propriu, și rezolvă problema dată pentru toți indivizii.

Evaluarea indivizilor se face utilizând o funcție de "potrivire" (fitness) care determină cea mai bună generație de indivizi. În plus, operatori genetici precum mutația (mutation) și încrucișarea (crossover) sunt utilizați pentru a evita convergența către un maxim/minim local. Acești operatori sunt aplicații doar cu o anumită probabilitate, stabilită în prealabil. În final, acești pași intermediari sunt repetați de un număr fix de iterații, până când eroarea scade sub un prag impus.

În domeniul ingineriei, aplicațiile implică de obicei mulți parametri de interes utilizati în modele matematice complexe. În aceste cazuri, rezolvarea setului de ecuații (de obicei de dimensiuni foarte mari) necesită o putere de procesare mare, chiar și în ipoteza cunoașterii parametrilor de interes; în schimb, pentru determinarea acestora, este nevoie o putere auxiliară de calcul și conduce la o creștere a timpului de rezolvare a procesului.

În consecință, în aceste cazuri, se dorește estimarea parametrilor necunoscuți (operărie ușor de realizat cu ajutorul algoritmilor genetici), în defavoarea calculării lor, mai ales în condițiile în care aplicația nu necesită precizie foarte ridicată.

Fiecare iterație este denumită o „generație”. În funcție de tipul problemei pentru care este utilizat, algoritmul genetic poate utiliza un număr variat de „generații” (în general cuprins între 50 și 5000), iar întregul set de iterații utilizat se numește „rulare” (eng. run). La sfârșitul fiecărei rulări există, de obicei, unul sau mai mulți cromozomi ce se potrivesc mai bine cerințelor problemei, și care converg mai bine către soluția dorită. Datorită faptului ca elementul aleatoriu (randomness element) joacă un rol important în crearea și rularea unui algoritm genetic, două rulări nu vor descrie același comportament, însemnând faptul că răspunsul poate fi ușor diferit. Din această cauză, de obicei, se utilizează un raport statistic în care sunt trecute cele mai bune valori ale fitness-ului dintr-o rulare, precum și generația de indivizi care au înregistrat acel fitness [111].

Un GA este compus din un număr de componente distincte. Acest lucru reprezintă un avantaj major, deoarece componentele standard ce îl formează pot fi reutilizate în cadrul altor aplicații, ușurând munca dezvoltatorilor [114].

Principalele mărimi (operatori GA) ce caracterizează algoritmul genetic sunt: **dimensiunea populației, funcția de fitness, selecția și reproducerea** (probabilitatea de mutație și încrucișare) și sunt descrise succint în paragrafele următoare.

Populația inițială. Primul pas în aplicarea unui algoritm genetic într-o problemă de optimizare este stabilirea dimensiunii populației inițiale. Aceasta este compusă din indivizi (sau cromozomi), ce conțin inițial valori introduse aleatoriu dintr-un domeniu stabilit prin introducerea limitelor spațiului de căutare. Această repartizare aleatorie a valorilor în spațiul de căutare este motivată de faptul că populația inițială trebuie repartizată cât mai uniform în acest domeniu, în vederea creșterii abilității de căutare a programului. Numărul indivizilor ce formează populația inițială trebuie ales astfel încât să existe suficiente date în vederea găsirii soluției optime (o populație mai mare poate cuprinde mai multe seturi de posibile răspunsuri), dar și să minimizeze efortul computațional. În literatura de specialitate este sugerată alegerea unei populații cuprinse între 10 și 160 de cromozomi pentru aplicațiile tipice [110].

Funcția de adevare (Fitness Function). Reprezintă esența calculului evoluționist și implicit a algoritmilor genetici și este reprezentată de teoria darwiniană care susține ideea de supraviețuire a celui mai adaptat individ (survival of the fittest). Plecând de la această afirmație, în implementarea unui algoritm genetic este necesară introducerea unui criteriu de evaluare a indivizilor din populația inițializată, din punct de vedere al potențialului de supraviețuire și de reproducere. În problemele de optimizare, acest criteriu, sau funcție de fitness, este o reprezentare matematică a erorii dintre valoarea individului și ținta fixată de convergență. Un GA folosește funcția de fitness ca un instrument discriminator aplicat soluțiilor posibile, înmagazinate în interiorul cromozomilor sub formă de informație. Cu cât fitnessul calculat este mai mare, cu atât cromozomul respectiv conține informații mai aproape de realitate și este de preferabil a fi păstrat în vederea formării unei noi populații.

Selecția. Plecând de la același principiu de selecție naturală a celui mai potrivit individ, a fost necesară introducerea unui parametru care poate cuantifica acest lucru. Selecția are rolul

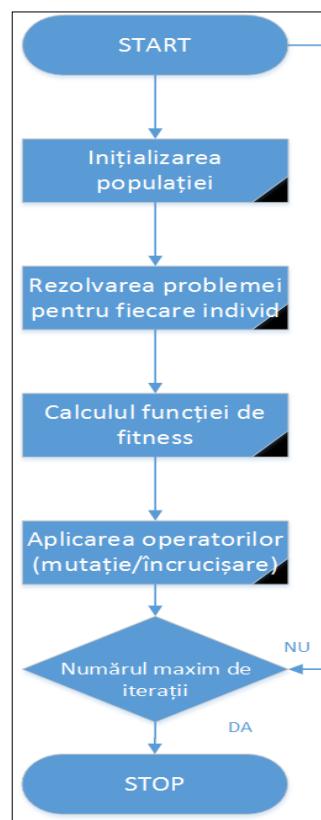


Figura 4.5. Acțiunile definitorii ale algoritmului genetic

de a evidenția cele mai bune soluții din populație. Acest operator nu produce soluții noi, dar este în strânsă legătură cu fitnessul fiecărui individ, și în funcție de acesta „decide” care cromozom este optim pentru a fi păstrat în vederea creării unei noi populații. Cromozomul care are un fitness mai bun trebuie să aibă atribuită cea mai mare șansă de reproducere. Soluțiile care nu se ridică la nivelul dorit sunt șterse. Există mai multe abordări în realizarea selecției celui mai bun cromozom dintr-o populație. Cea mai simplă modalitatea este de a sorta populația în funcție de scorul fitness-ului, alegând statistic cele mai bune soluții, dar există și metode care funcționează pe atribuirea unei probabilități de selecție a fiecărui individ, sortarea efectuându-se ținând cont atât de această probabilitate, cât și de funcția de fitness [114]. Metoda Turnirului (Tournament Selection) presupune alegerea aleatorie a doi cromozomi cu o probabilitate uniformă, pe care îi compară între ei pe baza funcției de fitness, alegându-l pe cel mai adaptat. În general operatorii de selecție sunt caracterizați de o mărime echivalentă cu timpul de selecție (takeover time—timpul de preluare), fiind definit ca perioada necesară soluției optime să ocupe întreaga populație aplicând doar operatorul de selecție. Acest criteriu este deosebit de important în alegerea operatorului optim de selecție, deoarece poate induce erori semnificative în procesul de optimizare. Alegerea unui timp prea mic poate produce o convergență prematură, rezultând o soluție proximă, dar nu optimă.

Încrucișarea (crossover). Reprezintă noutatea introdusă de Holland la metodele de calcul evoluționist care existau până atunci, fiind totodată elementul distinctiv al algoritmilor genetici. După etapa de *selecție*, moment în care există deja o populație intermediară (denumită și piscină de încrucișare—crossover pool), sunt aleși aleatoriu doi sau mai mulți indivizi cărora le sunt interschimbate elemente, după un punct de tăiere, ales aleatoriu. Acest operator alege un loc aleatoriu pentru împărțirea cromozomului, de obicei, în două părți, între care realizează schimbul de elemente. După alegerea cromozomilor ce vor fi supuși operației de crossover, este generat cu o probabilitate uniformă un număr aleatoriu din intervalul $[0,1]$, care este apoi comparat cu o „rată de încrucișare”. Dacă numărul generat este mai mare decât rata de crossover, operația nu are loc și cromozomii aleși trec nealterați în generația următoare. În caz contrar, se aplică operația de crossover [114]. De exemplu, pentru două siruri binare, care reprezintă părinții, având forma din Figura 4.6, operatorul crossover produce doi indivizi noi, care conțin informații combinate de la ambii părinți. Punctul de încrucișare a fost ales la al treilea element din fiecare cromozom. Aceste elemente trebuie să fie identice pentru fiecare individ, altfel operația de crossover nu poate fi efectuată. Se poate observa că noii indivizi conțin informație combinată (culoarea albastră pentru primul părinte și galbenă pentru cel de-al doilea părinte). Ideea utilizării acestui operator constă în încercarea de a îmbunătăți performanțele indivizilor cu fiecare iterație efectuată, crescând astfel șansele de a obține cea mai bună soluție la o problemă dată. Probabilitatea de crossover (P_c) este un factor important în convergența algoritmului către optim. Un studiu detaliat va fi prezentat în secțiunile următoare.

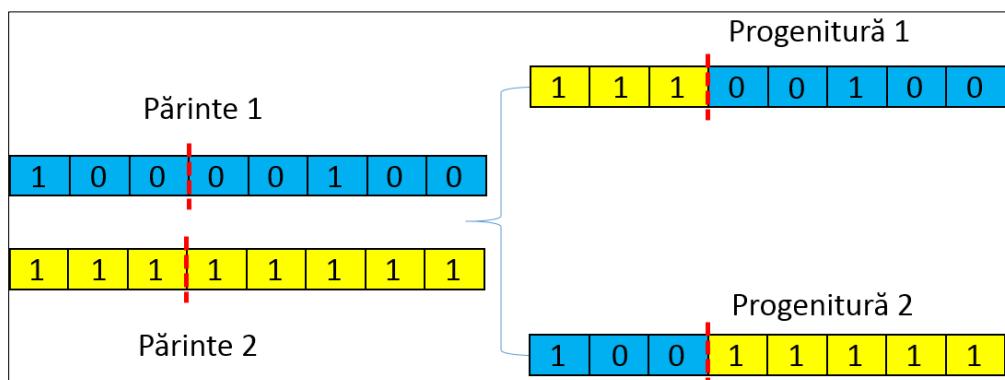


Figura 4.6. Operația de încrucișare efectuată pe doi cromozomi

Există mai multe posibilități de a efectua operația de crossover. Încrucișarea efectuată doar într-un punct al cromozomului poate fi extrapolată la două sau mai multe tăieturi în cadrul

aceluiași individ. Urmașii sunt creați prin recombinarea cromozomilor în fiecare punct de tăietură, operație realizată cu o probabilitate uniformă distribuită. De asemenea, în urma operației de crossover, pot rezulta, în funcție de aplicația dorită, unul sau mai mulți urmași, care sunt transmiși către următoarea operație efectuată în interiorul algoritmului.

Mutăția (Mutation). Rolul acestui operator este acela de a introduce material genetic nou în populație, crescând astfel diversitatea și şansele de a obține indivizi mai performanți, fiind aplicată ulterior operației de crossover [114]. Operatorul de mutație înlocuiește în mod arbitrar una sau mai multe valori în interiorul unui cromozom, creând astfel un individ cu totul nou, care va fi cooptat în populația nou formată. Mutăția poate să aibă loc în orice punct din interiorul unui cromozom, cu o probabilitate impusă de către dezvoltator, valoarea acestei probabilități fiind de obicei foarte mică (de exemplu 0,001) [111]. În Figura 4.7 este ilustrată operația de mutație efectuată pe un cromozom binar, efectuată pentru elementul patru din individ. Informația înmagazinată pe acea poziție este modificată, rezultând un cromozom total diferit, ce va trece prin aceleași etape pe prelucrare în cadrul unei iterări noi.

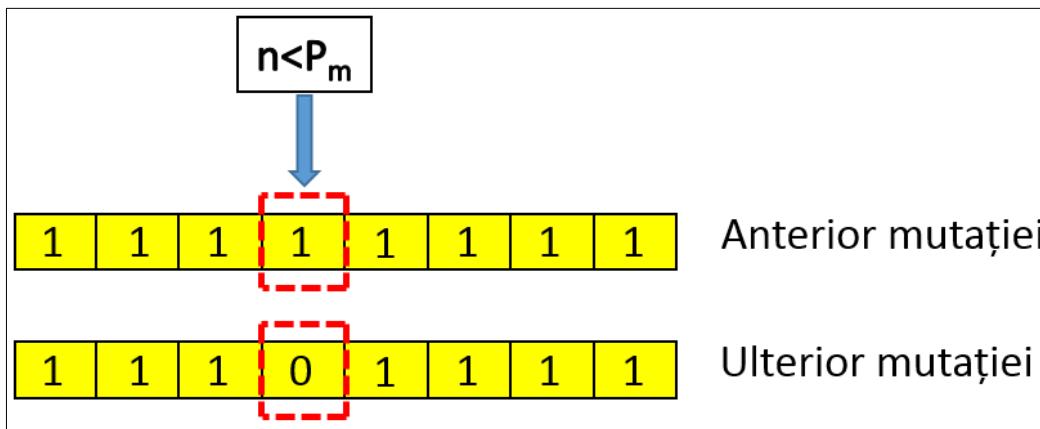


Figura 4.7. Efectuarea operației de mutație pe un cromozom binar

Cea mai utilizată metodă de mutație este *mutația în formare*, prin intermediul căreia se generează aleatoriu un număr pozitiv și subunitar (n), cu care se compară probabilitatea de mutație (P_m). În cazul în care numărul generat asociat unei poziții în cadrul cromozomului (4 în exemplul ilustrat anterior) este mai mic decât probabilitatea de mutație, acel element este înlocuit cu o valoare (0 sau 1 dacă se lucrează în sistem binar). În caz contrar, elementul de pe poziția respectivă rămâne neschimbat [111].

4.4. IMPLEMENTAREA MODELULUI GRAY-BOX, UTILIZAT ÎN COROBORARE CU UN ALGORITM GENETIC ÎMBUNĂTĂȚIT

În vederea implementării unei componente inteligente într-o clădire, primul pas este de a realiza o unitate de simulare a clădirii, compusă dintr-un model matematic ce îmbină toate elementele ce influențează consumul energetic pentru încălzire și răcire, responsabil cu aproximativ 50% din consumul total de energie [17]. Mai mult, clădirea intelligentă, conform definițiilor prezентate în secțiunea 1.3.2, trebuie să fie „capabilă să învețe” comportamentul utilizatorilor, ajustându-și modul de funcționare a echipamentelor componente, în vederea reducerii energiei consumate. Pentru aceasta este necesar a fi implementat un model de predicție a consumului de energie (next-day forecasting module). În literatura de specialitate, cuvântul „predicție” (eng. Prediction) este atribuit etapei de validare a unui model matematic simplificat, pentru care s-a aplicat o metodă de optimizare, dar nu descrie o estimare în avans a consumului de energie în clădire. Posibilitatea de a prezice cât mai exact energia necesară pentru încălzire este extrem de utilă, având aplicabilitate atât în eficientizarea sistemelor de producere și stocare a energiei din surse regenerabile, cât și în eficientizarea timpului de operare a sistemelor HVAC. Pentru a putea realiza o predicție a consumului de energie, este necesar, în primul rând, să se realizeze o predicție a factorilor ce influențează acest consum. Utilizarea modelelor white-box

s-a dovedit a fi neficientă, datorită numărului mare de parametri de intrare, asupra căror trebuie să se aplică algoritmi de predicție. Pentru a contracara aceste deficiențe, Zhou et al. [115] au implementat un model de predicție a sarcinii termice necesare într-o clădire bazat pe o structură multi modală ce se bazează pe predicția on-line a datelor meteorologice utilizate (radiația solară, temperaturi minime și maxime, nebulozitate, umiditate relativă).

În viziunea autorului, pentru a putea prezice eficient consumul de energie, este nevoie, pe lângă modulul de estimare a datelor meteorologice, de implementarea unui model matematic foarte eficient, ce poate inițial estima cu o eroare foarte mică acest consum de energie. Mai mult, în vederea unei interacțiuni eficiente cu celelalte module componente ale clădirii inteligente, modelul matematic ales trebuie să aibă o structură cât mai simplă, fără a neglija performanțele de estimare a energie. Prin aplicarea unei metode eficiente de optimizare asupra unui model matematic simplu ce calculează consumul de energie într-o clădire, rezultatele obținute în cadrul tezei de doctorat pot fi utilizate în vederea implementării unui modul intelligent al unei clădiri, ce poate realiza o precizare a consumului de energie pentru a doua zi cu o eroare minimă. În Figura 4.8 este prezentată schema propusă de către autor în vederea prezicerii energiei consumate într-o clădire.

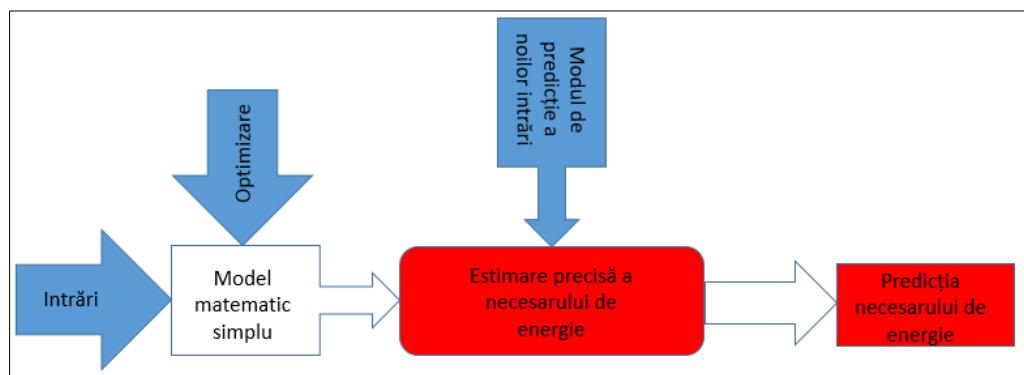


Figura 4.8. Diagrama modulului de prezicere a energie necesare într-o clădire

Alegerea modelului matematic s-a făcut ținând cont de numărul de date de intrare utilizat, în timp ce, prin implementarea modulului de optimizare s-a dorit minimizarea erorilor dintre datele măsurate și rezultatul calculului matematic. Aceste două aspecte sunt cele mai importante în vederea realizării unui pattern de consum realist, utilizat apoi de componenta intelligentă în vederea eficientizării sistemului HVAC.

4.4.1. Implementarea modelului matematic hibrid

În vederea calculului energiei necesare pentru încălzire a fost utilizată abordarea descrisă în secțiunea 4.1.2, metodă bazată pe obținerea unei funcții de transfer echivalente dintr-o reprezentare state-space a ecuațiilor diferențiale ce descriu dinamica unei clădiri:

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = c^t \cdot x + d^t \cdot u \end{cases} \quad (4.34)$$

$$(4.35)$$

rezultând funcția de transfer:

$$y(t) = \sum_{k=0}^n S_k^t u_{t-k\Delta t} - \sum_{k=1}^n e_k y(t - k\Delta t), \text{ unde } {}^t \text{ reprezintă transpusa} \quad (4.36)$$

Elementele ce compun sistemul de ecuații diferențiale sunt extrase din reprezentarea clădirii sub forma unei rețele termice, detaliată în Figura 4.9. În vederea simplificării sistemului, clădirea este considerată a fi compusă doar din următoarele elemente: pereți exteriori (indice e), suprafețe vitrate (indice w – windows), acoperiș (definit de indice c – ceiling), pardoseală (indice f –floor), și zonă interioară (indice i), modelate sub forma unei structuri simple, formată din două stări (temperaturile în punctele de discretizare), trei rezistențe și două capacitați

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică termice (3R2C). Totodată, din considerente simplificatoare, interiorul clădirii a fost modelat ca o singură zonă termică, compusă din pereți interioiri.

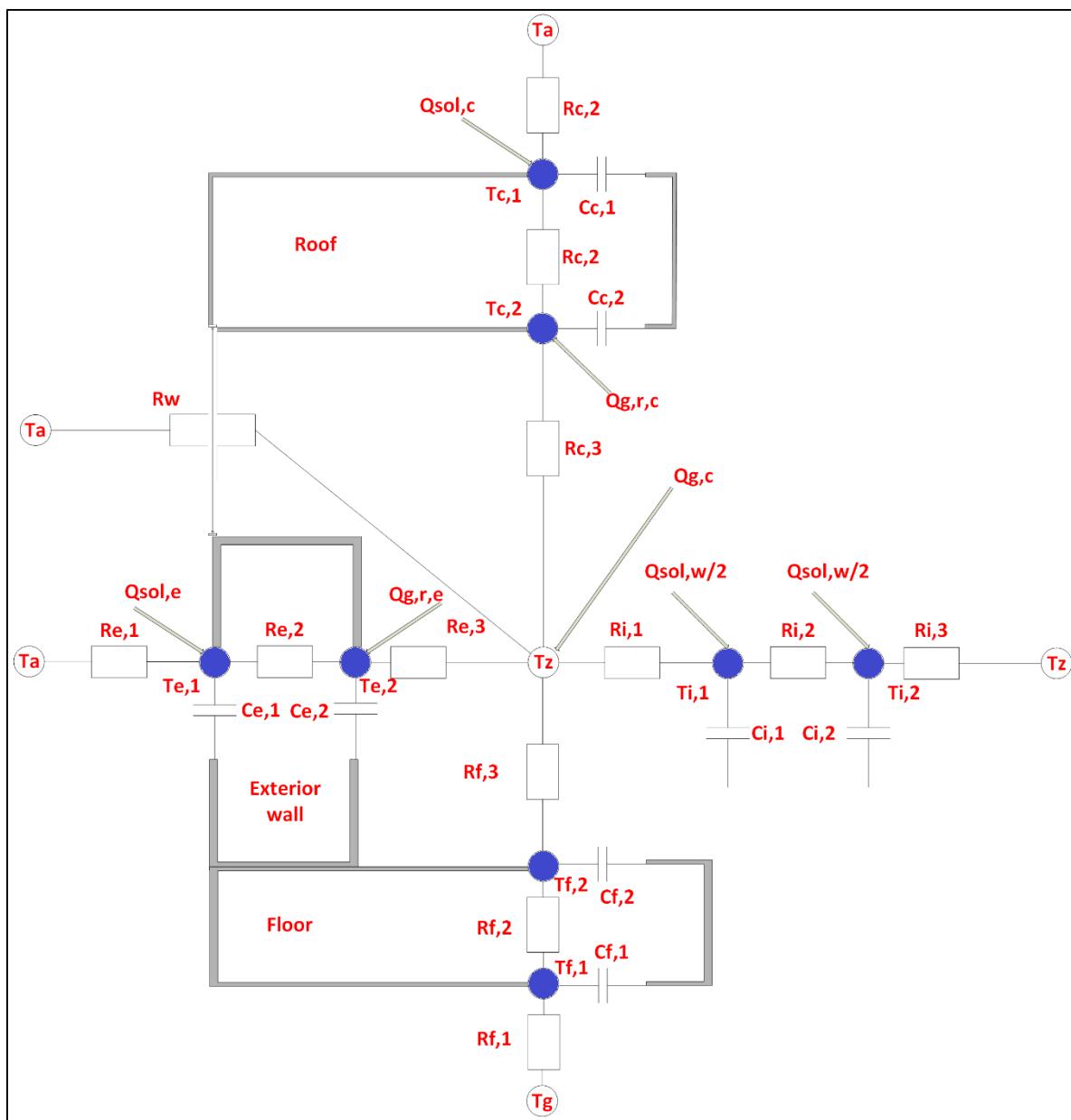


Figura 4.9. Rețeaua termică utilizată pentru a descrie clădirea analizată

Analizând sistemul de ecuații state-space și rețeaua termică a clădirii, vectorul stărilor (\mathbf{x}) este compus din valorile temperaturilor în punctele de discretizate. Astfel, în reprezentarea clădirii au fost considerate opt puncte de discretizare (8 stări ale sistemului, reprezentate cu culoarea albastră în Figura 4.9), fiind caracterizate de valorile temperaturilor pe suprafața interioară și exterioară a fiecărui element. Vectorul stărilor are următoarea configurație:

$$\mathbf{x}^t = [T_{c,1}, T_{c,2}, T_{e,1}, T_{e,2}, T_{f,1}, T_{f,2}, T_{i,1}, T_{i,2}] \quad (4.37)$$

Prin metoda prezentată în [86] acest vector al intrărilor este eliminat din calculul funcției de transfer, lucru ce simplifică determinarea acesteia.

Vectorul \mathbf{u} (vectorul intrărilor) este compus din toate mărimile ce influențează consumul de energie pentru încălzirea și răcirea unei clădiri și anume: temperatura zonei (T_z), ce poate fi considerată constantă, temperatura exterioară măsurată (T_a), temperatura solului (T_g), radiația solară absorbită de elementele opace și vitrate (Q_{sol}), și aporturi interne (Q_g). Temperatura zonei este considerată a fi media temperaturilor măsurate în fiecare cameră din Casa Laborator, în

în timp ce temperatura exterioară și cea a solului sunt obținute direct prin măsurare, cu ajutorul sistemului implementat și detaliat în secțiunea 2.2.1.

Radiația solară are două componente în funcție de elementul pe care îl influențează. Astfel, radiația incidentă căzută pe acoperiș ($Q_{sol,c}$) este măsurată direct cu ajutorul piranometrului, în timp ce radiația care influențează pereții exteriori ($Q_{sol,e}$) și suprafetele vitrate ($Q_{sol,w}$) au fost calculate înmulțind valoarea măsurată cu o constantă ce ține cont de anotimp și unghiul de incidență (90°). Cantitatea de radiație transmisă prin elementele opace și vitrate ale clădirii au fost calculate conform algoritmului prezentat în referința [116]. Valoarea totală a radiației solare a fost obținută înmulțind valoarea măsurată sau calculată cu suprafața fiecărui element (acoperiș, pereți exteriori, suprafete vitrate). În calcul s-a ținut cont de faptul că există doar trei pereți exteriori ce compun clădirea studiată, cel de-al patrulea fiind un perete comun ce separă cele două case pasive din UPB. Radiația solară măsurată influențează partea exterioară a acoperișului, în punctul caracterizat de starea $T_{c,1}$. Radiația solară calculată pentru pereții exteriori influențează sistemul în punctul caracterizat de temperatură $T_{e,1}$, situat pe partea exterioară a pereților exteriori. Fiind considerat un parametru pur rezistiv (fără capacitate termică), radiația solară incidentă căzută prin ferestrele exterioare influențează direct zona interioară a clădirii, valoarea totală calculată fiind distribuită în mod egal între cele două puncte interioare ($T_{i,1}, T_{i,2}$).

În vederea estimării cantității de energie câștigate prin intermediul aporturilor interne s-a utilizat metoda descrisă în referința [68]. Câștigurile interne provin de la ocupanți (prin intermediul reacțiilor metabolice) și echipamentele electrice prin intermediul efectului Joule. În cadrul studiului curent s-a considerat un număr de 4 ocupanți, populând clădirea de luni până vineri, de la 9:00 AM la 18:00 PM. Pe timpul ocupării, s-a considerat că o persoană emite în medie 4 W/m^2 , sistemul de iluminat este responsabil cu aproximativ $6,7 \text{ W/m}^2$, în timp ce echipamentele existente în clădire sunt caracterizate de un flux termic unitar de aproximativ $14,3 \text{ W/m}^2$, rezultând un total de 25 W/m^2 . În perioada neocupată, doar 5% din câștigurile interne au fost considerate. Câștigurile interne au fost împărțite după două componente principale: câștiguri convective ($Q_{g,c}$) și radiative ($Q_{g,r}$). Astfel, pentru persoane s-a considerat un raport între componenta radiativă și cea convectivă de $3/7$, pentru iluminat de $8/2$, iar pentru echipamentele electrice de $2/8$. Câștigurile interne radiative influențează partea interioară a acoperișului (punctul caracterizat de starea $T_{c,2}$) prin componenta $Q_{g,r,c}$, dar și partea interioară a pereților exteriori ($T_{e,2}$) prin componenta $Q_{g,r,e}$. Componenta convectivă ($Q_{g,c}$) influențează doar nodul interior, caracterizat de starea T_Z .

Ținând cont de precizările anterioare, vectorul intrărilor are 9 componente, după cum urmează:

$$\mathbf{u}^t = [T_z, T_a, T_g, Q_{sol,c}, Q_{sol,e}, Q_{g,r,c}, Q_{g,r,e}, Q_{sol,w}, Q_{g,c}] \quad (4.38)$$

Elementele A , B , c , d sunt compuse din caracteristicile termice ale envelopei clădirii. Astfel, plecând de la datele descrise în Tabelul 2.1, au fost calculate rezistențele și capacitațile termice ale fiecărei componente, utilizând relațiile de mai jos:

$$R_{conducție} = S \cdot \frac{\delta}{\lambda} \quad \left[\frac{K}{W} \right] \quad (4.39)$$

$$R_{convecție} = S \cdot \frac{1}{\alpha} \quad \left[\frac{K}{W} \right] \quad (4.40)$$

$$C = S \cdot c_p \cdot \rho \quad \left[\frac{J}{K} \right] \quad (4.41)$$

Inițial a fost calculată rezistența termică echivalentă, ca fiind înserierea rezistențelor termice ale fiecărui strat din componenta analizată, la care s-au adăugat rezistențele termice convective interioare și exterioare. În studiul prezentat în teză, din considerante simplificatoare,

nu s-a ținut cont de influența factorilor externi asupra variației coeficienților de convecție, aceștia fiind considerați constanți ($\alpha_{interior} = 3 \text{ W/m}^2/\text{K}$ și $\alpha_{exterior} = 20 \text{ W/m}^2/\text{K}$). Rezistența totală a fost apoi împărțită la numărul de stări de pe fiecare componentă + 1, rezultând câte trei rezistențe. Același algoritm a fost utilizat și în privința capacităților termice, diferența constând în faptul că totalul rezultat a fost împărțit la numărul de stări considerat pentru fiecare componentă a rețelei termice a clădirii, rezultând două capacități termice cu valori egale.

Sistemul state-space a fost obținut prin scrierea ecuațiilor bilanțului termic (suma fluxurilor termice intrate și ieșite din fiecare nod) în fiecare punct de discretizare spațială a rețelei termice a clădirii, prezentată în Figura 4.9. Sistemul de 8 ecuații diferențiale obținut este detaliat prin ecuațiile 4.42 – 4.49.

$$C_{c,1} \frac{dT_{c,1}}{d\tau} = \frac{T_a - T_{c,1}}{R_{c,1}} + \frac{T_{c,2} - T_{c,1}}{R_{c,2}} + Q_{sol,c} \quad (4.42)$$

$$C_{c,2} \frac{dT_{c,2}}{d\tau} = \frac{T_{c,1} - T_{c,2}}{R_{c,2}} + \frac{T_z - T_{c,2}}{C_{c,2}} + Q_{g,r,c} \quad (4.43)$$

$$C_{e,1} \frac{dT_{e,1}}{d\tau} = \frac{T_a - T_{e,1}}{R_{e,1}} + \frac{T_{e,2} - T_{e,1}}{R_{e,2}} + Q_{sol,e} \quad (4.44)$$

$$C_{e,2} \frac{dT_{e,2}}{d\tau} = \frac{T_{e,1} - T_{e,2}}{R_{e,2}} + \frac{T_z - T_{e,2}}{R_{e,3}} + Q_{g,r,e} \quad (4.45)$$

$$C_{f,1} \frac{dT_{f,1}}{d\tau} = \frac{T_g - T_{f,1}}{R_{f,1}} + \frac{T_{f,2} - T_{f,1}}{R_{f,2}} \quad (4.46)$$

$$C_{f,2} \frac{dT_{f,2}}{d\tau} = \frac{T_{f,1} - T_{f,2}}{R_{f,2}} + \frac{T_z - T_{f,2}}{R_{f,3}} \quad (4.47)$$

$$C_{i,1} \frac{dT_{i,1}}{d\tau} = \frac{T_z - T_{i,1}}{R_{i,1}} + \frac{T_{i,2} - T_{i,1}}{R_{i,2}} + \frac{Q_{sol,w}}{2} \quad (4.48)$$

$$C_{i,2} \frac{dT_{i,2}}{d\tau} = \frac{T_{i,1} - T_{i,2}}{R_{i,2}} + \frac{T_z - T_{i,2}}{R_{i,3}} + \frac{Q_{sol,w}}{2} \quad (4.49)$$

Transformând sistemul de ecuații în reprezentare state-space, rezultă matricele A , B cu următoarele componente:

- A – matrice diagonală, având forma generală:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_4 \end{bmatrix} [h^{-1}] \quad (4.50)$$

unde:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_{c,1}C_{c,1}} + \frac{-1}{R_{c,2}C_{c,1}} & \frac{1}{R_{c,2}C_{c,1}} \\ \frac{1}{R_{c,2}C_{c,2}} & \frac{-1}{R_{c,2}C_{c,2}} + \frac{-1}{R_{c,3}C_{c,2}} \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

Contribuții la dezvoltarea modelului gray–box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_{e,1}C_{e,1}} + \frac{-1}{R_{e,2}C_{e,1}} & \frac{1}{R_{e,2}C_{e,1}} \\ \frac{1}{R_{e,2}C_{e,2}} & \frac{-1}{R_{e,2}C_{e,2}} + \frac{-1}{R_{e,3}C_{e,2}} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_{f,1}C_{f,1}} + \frac{-1}{R_{f,2}C_{f,1}} & \frac{1}{R_{f,2}C_{f,1}} \\ \frac{1}{R_{f,2}C_{f,2}} & \frac{-1}{R_{f,2}C_{f,2}} + \frac{-1}{R_{f,3}C_{f,2}} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_{i,1}C_{i,1}} + \frac{-1}{R_{i,2}C_{i,1}} & \frac{1}{R_{i,2}C_{i,1}} \\ \frac{1}{R_{i,2}C_{i,2}} & \frac{-1}{R_{i,2}C_{i,2}} + \frac{-1}{R_{i,3}C_{i,2}} \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

$$\mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

- \mathbf{B} , având relațiile pentru calcularea coeficienților diferenți de 0 în Tabelul 4.1:

Tabel 4.1. Relațiile de calcul pentru elementele diferite de 0 ale matricei \mathbf{B}

Linia 1	$\mathbf{B}(1,2) = \frac{1}{R_{c,1}C_{c,1}}$	$\mathbf{B}(1,4) = \frac{1}{C_{c,1}}$
Linia 2	$\mathbf{B}(2,1) = \frac{1}{R_{c,3}C_{c,2}}$	$\mathbf{B}(2,6) = \frac{1}{C_{c,2}}$
Linia 3	$\mathbf{B}(3,2) = \frac{1}{R_{e,1}C_{e,1}}$	$\mathbf{B}(3,5) = \frac{1}{C_{e,1}}$
Linia 4	$\mathbf{B}(4,1) = \frac{1}{R_{e,3}C_{e,2}}$	$\mathbf{B}(4,7) = \frac{1}{C_{e,2}}$
Linia 5	$\mathbf{B}(5,3) = \frac{1}{R_{f,1}C_{f,1}}$	-
Linia 6	$\mathbf{B}(6,1) = \frac{1}{R_{f,3}C_{f,2}}$	-
Linia 7	$\mathbf{B}(7,1) = \frac{1}{R_{i,1}C_{i,1}}$	$\mathbf{B}(7,8) = \frac{1}{2C_{i,1}}$
Linia 8	$\mathbf{B}(8,1) = \frac{1}{R_{i,3}C_{i,2}}$	$\mathbf{B}(8,8) = \frac{1}{2C_{i,2}}$

A doua ecuație din sistemul state-space este obținută scriind ecuația de conservare a energie pentru nodul interior, caracterizat de starea T_Z , având următoarea expresie:

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

$$y = \frac{T_z - T_{c,2}}{R_{c,3}} + \frac{T_z - T_{e,2}}{R_{e,3}} + \frac{T_z - T_a}{R_w} + \frac{T_z - T_{f,2}}{R_{c,3}} + \frac{T_z - T_{i,1}}{R_{i,1}} + \frac{T_z - T_{i,3}}{R_{i,3}} + Q_{g,c} \quad (4.56)$$

Transpunând ecuația 4.56 în sistem state-space, rezultă forma vectorilor \mathbf{c}^t și \mathbf{d}^t :

$$\mathbf{c}^t = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_{c,3}} & 0 & -\frac{1}{R_{e,3}} & 0 & -\frac{1}{R_{c,3}} & -\frac{1}{R_{c,3}} & -\frac{1}{R_{c,3}} \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

$$\mathbf{d}^t = \left[\left(\frac{1}{R_{c,3}} + \frac{1}{R_{e,3}} + \frac{1}{R_{f,3}} + \frac{1}{R_{i,3}} + \frac{1}{R_{i,1}} + \frac{1}{R_w} \right) - \frac{1}{R_w} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \right] \quad (4.58)$$

Utilizând relațiile prezentate în această secțiune, a fost calculată funcția de transfer prezentată prin ecuația 4.36, ieșirea reprezentând necesarul de energie pentru încălzire: $y = Q_{model}$. Rezultatul modelului a fost optimizat implementând un Algoritm Genetic îmbunătățit, detaliat în secțiunea următoare.

4.4.2. Implementarea Algoritmului Genetic

Ipotezele simplificatoare prezentate anterior au introdus erori mari de estimare a consumului de energie pentru încălzirea clădirii comparat cu datele măsurate, apărând necesitatea implementării unui modul de optimizare. Având capacitatea de a „căuta” soluția optimă pentru o problemă dată într-un interval de valori, autorul a optat pentru implementarea unui Algoritm Genetic în vederea minimizării diferenței dintre rezultatul modelului și datele măsurate de consum.

În abordarea matematică descrisă în secțiunea 4.4.1 rezultatul modelului este puternic influențat de datele de intrare și de caracteristicile termo-fizice ale materialelor constructive. Datele de intrare sunt date reale, măsurate cu ajutorul sistemului de monitorizare și acestea nu pot fi variate în vederea optimizării, rezultând faptul că algoritmul genetic trebuie aplicat asupra caracteristicilor componentelor anvelopei clădirii, reprezentate de rezistențele și capacitateile termice. Găsirea celor mai bune valori ale acestor elemente este un proces de optimizare neliniară, încurajând utilizarea unui algoritm genetic, care s-a dovedit extrem de eficient în rezolvarea acestui tip de probleme. AG poate converge rapid către o soluție suficient de bună (aproape de optim) și poate fi aplicat cu succes în momentul în care nu există necesitatea obținerii unui optim absolut. În cadrul tezei de doctorat algoritmul genetic este utilizat cu scopul de a găsi cele mai bune valori ale parametrilor R și C analizați, în vederea minimizării erorilor dintre estimarea matematică și datele reale. Relația matematică utilizată în optimizare reprezintă radicalul pătratului erorii relative, definită în ecuația 4.59, în care Q_{model} reprezintă consumul energetic estimat de modelul matematic, Q_{real} reprezintă energia contorizată, reală și N numărul de date pentru care se face optimizarea.

$$J_{GA} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (Q_{model} - Q_{real})^2}{N - 1}} \quad (4.59)$$

Inițial, Algoritmul Genetic este populat cu indivizi formați din parametrii de interes, rezistențe și capacitați termice, estimăți inițial printr-o descriere succintă a clădirii. Utilizând reprezentarea matematică bazată pe o rețea termică compusă din trei rezistențe și două capacitați termice, cromozomii vor fi formați din cel puțin cele cinci mărimi.

Din dorința de a realiza cea mai bună optimizare posibilă dar și de a oferi o aplicabilitate mai mare modelului matematic, au fost implementate mai multe forme ale cromozomilor analizați. În încercarea de a realiza o analiză cât mai cuprinzătoare, autorul a abordat două cazuri de referință ce se pot găsi în practică: o clădire nouă (sau aflată în etapa de construcție), pentru care se cunosc foarte bine datele termo-fizice ale anvelopei, și o clădire existentă, pentru care este dificil de a estima cu exactitate valorile parametrilor de interes. În ambele cazuri, ca și în realitate, datele exacte ale masei termice interne ale unei clădiri sunt greu, dacă nu imposibil de

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică obținut, datorită faptului că aceasta este compusă, pe lângă materialele pereților, și din ocupanți, mobilier, echipamente, etc.

În primul caz (clădire nouă), cromozomul tipic este format din cinci valori alese aleatoriu ale parametrilor interiori, prezentați în Figura 4.9:

$$C_1 = \{R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, C_{i1}, C_{i2}\} \quad (4.60)$$

În cel de-al doilea caz (clădire veche) a fost utilizată o populație formată din cromozomi ce conțin toți cei 20 de parametri (rezistențe și capacitate termice) ce formează rețeaua termică a clădirii (Figura 4.9 – 4 circuite echivalente 3R2C), ce pot fi variate pentru a obține o optimizare suplimentară. Odată cu această abordare, s-a găsit oportuna crearea a două tipuri de cromozomi ce pot fi utilizati în vederea analizării performanțelor Algoritmului Genetic. Cromozomul de bază, denumit *Complete Individuals1* presupune optimizarea tuturor celor 20 de parametri din componența sa, în timp ce, al doilea cromozom *CompleteIndividuals2* este format tot din aceeași parametri, dar operațiile genetice de mutație și încrucișare sunt efectuate doar pe elementele interioare (cele cinci mărimi prezentate în ecuația 4.60).

Populația de cromozomi a fost creată dând parametrilor de interes valori aleatorii într-un interval compus din anumite valori stabilite (minim și maxim), calculate utilizând datele termice ale Casei Laborator. Inițial, în calcularea acestor valori limită de minim și maxim, s-a ținut cont de tipul rezistenței termice (convectivă sau conductivă) și de minimul și maximul capacitații termice a fiecărui strat component al peretelui interior. Aceste valori vor forma spațiul inițial de căutare al algoritmului genetic implementat.

După inițializarea populației cu aceste valori aleatorii luate în intervalul de căutare stabilit, se poate realiza rezolvarea modelului matematic simplificat, prezentat în secțiunea 4.4.1. După o primă iterare, se aplică operatorii genetici de mutație și încrucișare în vederea asigurării unei diversități în interiorul populației. Acești operatori au fost aplicați cu o probabilitate specificată unui număr aleatoriu de mărimi din cadrul cromozomului.

Principalele caracteristici ale algoritmului genetic implementat sunt: *mărimea populației, numărul de iterații, numărul de indivizi ce supraviețuiesc* (sunt aleși de la o iterare la cealaltă), *probabilitatea de mutație, probabilitatea de încrucișare*. Varierea și combinarea acestor caracteristici influențează direct timpul în care algoritmul converge către rezultatul optim, precum și precizia acestui rezultat. În anumite implementări ale Algoritmilor Genetici există și o altă condiție de stopare a procedeului, diferită de numărul de iterații: eroarea calculată în funcție de rezultatul dorit. Când diferența între rezultatul măsurat (real) și rezultatul dorit scade sub un anumit prag impus, rularea algoritmului este oprită și se printează rezultatul obținut. Această caracteristică a fost utilizată în analiza influenței parametrilor Algoritmului Genetic asupra rezultatului. Operațiile caracteristice Algoritmilor Genetici au fost aplicate de un număr fix de ori, reprezentat de numărul de iterații, până când eroarea calculată scade sub un prag dorit.

În cazul operației de mutație, fiecare supraviețitor poate să își schimbe componența după o probabilitate impusă de utilizator. Numărul de puncte în vederea aplicării mutației pentru fiecare individ a fost ales arbitrar între 1 și numărul maxim de elemente din cromozom (5). În Figura 4.10 este reprezentată aplicarea operatorului de mutație pe două elemente din cromozomul prezentat prin ecuația 4.60, care conține doar elementele zonei interioare.

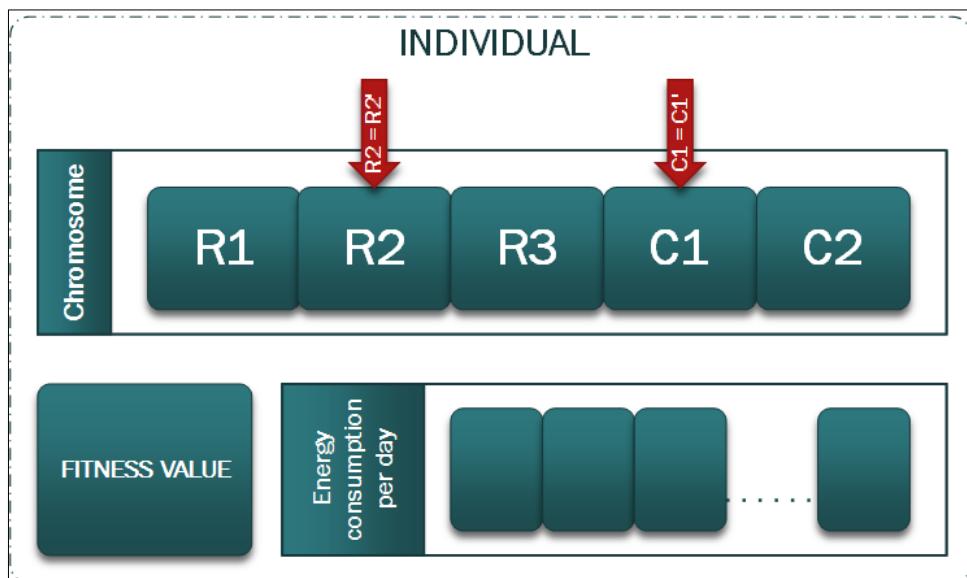


Figura 4.10. Aplicarea operației de mutație pe două elemente alese aleatoriu în cadrul unui cromozom cu 5 elemente

Operația de încrucișare aplicată unui cromozom oarecare din cei care au supraviețuit unei iterări se realizează doar în limitele unei probabilități impuse inițial de către utilizator, în timp ce numărul de elemente interschimbată în interiorul cromozomului este ales arbitrat în același interval ca și în cazul operației de mutație (Figura 4.11).

Pasul de timp în vederea calculării necesarului de energie cu ajutorul modelului matematic a fost ales egal cu o oră, rezultând necesitatea de a colecta datele de intrare cu același pas de timp. Cu toate acestea, agregarea datelor măsurate din oră în oră, pentru a forma energia măsurată zilnică este necesară atât din considerente computaționale cât și din punctul de vedere al prezentării datelor într-un format agreabil. În consecință algoritmul implementat determină cei mai buni parametri ce satisfac minimizarea erorii între măsurat și calculat în funcție de 24 de intrări per zi.

Elementul de noutate în implementarea Algoritmului Genetic îl reprezintă faptul că acesta a fost conceput ca o înlănțuire de algoritmi (eng. chained GA). Practic, acesta păstrează cele mai bune valori obținute pentru o perioadă scurtă de timp (minim o zi), utilizându-le în calculul viitoarelor valori. În acest sens se pot selecta perioadele pentru implementare, acestea variind între o zi și perioada maximă monitorizată (121 de zile pentru casa pasivă).

Mai mult, în cadrul aplicației prezentate în secțiunea următoare, există posibilitatea de a realiza o analiză de sensibilitate pentru a observa modul în care anumite intrări influențează rezultatul algoritmului implementat.

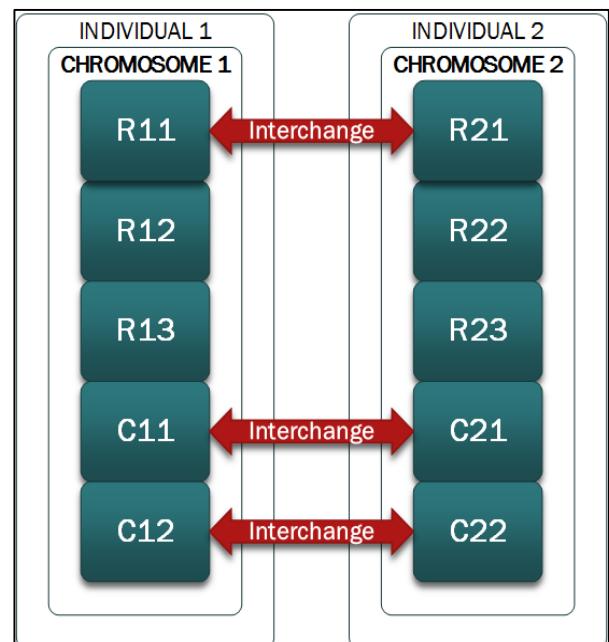


Figura 4.11. Aplicarea operației de încrucișare între doi cromozomi pentru trei elemente

4.4.3. Rezultate și discuții

Atât modelul matematic gray-box, cât și Algoritmul Genetic utilizat în vederea optimizării, au fost integrate sub forma unei aplicații incipiente, scrise în limbajul de programare Java. Interfața grafică a programului de estimare a energiei consumate pentru încălzirea și răcirea unui clădire este prezentată în Figura 4.12.

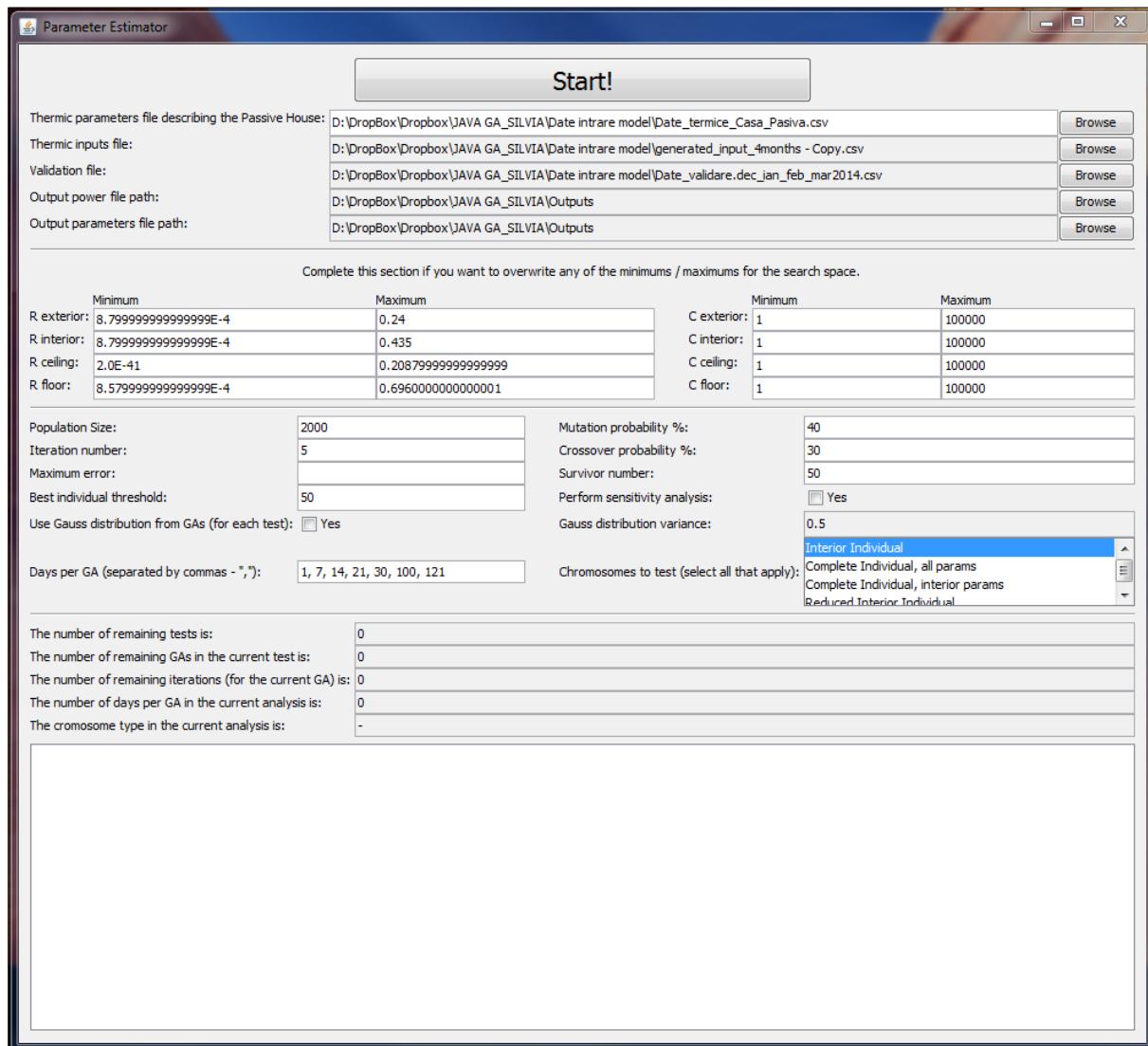


Figura 4.12. Interfața grafică a aplicației de estimare a consumului de energie pentru încălzirea/răcirea unei locuințe

Scopul implementării acestei aplicații a fost acela de a oferi utilizatorilor o interfață grafică, intuitiv și ușor de utilizat. Totuși, făcând obiectul a două teze de doctorat, aceasta este compusă din diferite elemente de testare în vederea alegerii celei mai bune configurații pentru o problemă dată. Astfel, utilizatorul trebuie să introducă în program calea către fișierele caracteristice aflate pe hard drive-ul pe care se află aplicație, conținând:

- datele termice ale elementelor de construcție în câmpul *Thermic parameters file describing the Passive House*;
- datele de intrare în modelul gray-box, care formează vectorul \mathbf{u}^t , descris în secțiunea anterioară, în câmpul *Thermic inputs file*;
- datele de validare, compuse din energia consumată în vederea încălzirii și/sau răcirii clădirii studiate, în câmpul *Validation file*;
- calea de urmat în vederea salvării rezultatelor simulării în câmpurile *Output power file path* (pentru rezultatele privind energia consumată) și *Output parameters file path* (pentru

rezultatele privind valorile parametrilor optimizați). Fișierele sunt salvate în format .csv, denumirea conținând numărul de zile selectat și tipul de cromozom utilizat.

Mai mult, pentru a minimiza spațiul de căutare și a timpului de convergență, se pot introduce valori de minim și maxim pentru rezistențele și capacitatele termice, componente ale rețelei termice, utilizată în descrierea simplificată a clădirii studiate. Caracteristicile definițorii ale Algoritmului Genetic se pot modifica din câmpurile *Population size*, *Iteration number*, *Maximum error*, *Mutation probability*, *Crossover probability*, *Survivor number*, în care utilizatorul poate introduce valori în vederea creșterii eficienței de optimizare sau a timpului de calcul. O analiză detaliată a influenței acestor parametri asupra performanțelor Algoritmului Genetic va fi prezentată în această secțiune. De asemenea, se poate selecta perioada pentru care aplicația păstrează cele mai bune valori în vederea realizării înlățuirii algoritmilor genetici, separate de virgulă, în câmpul *Days per GA*, în timp ce timpul cromozomilor ce alcătuiesc populația poate fi selectat din câmpul *Chromosomes to test*. Pot fi selectate mai multe tipuri de cromozomi, în vederea obținerii unor analize comparative. Dacă se dorește realizarea analizei influenței parametrilor de intrare în performanțele algoritmului, se poate selecta din câmpul *Perform sensitivity analysis*, rezultatele fiind salvate în dosarul în care sunt salvate și valorile parametrilor optimizați.

În aplicația realizată, perioada monitorizată a fost de 121 de zile, între decembrie și martie, perioadă în care sistemul de încălzire a fost activ. În acest interval de timp au fost monitorizate și culese date climatice în vederea realizării vectorului de intrări al modelului matematic gray-box. Pentru aceasta, au fost utilizati senzorii T1 (temperatura exterioară), T_{ground} (temperatura solului), piranometrul (radiația solară), și senzorii wireless, componente ale sistemului de monitorizare, detaliat în secțiunea 2.2.1. Temperatura exterioară și cea a solului au fost utilizate direct de la senzori, în timp ce temperatura interioară a fost calculată ca media temperaturilor din fiecare zonă monitorizată (living, dormitoare, birou, baie sud). Radiația solară prin elementele opace a fost calculată utilizând procedura detaliată în secțiunea 4.4.1. Variațiile temperaturii exterioare și radiației solare pentru perioada monitorizată sunt prezentate în Figura 4.13, în timp ce datele de validare, reprezentând necesarul de energie în vederea menținerii confortului termic în Casa Laborator sunt prezentate în Figura 4.14.

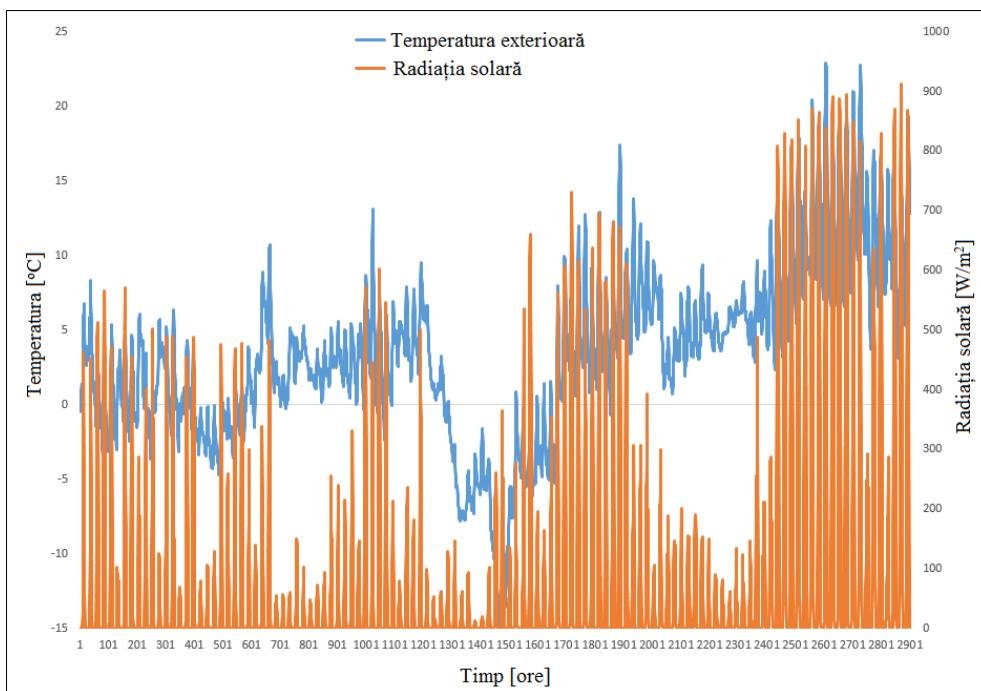


Figura 4.13. Variațiile temperaturii exterioare și a radiației solare utilizate în modelul matematic gray-box

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

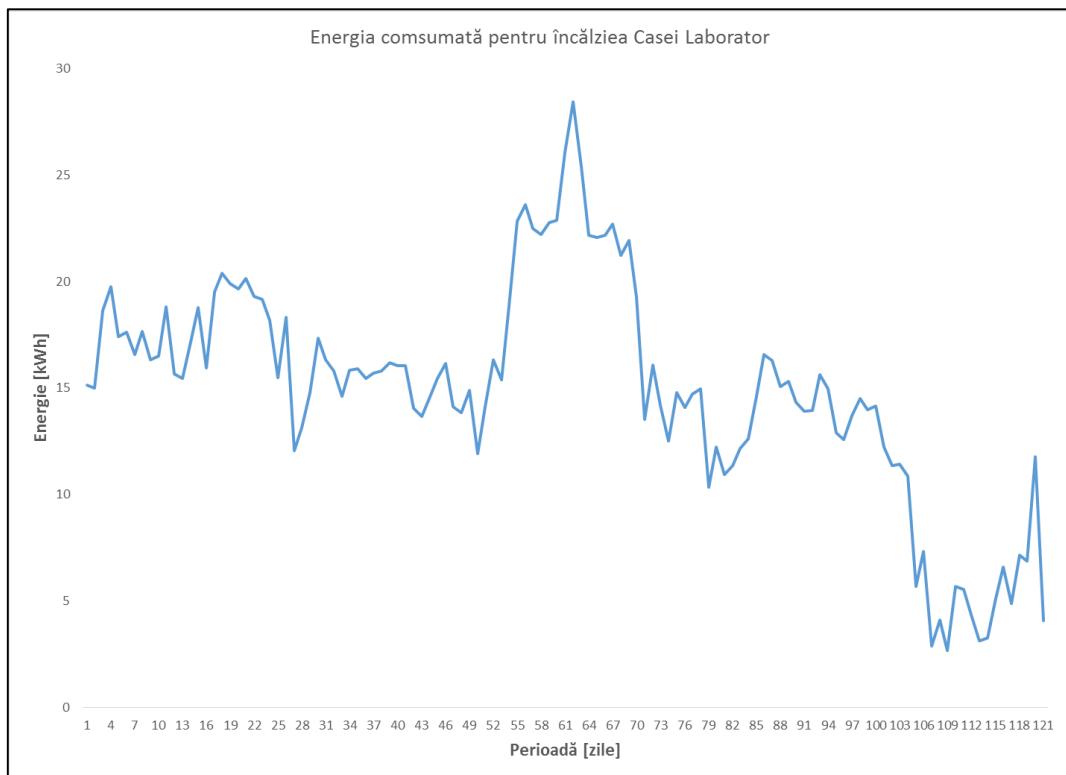


Figura 4.14. Energia consumată pentru încălzirea Casei Laborator în perioada monitorizată

Pentru a argumenta necesitatea implementării unui algoritm de optimizare, inițial a fost utilizat programul MATLAB, în vederea calculării modelul matematic simplificat, ce își are fundamentul în generarea funcției de transfer. După cum se poate observa în Figura 4.15, ipotezele simplificatoare au indus erori foarte mari, chiar dacă alura rezultatului modelului gray-box este asemănătoare cu cea a consumului real de energie.

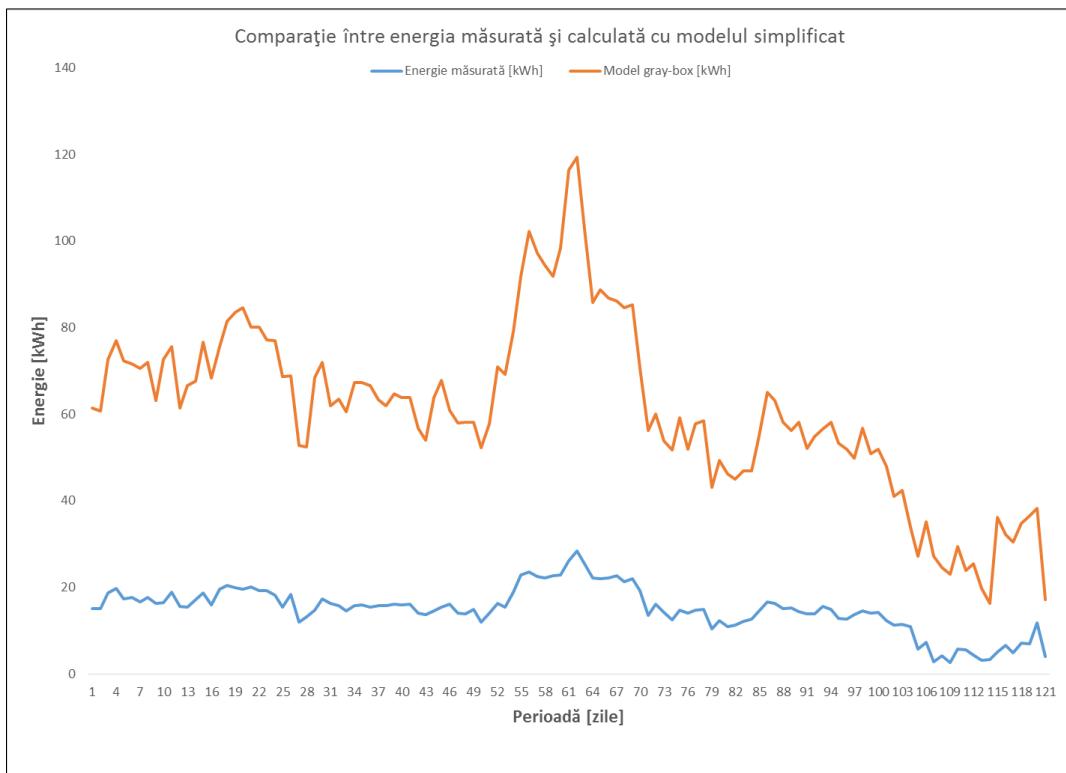


Figura 4.15. Comparație între estimarea energetică a modelului matematic neoptimizat și datele reale, măsurate

4.4.3.1. Estimarea energiei consumate pentru încălzire

În vederea alegeriei celei mai bune configurații au fost realizate o serie de teste, detaliate în continuare. Un prim pas în analiza efectuată a fost observarea influenței numărului de zile implementat în vederea înlățuirii algoritmilor genetici. În acest sens a fost inițializată o populație formată din **2000** de indivizi, reprezentând cromozomi alcătuitori din parametrii zonei interioare (*Interior Individual*), **5** iterații, **40%** probabilitate de mutație, **30%** probabilitate de încrucișare și **50** de indivizi ce supraviețuiesc de la o iterație la cealaltă. A fost variat doar numărul de zile pentru care algoritmul se recalculează (de la 121 la 1). Rezultatele utilizării unui GA pentru întreaga perioadă și unui GA pentru fiecare zi sunt reprezentate în Figurile 4.16–4.22.

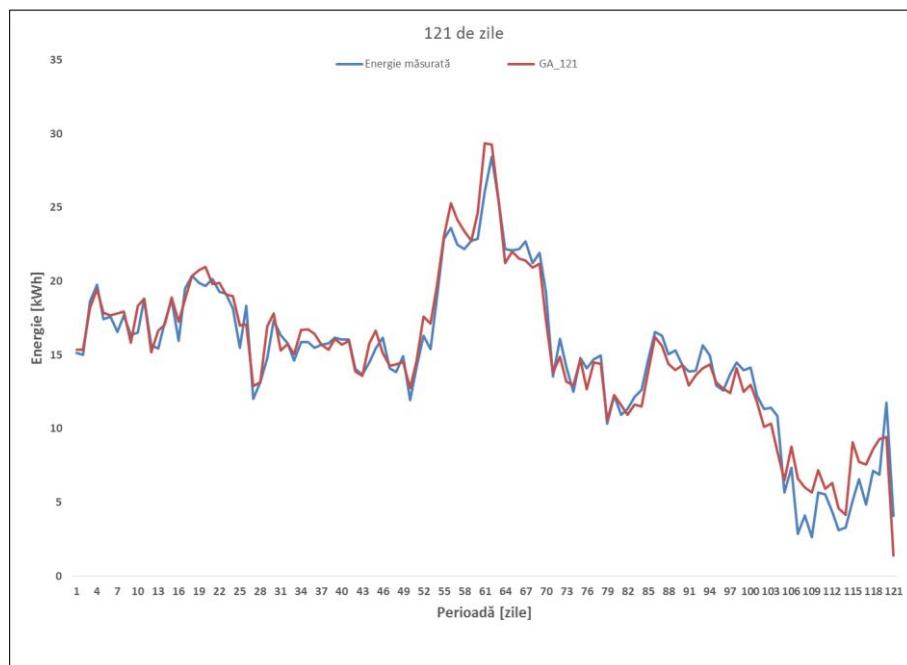


Figura 4.16. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat utilizând un GA pe toată perioada testată (121 zile)

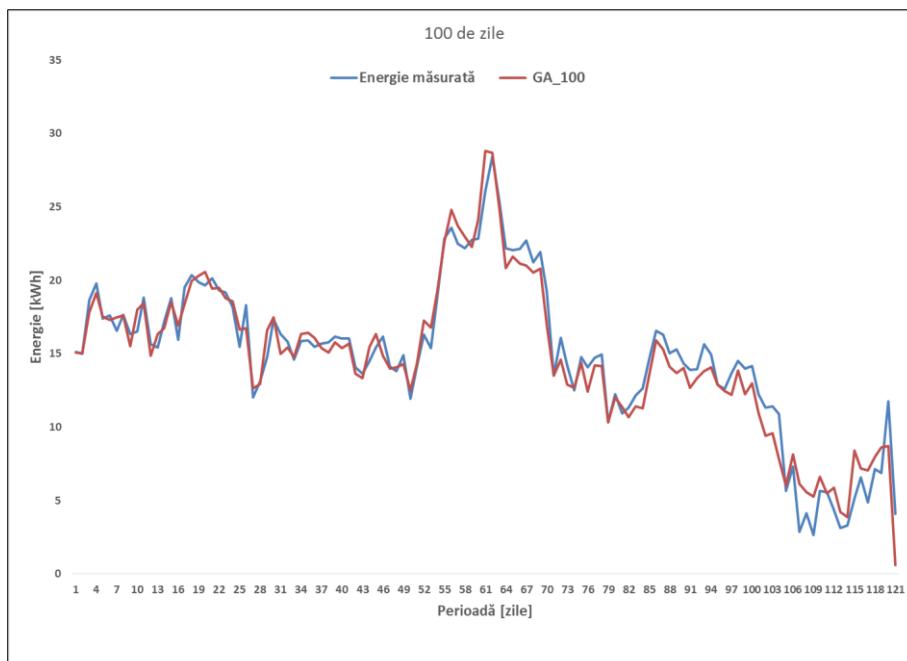


Figura 4.17. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 100 zile

Contribuții la dezvoltarea modelului gray–box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

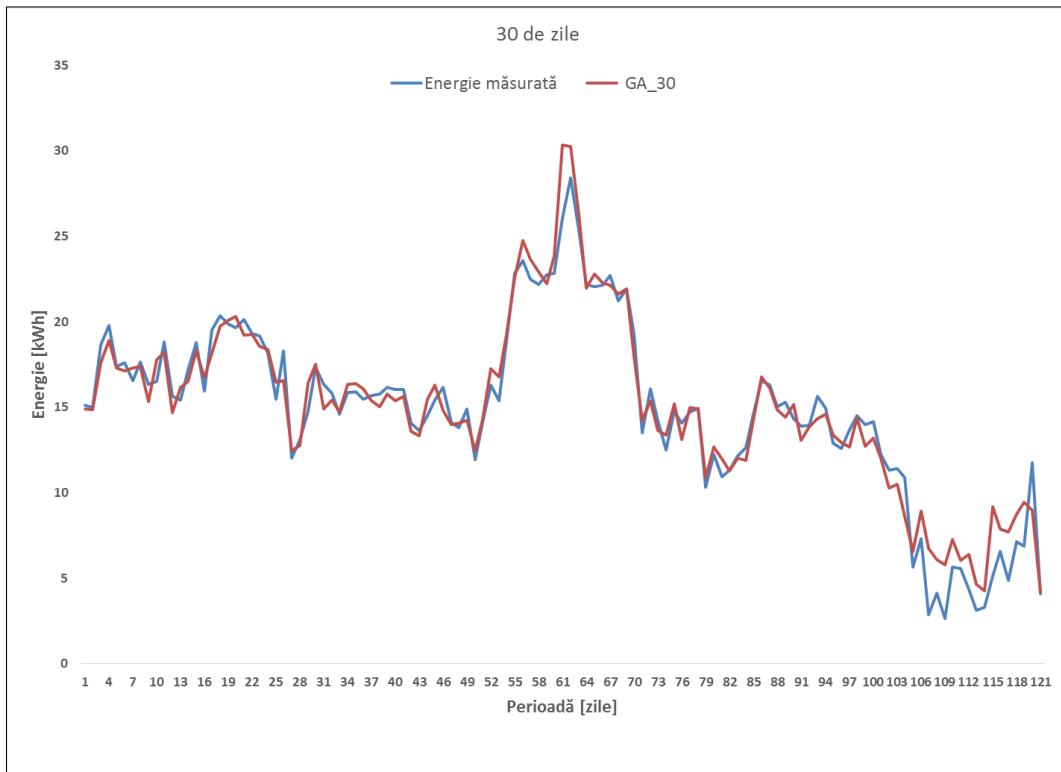


Figura 4.18. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 30 zile

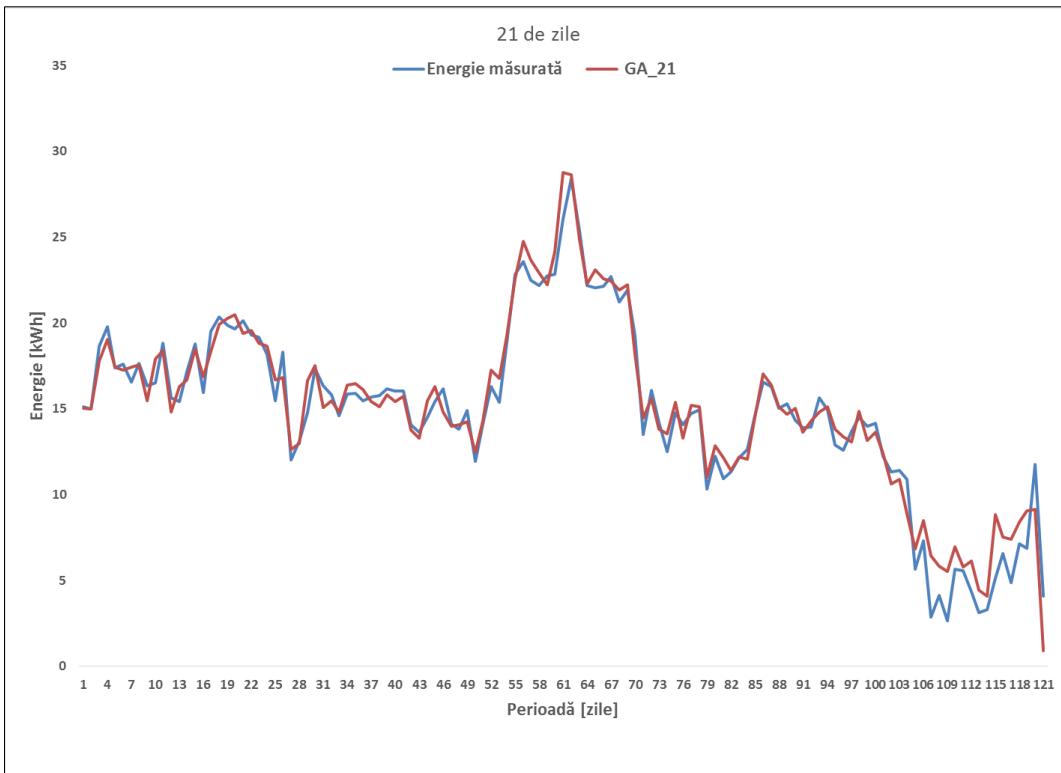


Figura 4.19. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 21 zile

Contribuții la dezvoltarea modelului gray–box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

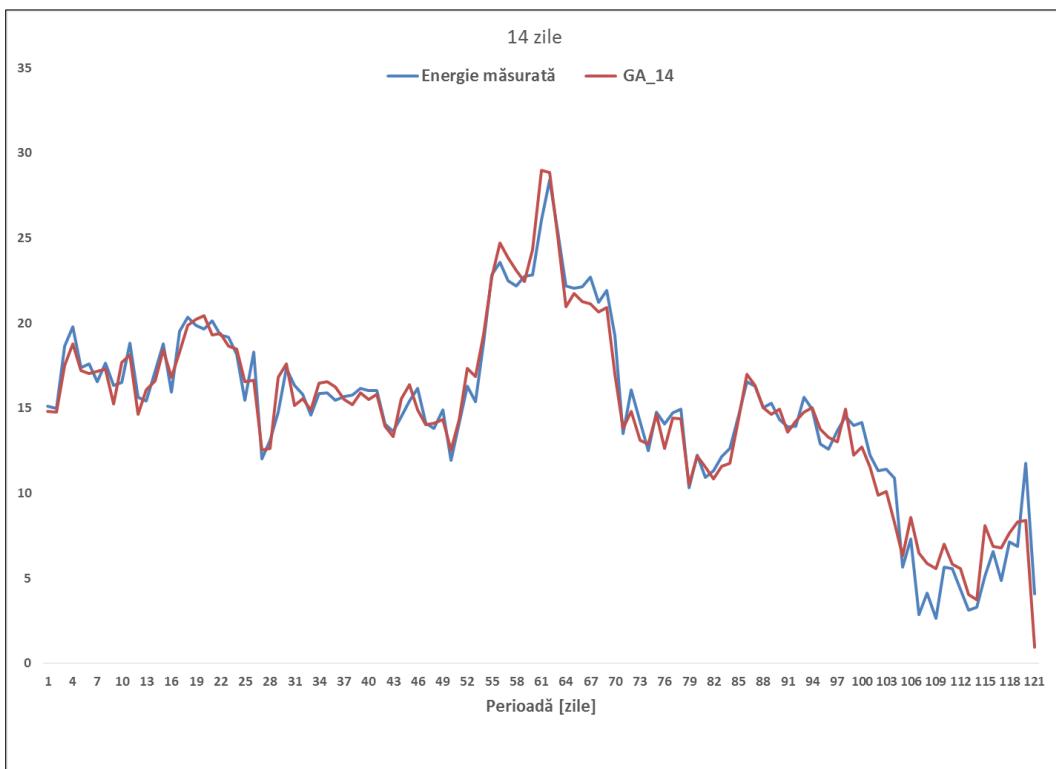


Figura 4.20. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 14 zile

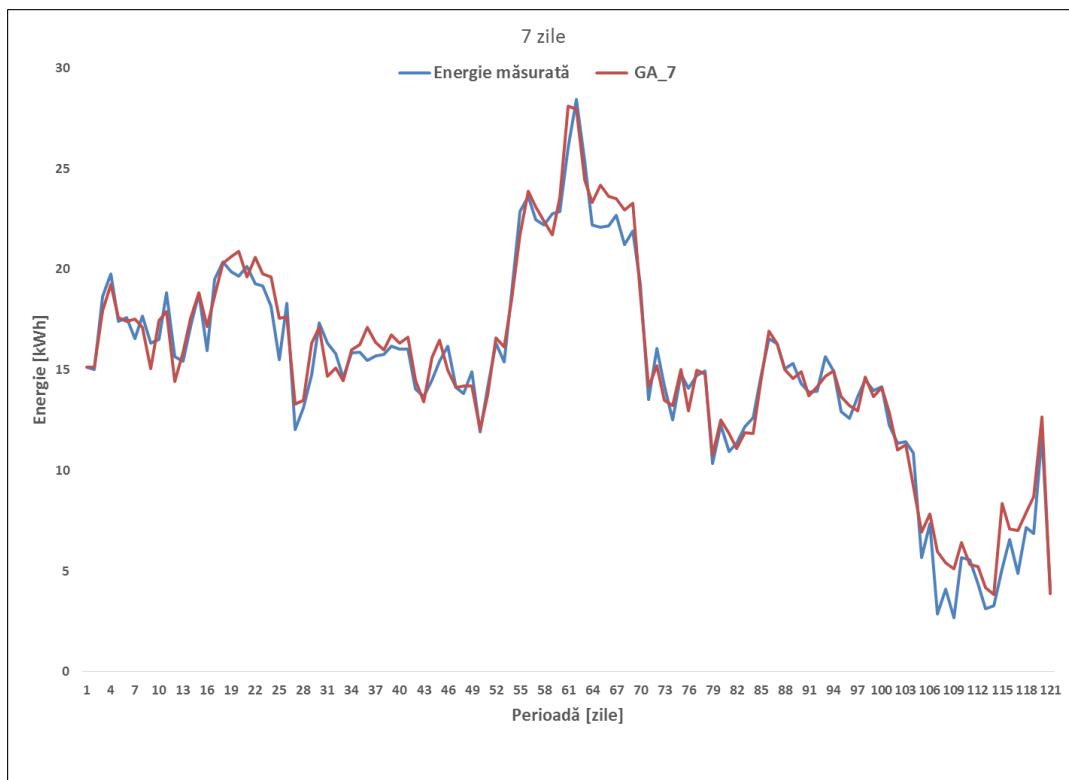


Figura 4.21. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul la fiecare 7 zile

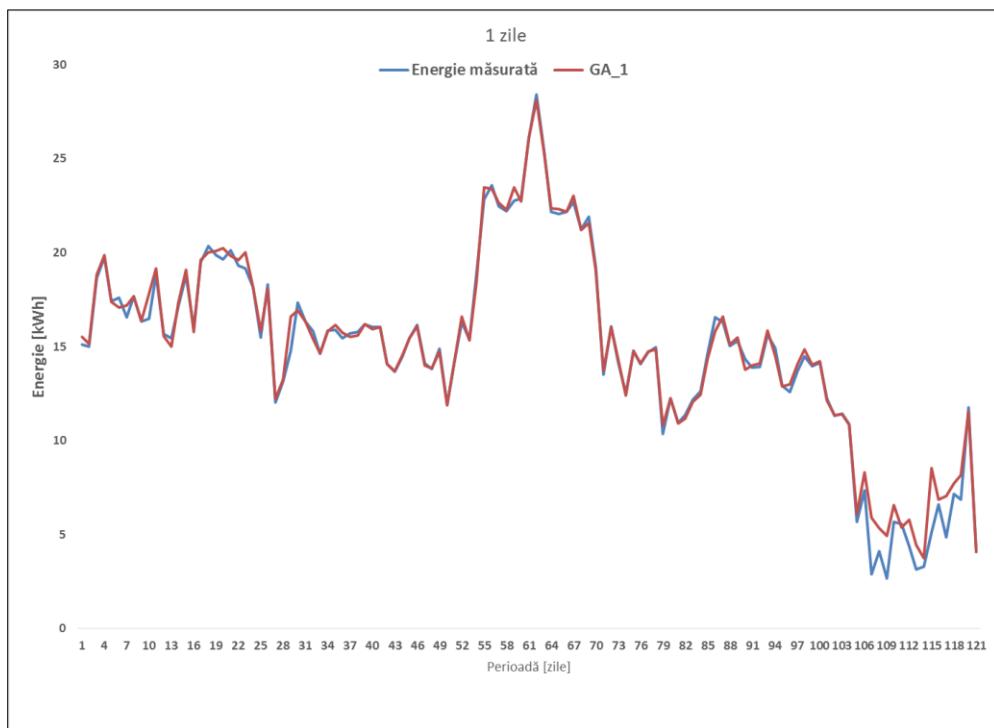


Figura 4.22. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul în fiecare zi

Se poate observa faptul că cea mai bună potrivire pe întreaga durată testată este dată de utilizarea cazului în care algoritmul genetic se calculează odată pe zi. O comparație detaliată între cele 7 simulări este redată în Tabelul 4.2.

Tabel 4.2. Comparatie între erorile generate de utilizarea tipurilor diferite de Algoritmi Genetici

Zile/GA	Eroare absolută medie [kWh]	Eroarea absolută minima [kWh]	Eroare absolută maximă [kWh]	Timp de rulare [ms]
121	0,2172	-2,6810	3,9507	135650
100	-0,1468	-3,4719	3,2962	114168
30	0,1982	-2,7733	4,2908	127518
21	0,2484	-3,1858	3,7064	145589
14	0,0003	-3,3711	3,6073	182200
7	0,3057	-1,6653	3,2251	308848
1	0,2113	-0,7396	3,4322	1829235

Eroarea absolută reprezintă diferența între model și datele măsurate. Chiar dacă media pe cele 121 de zile analizate încurajează utilizarea configurației cu recalcularea valorilor odată la 14 zile (eroarea medie este de 0,0003 kWh), amplitudinea erorii indică faptul că cea mai bună estimare este dată de simularea în care algoritmul își ajustează parametrii în fiecare zi. Chiar dacă în această situație valoarea erorii maxime este de 3,43 kWh/zi, acest lucru se datorează ultimelor zile de simulare, când datorită scăderii bruse a energie consumate, algoritmul nu poate urmări curba de consum cu aceeași acuratețe. Făcând abstracție de ultima perioadă (ultimele două săptămâni din perioadă), eroarea medie este de 0,044 kWh, înregistrând un maxim de 0,86 kWh/zi, indicând faptul că, în cazul în care se dorește cea mai bună estimare a consumului de energie, utilizarea acestui tip de configurație este potrivit. După cum se poate observa în Tabelul 4.2, această eficiență crescută este responsabilă pentru un timp computațional semnificativ, rularea acestei configurații a algoritmului genetic a durat 1829235 ms (30 minute și 30 de secunde).

Următoarea strategie adoptată a fost să observăm cât de mult se poate îmbunătăți optimizarea modelului matematic hibrid. În această privință a fost utilizată cea mai bună configurație de la simularea anterioară, pentru care au fost modificate caracteristicile de funcționare ale Algoritmului Genetic. Astfel, pe lângă populația compusă din **2000** de cromozomi alcătuși din cei cinci parametri ai zonei interioare, a fost selectat un număr de **10** iterații, în timp ce Algoritm Genetic poate efectua operațiile de mutație și încrucișare cu o probabilitate de **70%**, aplicate unui număr maxim de **100** de supraviețuitori de la o generație la cealaltă. Rezultatul simulării este prezentat în Figura 4.23.

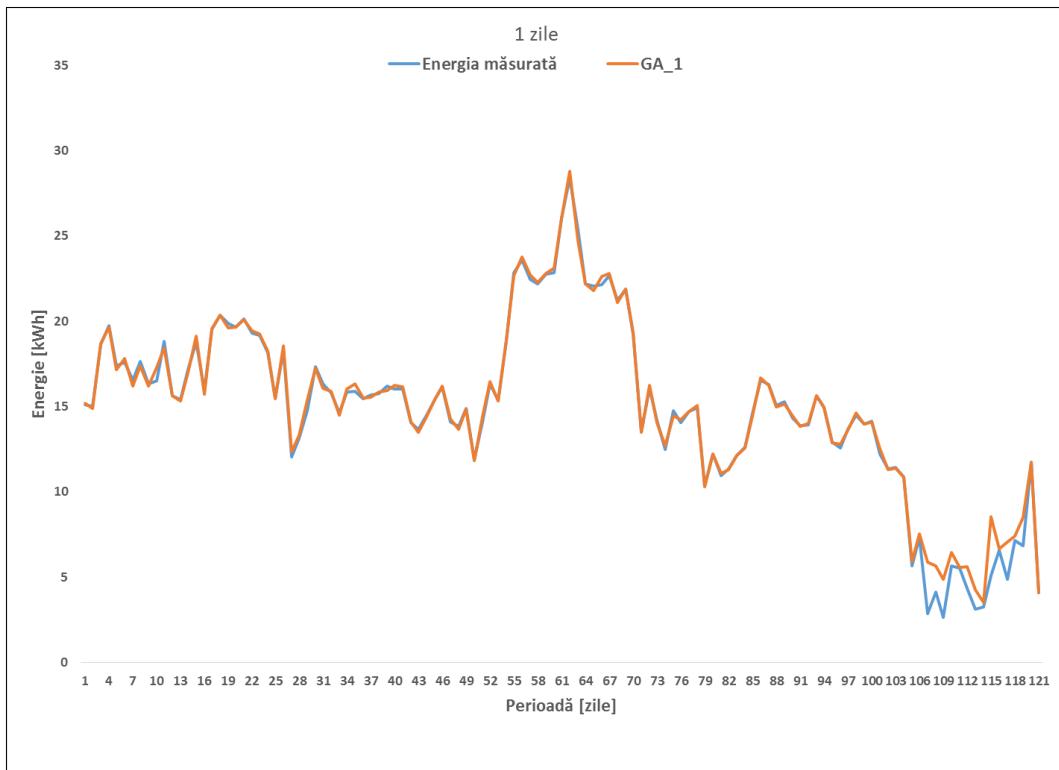


Figura 4.23. Optimizarea modelului matematic utilizând 10 iterații și o probabilitate de mutație și încrucișare în interiorul unui cromozom de 70%, aplicate pe un număr de 100 de supraviețuitori

După cum se poate observa, estimarea consumului de energie este mult mai exactă, eroarea absolută medie fiind de doar 0,17 kWh. Cea mai importantă sursă de eroare este perioada de tranziție (ultimele 17 zile ale perioadei testate), unde, chiar dacă se poate observa o îmbunătățire față de simularea prezentată în Figura 4.22, Algoritm Genetic în stadiul actual nu poate urmări curba reală a consumului de energie. O explicație ar putea fi faptul că modelul matematic nu este suficient de sensibil la o schimbare bruscă a modului de operare a sistemului HVAC, apărând o diferență ce nu poate fi aplăzată de Algoritm Genetic implementat. Luând în considerare strict perioada de încălzire, când sistemul HVAC a funcționat și a existat un consum activ de energie semnificativ, eroarea relativă a fost cuprinsă între 0,0009% și 4,9% kWh, repartita pe întreaga perioadă fiind prezentată în Figura 4.24. Singurul impediment în utilizarea acestei configurații este timpul mare de simulare. Numărul ridicat de indivizi în populația inițială, cât și numărul mare de iterații efectuate pe aceștia, cresc timpul necesar convergenței soluției. Simularea în discuție a durat aproximativ 100 de minute, de trei ori durata primei configurații, când au fost utilizate doar 5 iterații și probabilități mai mici de încrucișare și mutație. În funcție de scopul în care este utilizat, aplicația poate oferi atât rapiditate în calcul cât și eficiență foarte bună în estimare, utilizatorul trebuind să opteze între aceste două variante. De menționat faptul că timpul de simulare este puternic influențat și de puterea computațională a echipamentului de calcul utilizat. Autorul a utilizat un laptop, echipat cu un procesor Intel i5, funcționând la o frecvență de 2,67 GHz și 4 Gb memorie RAM. Utilizarea unui sistem de calcul mai performant poate reduce semnificativ timpul de convergență al Algoritmului Genetic.

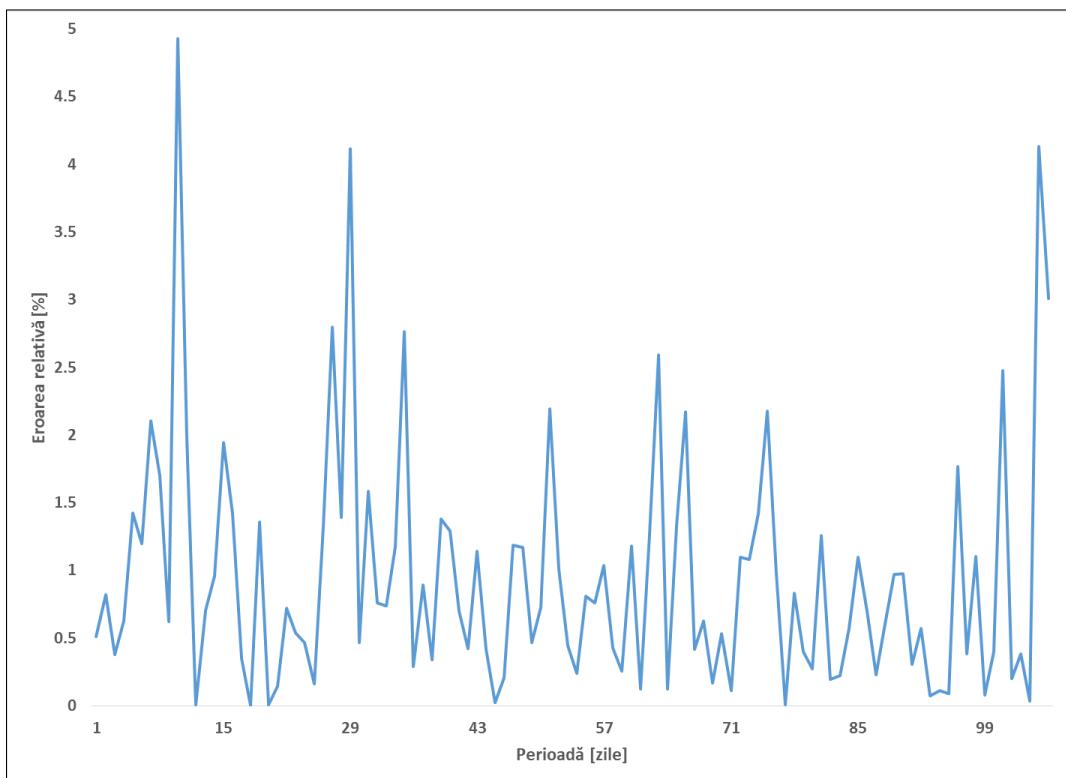


Figura 4.24. Eroarea relativă între modelul matematic optimizat și energia măsurată

Configurațiile utilizate în simulările descrise anterior, pot face subiectul unei clădiri noi, pentru care se știu caracteristicile elementelor de construcție și se dorește doar optimizarea parametrilor ce compun zona interioară. Următoarea analiză dorește să ofere o soluție pentru o clădire pentru care caracteristicile termice nu sunt cunoscute, sau sunt parțial cunoscute. Această ipoteză este des întâlnită în practică, mai ales în cazul auditării energetice a unei clădiri existente. În acest caz se alege unul din cele două tipuri de cromozomi implementați în interiorul Algoritmului Genetic, și anume: *Complete Individual, all Params* și *Complete Individual, interior Params*, diferența între cei doi fiind data de aplicarea operatorilor de mutație și încrucișare. Dacă în cazul primului cromozom aceste operații sunt efectuate pentru toți cei 20 de parametri ce compun rețeaua termică a clădirii, cel de-al doilea tip de cromozom, chiar dacă este compus din aceiași parametri, se efectuează încrucișarea și mutația doar pe cei interiori. Această modalitate de implementare oferă posibilitatea creării diverselor strategii în vederea alegerii optimului din punct de vedere al performanțelor dar și al timpului de calcul. Pentru a avea un punct de comparație, în acest caz a fost utilizată configurația prezentată în studiul anterior: populație formată din **2000** de cromozomi, **5** iterații, **50** de supraviețuitori și probabilități de mutație și încrucișare de **40** și respectiv **30%**. Au fost selectate în schimb doar configurațiile ce recalculează parametrii de interes la fiecare 121, 14 și 7 zile. Rezultatele sunt analizate în cele ce urmează.

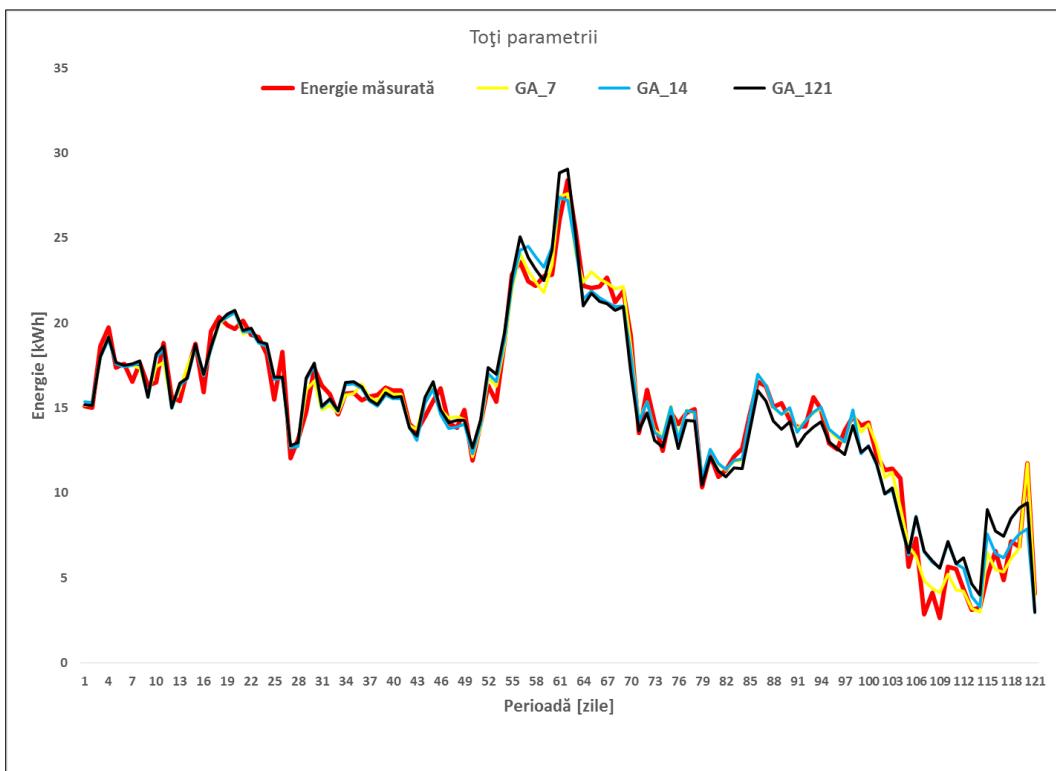


Figura 4.25. Estimarea energiei consumate variind toți cei 20 de parametri și utilizând un număr de 7, 14 și respectiv 121 de zile în recalcularea Algoritmului Genetic.

Implementarea unui cromozom format din cei 20 de parametri ce compun rețeaua termică echivalentă a călăririi și aplicarea operațiilor genetice pe toți parametrii, produce o minimizare a erorii pentru ultima zonă a perioadei analizate.. Alegerea unui număr de 7 zile pentru recalcularea parametrilor (reprezentat cu galben în Figura 4.25) a reprezentat cea mai bună configurație, eroarea absolută medie fiind de doar 0,016 kWh/perioada monitorizată, iar în ultimele 17 zile ale simulării, eroare absolută medie a fost de doar 0,7 KWh, observându-se o îmbunătățire comparativ cu configurația anterioară. Celelalte configurații au prezentat erori absolute medii de 0,06 kWh/perioada monitorizată pentru configurația cu 21 zile/GA, respectiv 0,07 kWh/perioada monitorizată pentru 121 zile/GA. Timpul de calcul pentru cea mai bună configurație a fost de aproximativ 4 minute. Plecând de la aceste performanțe, următorul test a fost de a utiliza același tip de cromozom, pentru care s-au utilizat 10 iterații și probabilități de mutație și încrucișare de 70% fiecare. Numărul de indivizi ce supraviețuiesc de la o iterație la cealaltă a fost ales 100. Utilizând această nouă configurație, timpul de calcul a crescut la aproximativ 7 minute, iar eroarea absolută medie a fost de 0,015 kWh, nejustificând utilizarea unui număr de 10 iterații în aplicația aceasta. Rezultatele utilizării celui de-al treilea tip de cromozom sunt prezentate în Tabelul 4.3.

Tabel 4.3. Comparație între rezultatele simulărilor utilizând cromozomul 3 în cadrul Algoritmului Genetic

Zile/GA	Eroarea absolută medie [kWh]	Eroarea absolută minimă [kWh]	Eroarea absolută maximă [kWh]
7	0,0147	-1.5921	1.8012
14	0,0405	-3.8462	3.7206
121	0,0839	-2.5495	3.8812

După cum se poate observa, cea mai bună estimare este garantată tot de utilizarea unui număr de șapte zile în recalcularea înlanțuirii de algoritmi genetici, aceasta având cea mai mică amplitudine de erori (3,39 kWh).

O altă metodă de utilizare a aplicației în vederea estimării consumului de energie este de a introduce un prag de eroare absolută dorit. Această limită de calcul va înlocui numărul de iterații utilizat în simulările anterioare și se introduce în câmpul *Maximum error*. În acest caz timpul de simulare va crește exponențial, fiind de obicei nevoie de foarte multe iterații pentru a converge către rezultat în limita impusă de utilizator. Pentru această analiză s-au păstrat constante mărimea populației (**2000** de indivizi), probabilitatea de mutație (**40%**), probabilitatea de încrucișare (**30%**), numărul de supraviețuitori (**50**), înlocuindu-se numărul de iterații cu pragul de eroare absolută dorit: maxim **1 kWh**. Analiza a fost efectuată pentru primul tip de cromozom (format din parametrii interiori ai rețelei termice) și a fost ales cazul 1GA/zi. În acest studiu timpul de convergență nu a fost luat în considerare ca factor de decizie în alegerea configurației optime, dorindu-se doar verificarea faptului că algoritmul poate converge către soluția dorită utilizând un prag de eroare impus de utilizator.

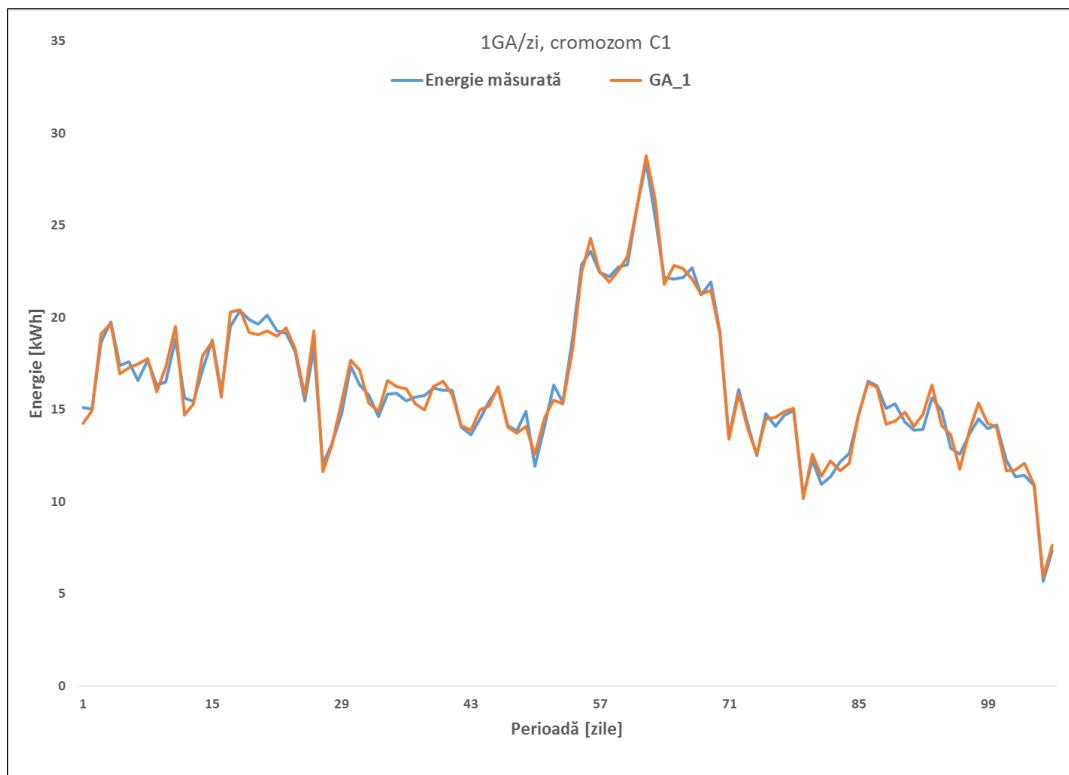


Figura 4.26. Comparație între datele măsurate și rezultatul algoritmului genetic cu o eroare absolută de 1kWh

În Figura 4.26 este prezentat rezultatul simulării primului cromozom pentru care a fost stabilit un prag de eroare de maxim 1 kWh. După cum se poate observa, Algoritmul Genetic a putut să rezolve problema în condițiile impuse doar pentru primele 105 zile ale simulării, pentru care, eroarea absolută zilnică este prezentată în Figura 4.27. Pentru ultimele zile, neputând să găsească cele mai potrivite valori, a intrat într-o buclă continuă de calcul, fiind nevoie de întrerupere forțată a aplicației. Pentru primele 105 zile, pentru a oferi acuratețea impusă a fost nevoie de 105 iterații.

După cum se poate observa în diagrama de mai jos, Algoritmul Genetic a putut să găsească o potrivire a parametrilor de interes astfel încât eroarea absolută calculată în modul să nu depășească valoarea de 1kWh.

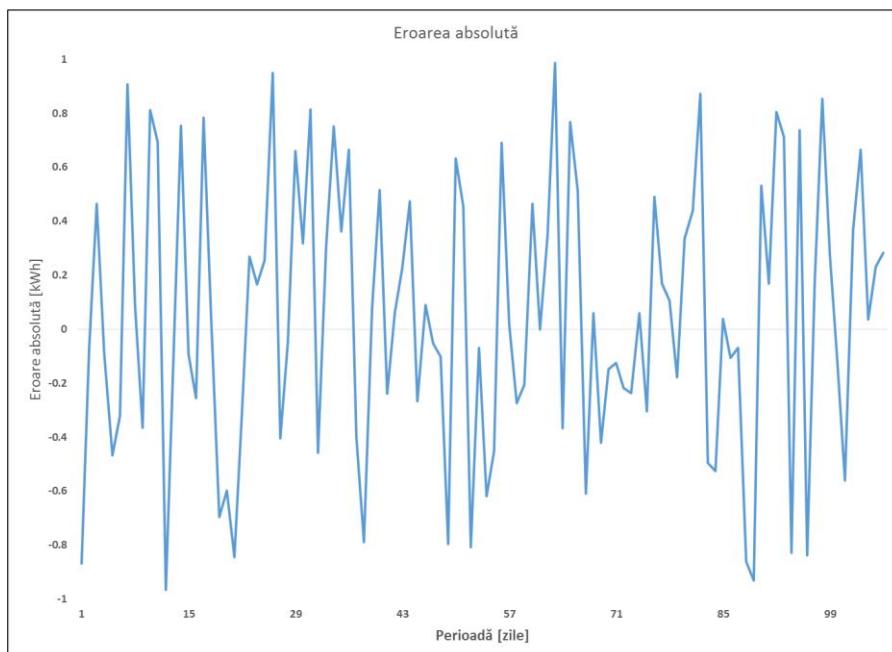


Figura 4.27. Eroarea absolută zilnică pentru 1GA/zi și prag de eroare impus

4.4.3.2. Influenta operatorilor genetici asupra eficienței de optimizare

În decursul acestei secțiuni au fost realizate o serie de teste în vederea observării modului în care utilizarea operatorilor genetici influențează rezultatul aplicației. Alegerea unei populații insuficient de mari minimizează probabilitatea de a găsi o serie de indivizi apti să satisfacă cerințele unei probleme date, în timp ce, selectarea unor rate mici de încrucișare și mutație reduc potențialul algoritmului de a produce noi indivizi. Analiza din acest capitol a avut două obiective: de a observa influența probabilităților de mutație și încrucișare în rapiditatea de convergență a modelului matematic (cuantificată în număr de iterații) și de a stabili o configurație optimă care să țină cont de eroarea absolută medie, caracteristicile Algoritmului Genetic și durata de simulare (cuantificată în minute).

În prima parte a studiului s-a dorit evidențierea influenței operatorilor de mutație și încrucișare asupra numărului de iterații utilizat de Algoritmul Genetic pentru a obține o eroare între rezultatul modelului și datele reale sub un anumit prag. Eroarea maximă măsurată în procente, se poate introduce cu ajutorul interfeței grafice a aplicației în câmpul *Maximum error*: (Figura 4.12), după ce a fost stearsă infirmația existentă în câmpul dedicat numărului de iterații dorit. Pentru această etapă a fost testată o populație formată din **2000** de indivizi, din care un număr de **200** de cromozomi supraviețuiesc fiecarei iterații. Adițional, pragul maxim al erorii a fost setat la 1,4%. Cromozomul utilizat în test a fost C1, format din cei cinci parametri ai zonei interioare. Aplicarea operatorilor nu reprezintă un factor de mărire a timpului de calcul, durata unei iterații rămânând aproximativ constantă indiferent de procentele cu care mutația și încrucișarea elementelor au loc în interiorul cromozomilor. Ținând cont de aceste afirmații cea mai bună configurație a fost aleasă pe baza numărului de iterații necesare Algoritmului Genetic să conveagă către o soluție ce poate îndeplini criteriul impus (eroarea relativă sub 1,4%).

În primă etapă, probabilitatea de încrucișare a fost setată la 0%, în timp ce probabilitatea de mutație a fost variată între 10 și 40%. Această configurație a fost utilizată pentru a observa influența mutației asupra numărului de iterații necesare Algoritmului. Pentru observarea influenței probabilității de încrucișare s-a optat pentru același algoritm, menținând mutația la 0% și variind ponderea operatorului de încrucișare. Pentru fiecare configurație au fost efectuate 20 de simulări, rezultatele fiind interpretate statistic și prezentate în Tabelul 4.4.

Tabel 4.4. Influența operatorilor de încrucișare și mutație asupra numărului de iterații

Număr de iterații	Probabilitate de mutație (0% încrucișare)				Număr de iterații	Probabilitate de încrucișare (0% mutație)			
	10%	20%	30%	40%		10%	20%	30%	40%
1	4	4	6	9	1	9	12	12	9
2	5	4	5	8	2	5	4	4	4
3	4	3	5	0	3	2	3	2	4
4	3	5	2	2	4	2	0	2	1
5	3	3	1	1	5	1	0	0	0
6	0	1	1	0	6	1	1	0	0
7	1	0	0	0	7	0	0	0	2

Se poate observa faptul că în cazul operatorului de mutație există o diferență mare între probabilitatea de 40% și cele anterioare. Numărul de iterații crește, în majoritatea cazurilor, cu probabilitatea de mutație. Acest lucru este datorat faptului că acest operator este utilizat pentru a crește diversitatea în rândul populației inițializate, scăzând riscul algoritmului de a rămâne blocat în minime sau maxime locale. Acest lucru, deși crește numărul de iterații, asigură convergență către valoarea optimă.

Operatorul de încrucișare nu are același impact asupra timpului de convergență, valorile la diferite probabilități fiind aproximativ constante. Acest lucru poate fi explicat prin faptul că operația de crossover ajută algoritmul să conveargă mai rapid. Acesta este utilizat în scopul de a regla mai fin programul către valori de minim local sau global. Chiar dacă acest operator nu influențează semnificativ timpul de convergență, acesta reprezintă un element esențial în găsirea valorii optime ce descrie o problemă dată. Analiza efectuată pe cei doi operatori genetici indică faptul că aceștia sunt complementari, mutația scăzând riscul unei soluții de a rămâne blocată în puncte de minim locale, în timp ce încrucișarea ajută algoritmul să conveargă către soluția dorită.

În a doua parte a studiului efectuat în cadrul acestui paragraf, au fost implementate mai multe configurații și simulate cu ajutorul aplicației GA. A fost selectat același tip de cromozom (C1 – format din parametrii interiori ai rețelei termice echivalente). Numărul de zile pentru care algoritmul genetic recalculează elementele de interes a fost setat la 7, considerând două populații compuse din 200 și respectiv 2000 de indivizi. Toți ceilalți parametri au fost variați. Scopul este de a găsi cea mai bună configurație care să satisfacă atât eficiența de calcul (un prag impus de al erorii absolute de 0,1 kWh) cât și cea computațională. În acest sens au fost efectuate mai multe seturi de simulări, fiind păstrate doar cele reprezentative. Configurațiile alese spre interpretare sunt detaliate în Tabelul 4.5.

Tabel 4.5. Valorile parametrilor AG pentru o populație de 2000 de cromozomi

Nr. Simulare	Nr. de integrații	Probabilitate mutație	Probabilitate încrucișare	Nr. Supraviețuitori	Eroare absolută [kWh]	Convergență [min]
1	2	0.4	0.3	50	0.1227	2.6887
2	10	0.4	0.3	50	0.1487	7.9482
3	20	0.4	0.3	50	0.1397	40.9070
13	5	0.1	0.1	50	0.1379	3.4458
15	5	0.7	0.7	70	0.1993	3.3097
16	5	0.9	0.9	100	0.1193	3.3161
21	10	0.9	0.9	100	0.1122	10.4726
22	5	0.9	0.9	100	0.2156	9.6960
22	10	0.9	0.9	100	0.0335	13.9042
23	10	0.1	0.1	10	0.1757	14.7234

Tabel 4.6. Valorile parametrilor AG pentru o populație de 200 de cromozomi

Nr. Simulare	Nr. de iterații	Probabilitate mutație	Probabilitate încrucișare	Nr. Supraviețuitori	Eroare absolută [kWh]	Convergență [min]
4	5	0.4	0.3	50	1.42702	0.1874
5	10	0.4	0.3	50	0.6651	0.3936
6	20	0.4	0.3	50	0.4719	0.9679
7	100	0.4	0.3	50	0.1640	10.0523
9	100	0.1	0.3	50	0.1591	7.9830
10	100	0.1	0.1	50	0.0929	9.4295
11	100	0.5	0.5	50	0.0579	14.0829
12	100	0.9	0.9	50	0.1503	16.6410
17	5	0.9	0.9	100	2.6847	2.2982
18	5	0.1	0.1	10	2.2825	2.6695
19	10	0.9	0.9	100	1.3527	4.1075
20	10	0.1	0.1	10	0.3851	4.9641

În tabelele prezentate anterior sunt centralizate simulările considerate reprezentative pentru cele două mărimi ale populației inițiale considerate. Adițional, timpul de convergență, reprezentând în studiul acesta durata efectivă a simulării, a fost înregistrat și centralizat pentru a putea reprezenta un criteriu în alegerea soluției optime. Eroarea absolută a fost calculată ca diferența între media rezultatului simulării și media valorilor măsurate. În cadrul tabelelor au fost evidențiate valorile minime pentru fiecare caracteristică de interes: cu galben este subliniată simularea care a indicat cea mai ridicată performanță, în timp ce culoarea albastră indică cel mai scurt timp de convergență.

După cum se poate observa, cea mai bună estimare a energiei consumate pentru încălzirea locuinței este caracterizată de **10** iterații și probabilități de mutație și încrucișare de **90%**, aplicate pe un număr de **100** de supraviețuitori în cazul în care se consideră o populație inițială formată din **2000** de cromozomi. Dacă se optează pentru un număr de 10 ori mai mic de indivizi în populația inițială (**200** de cromozomi), cea mai bună optimizare se datorează unui număr de **100** de iterații și **50%** probabilități de mutație și încrucișare, aplicate în vederea obținerii unui număr de **50** de supraviețuitori. În Figura 4.28 și Figura 4.28 sunt prezentate comparații între răspunsul modelului matematic combinat cu cele mai bune configurații ale algoritmului genetic și valorile reale ale consumului de energie pentru încălzire.

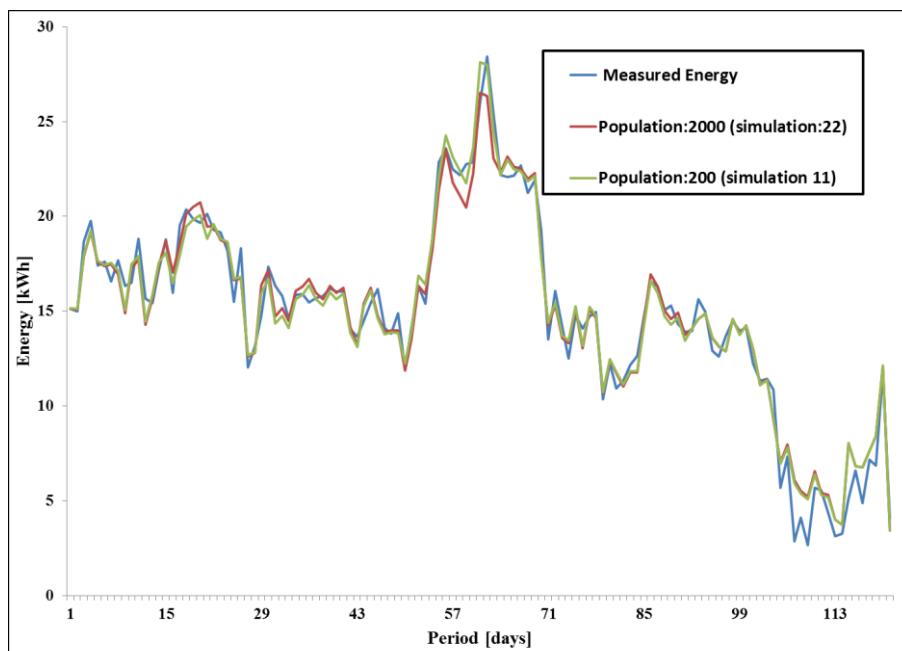


Figura 4.28. Comparație între datele măsurate și cea mai mică eroare absolută în fiecare caz considerat

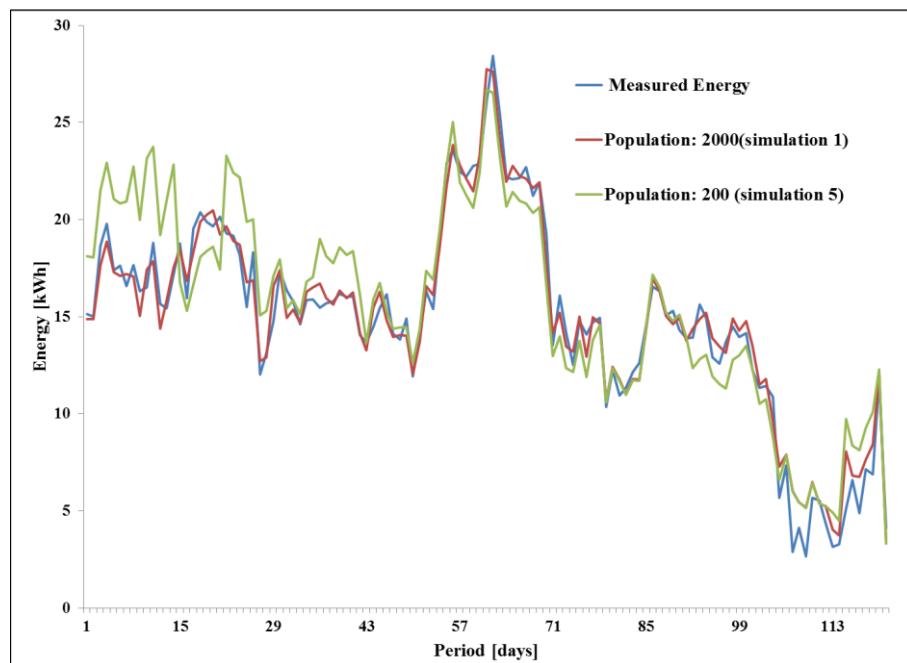


Figura 4.29. Comparație între datele măsurate și cel mai mic timp de convergență în fiecare caz considerat

După cum se poate observa în Figura 4.29, în cazul în care se dorește o convergență rapidă a Algoritmului Genetic este de preferat implementarea unei populații considerabile mai mari, 200 de indivizi nefiind suficienți pentru a estima consumul cu precizie în toate zilele analizate. Chiar dacă eroarea absolută medie pe întreaga durată este relativ mică (1,42 kWh), o analiză detaliată indică faptul că eroarea calculată pe zi este suficient de mare încât să nu recomande configurația spre utilizare.

Pentru a putea alege cea mai bună configurație pentru fiecare populație în parte, s-a realizat o analiză ce implică toți parametrii de interes, rezultatele fiind prezentate în Figura 4.30 și Figura 4.31.

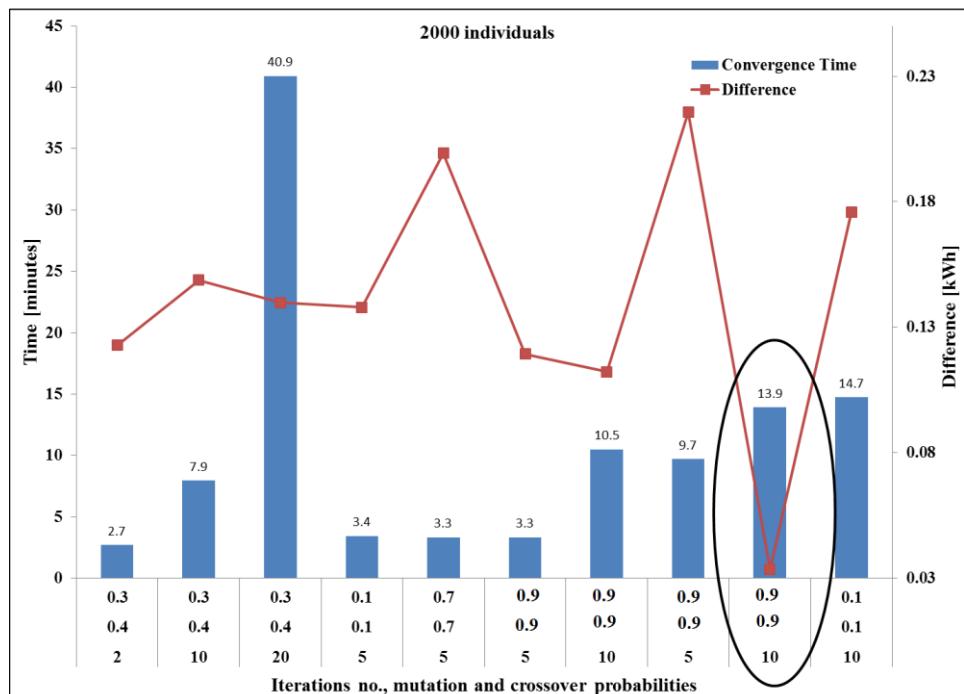


Figura 4.30. Comparație între timpul de convergență, eroarea absolută și valorile parametrilor pentru o populație de 2000 de indivizi

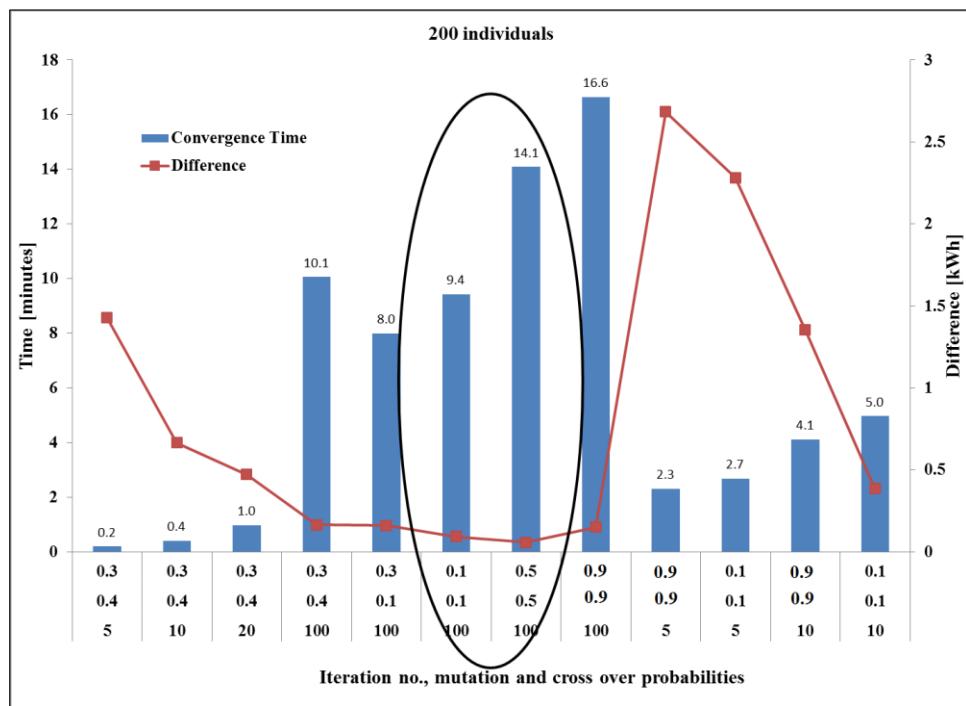


Figura 4.31. Comparație între timpul de convergență, eroarea absolută și valorile parametrilor pentru o populație de 200 de indivizi

După cum se poate observa din analiza prezentată, utilizând un număr mai mic de indivizi în populația inițială și crescând numărul de iterații, poate oferi un rezultat asemănător cu simulările efectuate pe o populație de 2000 de indivizi. În scenariul folosirii a doar 200 de cromozomi, pragul impus erorii absolute de 0,1 kWh este îndeplinit utilizând două configurații diferite, diferență constând în probabilitatea de încrucișare și mutație (10% în primul caz și 50% în cel de-al doilea), specificând faptul că în primul caz timpul de simulare este mai mic (9,4 minute comparativ cu 14,1 minute). Pentru scenariul în care sunt utilizați 2000 de cromozomi, singura configurație care a atins eficiența de estimare stabilită a fost compusă din probabilitatea de mutație și încrucișare de 50%, 10 ierarhii și un număr de 50 de supraviețuitori, corespunzând unui timp de simulare de aproximativ 14 minute.

4.5. CONCLUZII

În cadrul acestui capitol a fost detaliată o metodologie de formare a unui model matematic hibrid, utilizat în estimarea pe termen mediu și lung a energiei consumate pentru încălzirea și răcirea unei clădiri. Modelul gray-box, fundamentat pe obținerea unei funcții de transfer echivalente dintr-o reprezentare state-space a ecuațiilor termice ce descriu comportamentul dinamic al clădirii, a fost optimizat utilizând elemente de calcul evoluționist, bazat teoria darwiniană. Plecând de la un model matematic simplu ce utilizează puține date de intrare (comparat cu metodele de estimare a consumului de energie bazate pe programe de calcul) și o descriere succintă a elementelor de anvelopă, scopul a fost de a găsi o metodă eficientă de optimizare pentru a putea estima cu o precizie ridicată necesarul de energie pentru încălzirea și răcirea clădirii. Pentru aceasta, autorul a optat pentru utilizarea un Algoritm Genetic, metodă ce s-a dovedit a fi o unealtă eficientă în găsirea parametrilor ce minimizează eroarea între rezultatul modelului gray-box și datele măsurate. Avantajul utilizării unei astfel de abordări este acela că modelul matematic utilizează puține date de intrare, facilitând interconectarea cu un sistem integrat de inteligență artificială utilizat într-o clădire în vederea autoreglării sistemului HVAC, responsabil cu un procent semnificativ în consumul total de energie dintr-o clădire. Mai mult, pentru optimizare, modelul dezvoltat utilizează date reale, măsurate pe amplasamentul clădirii, evitând astfel erorile induse de utilizarea datelor sintetice, care, în cele mai multe cazuri, descriu un an reprezentativ dintr-o anumită zonă climatică.

Clădirea este reprezentată prin intermediul unei rețele termice echivalente. Aceasta simbolizează, prin intermediul unei configurații simple compuse din 5 parametri: 3R2C (3 rezistențe și 2 capacitați termice) obținuți pe baza caracteristicilor termice și fizice ale anvelopei. Metodologia de obținere a funcției de transfer implică utilizarea acestor parametri, lucru ce a facilitat implementarea unei metode de optimizare bazată pe căutarea celor mai bune valori într-un spațiu definit anterior. Plecând de la această configurație simplificată a clădirii, autorul a structurat cercetarea pe două planuri aplicabile în practică. În primul rând s-a optat pentru modelarea matematică în regim dinamic a unei clădiri noi, în curs de proiectare, pentru care, teoretic, caracteristicile termo-fizice ale anvelopei exterioare sunt cunoscute. În acest caz doar cei 5 parametri ai zonei interioare sunt utilizați în vederea optimizării, ceilalți fiind ținuți fixi. A doua abordare constă în analiza unei clădiri existente, pentru care datele caracteristice ale anvelopei nu sunt cunoscute, sau sunt cunoscute parțial. În această situație sunt utilizați toți cei 20 de parametri în vederea optimizării.

Modelul matematic utilizat reprezintă o abordare hibridă între un model pur fizic (abordare white-box) și un model pur empiric (black-box). Astfel, modelul gray-box constă în obținerea unei funcții de transfer echivalente plecând de la reprezentarea dinamicii clădirii utilizând o abordare state-space. Funcția de transfer (ecuația 4.23) realizează conexiunea între rezultatul modelului la un moment de timp, o serie de date prezente și anterioare a intrărilor și o serie a rezultatelor anterioare (la momente anterioare de timp). Această abordare oferă stabilitate sistemului, rezultatele fiind mai bune comparativ cu metodele clasice utilizate în modelarea dinamică a fluxurilor termice conductive transmise prin elementele de anvelopă a clădirii. Datele de intrare utilizate în vederea simulării dinamice a necesarului de energie pentru încălzirea unei clădiri sunt compuse din date culese de sistemul de monitorizare al Casei Laborator (temperatura exterioară, temperatura interioară și radiația solară), cât și din date calculate privind aporturile interne provenite de la ocupanți și electrocasnice. Utilizarea unui număr redus de parametri constituvenți ai anvelopei termice a clădirii, cât și a datelor de intrare, au indus erori mari în estimarea consumului de energie pentru încălzirea și răcirea clădirii, apărând necesitatea optimizării modelului matematic.

Algoritmul genetic utilizat spre optimizare este bazat pe teoria evoluționistă a lui Darwin, bazându-se pe principiul supraviețuirii celui mai adaptat individ. Astfel, este nevoie de inițializarea unei populații de o anumită mărime, compusă din indivizi (cromozomi), care periodic este repopulată în vederea găsirii celei mai bune soluții pentru o problemă dată. Cromozomii ce constituie populația sunt compuși din elementele de interes ce formează funcția de transfer. Astfel, primul cromozom implementat conține cei cinci parametri ce compun zona interioară a clădirii, în timp ce ceilalți doi sunt formați din totalitatea mărimilor ce descriu rețeaua termică a clădirii (20 de parametri). Operatorii specifici calculului evoluționist (mutație și încrucișare) sunt aplicați pe acești indivizi în vederea obținerii unei populații noi, mai adecvată problemei în discuție. Fiecare operator genetic este aplicat unui cromozom cu o anumită probabilitate, specificată de utilizator. Algoritmului Genetic a fost gândit ca o structură înlanțuită, perioada de calcul a parametrilor putând fi variată de la o zi până la finalul perioadei analizate (121 de zile în cazul de față).

Atât modelul matematic cât și Algoritmul Genetic au fost implementate într-un modul integrat de calcul al necesarului de energie pentru încălzirea și răcirea unei clădiri. Aplicația realizată cu ajutorul limbajului de programare JAVA și propune o interfață intuitiv de folosit chiar și de utilizatori neinstruiți. După ce s-au încărcat fișierele (în format csv) conținând date termo-fizice ale clădirii (exakte sau estimare), date de intrare și o serie de date despre consumul clădirii pentru o perioadă dorită, se pot selecta numărul de zile pentru care Algoritmul Genetic realizează optimizarea (Days per GA), tipul cromozomului utilizat (compus din elementele interioare sau din toți cei 20 de parametri ai rețelei termice), probabilitățile dorite de încrucișare și mutație, precum și numărul de iterații și numărul de supraviețuitori dorit să treacă de la o generație la cealaltă. Prin intermediul aplicației au fost realizate o serie de simulări în vederea

obținerii celei mai bune configurații de utilizare. În studii au fost analizate atât performanțele de estimare (eroarea absolută între model și datele reale de consum) cât și timpul de convergență utilizând atât un număr impus de iterații cât și un prag fix de eroare. În funcție de tipul de cromozom utilizat, cele mai bune rezultate au fost realizate utilizând o perioadă de calcul de o zi (pentru cromozomul zonei interioare) și 7 zile (pentru ceilalți doi cromozomi). Utilizarea Algoritmului Genetic realizează o estimare foarte precisă a curbei de consum pe întreaga perioadă analizată, erorile absolute medii ne depășind valoarea de 0,3 kWh indiferent de configurația propusă. Inițializând un cromozom compus din parametrii interiori ai clădirii, s-a observat faptul că perioada de tranziție, reprezentată de ultimele 17 zile de simulare nu este modelată corespunzător, inducând creșterea erorii absolute medii, eroare minimizată prin alegerea unei configurații ce optimizează modelul matematic prin intermediul tuturor parametrilor de interes. Cele mai bune rezultate au fost obținute implementând un prag de eroare (1 kWh în studiul propus), deficitul constând în faptul că Algoritmul Genetic nu a putut găsi parametrii potriviti pentru întreaga perioadă, acesta oprindu-se după 105 zile. În această perioadă eroarea absolută zilnică s-a încadrat în intervalul dorit ($\pm 1 \text{ kWh}$).

În teza de doctorat au fost prezentate datele estimate pentru necesarul de energie în vederea încălzirii Casei Laborator. Perioada de răcire nu a putut fi analizată, clădirea nefiind prevăzută cu un sistem activ utilizat în perioada de vară. S-a încercat o abordare bazată pe consumul de energie al ventilatoarelor ce asigură circulația aerului în clădire, rezultatele nefiind concluante, ținând cont și de faptul că există perioade de timp semnificative în care temperatura de confort pe timpul verii nu este îndeplinită cu sistemul HVAC existent. Pentru a asigura o mai bună estimare pe întreaga durată a unui an, se dorește implementarea unui model matematic modular, de sine adaptabil, ce realizează o corelație între datele de consum și datele de intrare și o aplică pe situații asemănătoare. În acest sens s-a realizat o analiză de sensibilitate ce stabilește gradul de influență a parametrilor în rezultatul final. Rezultatele provizorii sunt prezentate în Anexa A4.

Aplicația dezvoltată în cadrul tezei de doctorat își propune să răspundă problemelor ridicate în rândul auditorilor energetici și nu numai, atât din considerente de precizie cât și economice (este nevoie doar de 4 senzori, preț estimat sub 200 Euro) Aceasta reprezintă o abordare nouă în estimarea consumului de energie pentru încălzirea și răcirea unei clădiri, ce ține cont de caracteristicile termice ale anvelopei și de foarte puține date meteorologice. Structura aplicației permite atât analiza clădirilor noi (sau pentru care se cunosc bine caracteristicile termice ale anvelopei), cât și clădiri existente, la care, din varii motive se pot doar estima acești parametri. Momentan, în cadrul aplicației nu sunt implementate metodologiile de calcul al radiației solare transmise prin elementele opace ale clădirii și a aporturilor interne, acestea fiind calculate în Matlab, apriori introducerii lor în algoritmul de calcul, dar în vederea livrării unui produs finit, acestea se vor calcula selectând din baza de date a programului tipul de element dorit și introducerea unui număr estimativ de ocupanți și echipamente electrice.

Modelul matematic prezentat a câștigat premiul I la concursul de idei organizat pe 2 iulie 2015 de GDF-SUEZ: Innovation Week (15-19 iunie 2015).

Diseminarea rezultatelor din acest capitol a fost făcută prin intermediul unui articol și a trei conferințe naționale și internaționale:

1. *Buletinul UPB, 2015: B. Cărăușiu, S. Stegaru, C. Ionescu, E. Slușanschi, A. Badea, N. Tăpuș, An optimization method based on evolutionary computation used for estimating the energy consumption for heating in a building*
2. *RoEduNet - XIV NER 2015, Craiova România, 24-26 septembrie 2015, S. Stegaru, B. Cărăușiu, E. Slușanschi, C. Ionescu, N. Tăpuș, A. Badea, The influence of genetic operators in a Genetic Algorithm used for estimating the energy consumption in a Passive House*

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

3. *EENVIRO 2015, București, România, 18-20 noiembrie 2015, B. Cărăușiu, C. Ionescu, H. Necula, A. Badea, The importance of finding the optimal parameters of a Genetic Algorithm used in estimating the enregy consumption in buildings*

4. *AOŞR, Sesiunea Științifică de Toamnă 2015, Iași, România, 24-26 septembrie 2015, A. Badea, B. Cărăușiu, V. Tanasiev, Metode de modelare dinamică a necesarului de energie aplicate pentru o clădire cu consum foarte redus de energie*

CAPITOLUL 5. CONCLUZII

În acest capitol este realizată o sinteză a principalelor rezultate obținute în cadrul tezei de doctorat, contribuțile personale și perspectivele de cercetare ce se desprind din studiul efectuat până în prezent. Teza de doctorat este împărțită în 4 capitole, fiecare abordând un subiect de interes în domeniul energeticii clădirilor. Astfel, primul capitol servește drept suport teoretic în metodele de creștere a eficienței termice în sectorul clădirilor, al doilea capitol este destinat unui studiu experimental aplicat Casei Pasive UPB, al treilea capitol include modelări matematice utilizând abordări white-box asupra clădirii studiate și a sistemului de producere a energiei electrice pe amplasament, în timp ce al patrulea capitol descrie o abordare originală bazată pe un model matematic gray-box în vederea estimării consumului de energie în clădirea studiată.

5.1. CONCLUZII GENERALE

În **CAPITOLUL 1** este prezentată motivația tezei de doctorat, expusă sub forma unei analize a consumului energetic în sectorul clădirilor. Din statisticile prezentate, cel mai important aspect este acela că sectorul clădirilor este responsabil cu peste 40% din consumul de energie primară atât pe teritoriul Uniunii Europene cât și pe plan național. Mai mult, consumul energetic anual pentru o clădire standard de pe teritoriul României este cuprins între 150 și 400 kWh/m², valori puternic influențate de tipul clădirii și de sistemul HVAC utilizat. Un procent de aproximativ 50% din acest consum este datorat încălzirii și răcirei spațiului de locuit, observându-se un potențial mărit de reducere a consumului de energie prin eficientizarea sistemului HVAC sau implementarea unor soluții de micșorare a sarcinii maxime a clădirii. Plecând de la aceste considerente, sectorului clădirilor îi este atribuit cel mai mare potențial de eficientizare comparat cu celelalte sectoare de energetice, cuprins între 30% pentru sectorul rezidențial și 25% pentru sectorul terțiar. În **secțiunea 1.2** este prezentat un cadrul legislativ impus spre adoptare de către Uniunea Europeană, legislație ce trebuie implementată în vederea atingerii acestor procente de eficientizare energetică în sectorul clădirilor. Totodată este prezentată succint și legislația națională privind sectorul clădirilor, prin intermediul căreia se dorește alinierea la cerințele Uniunii. Prin intermediul studiilor efectuate, s-a constatat faptul că, pentru România, domeniul de cost optim va fi cuprins între 62 și 230 kWh/m²/an, iar valoarea maximă admisibilă în vederea certificării clădirilor ca fiind nZEB va fi cuprinsă între 57 și 111 kWh/m²/an, valori influențate de tipul și modul de operare al clădirii. Mai mult, **secțiunea 1.3** oferă un studiu asupra posibilităților de creștere a eficienței energetice în sectorul clădirilor, autorul prezentând o analiză asupra definițiilor clădirilor cu un consum energetic aproape zero (nZEB) și clădirilor inteligente, prin implementarea cărora se poate obține un dublu beneficiu: scăderea consumului de energie corelat cu menținerea confortului interior în limite ce corespund destinației și categoriei de clădire.

În **CAPITOLUL 2** a fost realizat un studiu experimental privind comportamentul unei clădiri construite în incinta UPB conform Standardului Caselor Pasive, descris detaliat în **secțiunea 2.1**. Perioada aleasă spre testare a cuprins atât o perioadă de tranziție între anotimpuri cât și perioada de încălzire efectivă. Plecând de la exigențele energetice ale Standardului Passivhaus (necesar energetic specific pentru încălzire/răcire sub 15 kWh/m²/an și necesar energetic total sub 120 kWh/m²/an), s-a dorit validarea acestor date pentru climatul din București, România. Prin intermediul studiului s-a urmărit atât menținerea confortului termic interior cât și bilanțul energetic în perioada de încălzire, în acest sens fiind analizați toți senzorii ce compun infrastructura de monitorizare. În perioada 1 noiembrie 2013–30 aprilie 2014, atât temperatura de confort cât și calitatea aerului au fost menținute în limitele acceptabile din literatură: temperatura interioară nu a coborât sub 20°C cu excepția băii sudice unde nu există

aport de aer cald, în timp ce concentrația de CO₂ a fost menținută sub valoarea de 750 ppm cu ajutorul sistemului de ventilație mecanică. Utilitatea sistemului MHVR a fost analizată pentru cea mai rece zi din perioada analizată (31 ianuarie 2014), calculându-se eficiența de transfer termic a unității, rezultând valori cuprinse între 0,89 și 0,92. Implementarea unui sistem SBC a permis aplicarea unor configurații de funcționare a rezistenței electrice utilizate pentru perioadele de vârf, lucru evidențiat de numărul redus de ore de funcționare (783 ore/periode de monitorizare) și implicit a energiei electrice consumate. Sistemul activ de încălzire al Casei Laborator este compus din ventilatoarele utilizate pentru circulația aerului și din rezistență electrică utilizată în orele de vârf. Energia totală consumată pentru încălzire a fost de 2084 kWh (14,88 kWh/m²), reprezentând aproximativ 39% din energia totală necesară operării clădirii, egală cu 4786,5 kWh (34,2 kWh/m²). Distribuția consumului energetic este atipic pentru sectorul rezidențial, zona de living fiind responsabilă cu 41% din totalul energiei consumate, în timp ce, datorită neutilizării, bucătăria a consumat doar 3% din total. Mai mult, sistemul de producere al energie electrice compus din 13 panouri PV și un invertor a asigurat 9,2% din energia totală consumată, meritând să se menționează că spre sfârșitul perioadei monitorizate, sistemul a produs un surplus de energie injectat în rețea. Studiul efectuat a validat posibilitatea implementării standardului Caselor Pasive în condițiile climatice prezentate, rezultatele demonstrând faptul că se poate obține un confort interior dorit cu un consum de energie extrem de redus. Mai mult, cercetarea demonstrează că numărul de nZEB poate fi crescut pe teritoriul României adoptând acest standard de eficiență energetică.

În secțiunea 2.4 a fost realizat un studiu privind comportamentul termic și aportul adus de sistemul HVAC, pentru a putea analiza modalitatea prin care implementarea acestuia reduce consumul de energie pentru încălzirea clădirii. Rezultatele au indicat faptul beneficiul termic produs de întregul sistem HVAC a fost de 710 kWh, menționând faptul că subsistemul MVHR a contribuit cu 568 kWh din total. Energia termică câștigată de sistemul HVAC a reprezentat aproximativ 42% din totalul energiei necesare pentru a menține o temperatură de confort în clădirea studiată, rezultând astfel o reducere semnificativă comparativ cu o clădire standard din sectorul rezidențial.

CAPITOLUL 3 conține partea teoretică ce constituie baza modelării white-box și modul de utilizare a software-urilor utilizate în vederea simulării atât a necesarului de energie a Casei Laborator cât și a energie electrice produse prin implementarea sistemului de panouri fotovoltaice. Modele matematice white-box sunt în general implementate în programe dedicate ce pot simula comportamentul termic al unei clădiri. În vederea simulării energiei necesare pentru încălzirea și răcirea clădirii de studiu a fost utilizat programul dedicat EnergyPlus, un instrument de simulare „bazat pe text”, ce permite estimarea comportamentului energetic al unei clădiri pe baza unui fișier conținând date de intrare editat de utilizator. Simularea clădirii a fost efectuată utilizând un sistem HVAC ideal, care are scopul de a furniza energie termică necesară menținerii unei temperaturi setate de utilizator în zonele termice analizate. Astfel, această abordare a indicat un consum energetic pentru încălzirea aerului interior la o temperatură de 20°C (temperatura de confort) de doar 14,9 kWh/m²/an, valoare validată și de studiul experimentat prezentat anterior. În vederea răcirii au fost simulate două cazuri: cu și fără elemente de umbrire montate pe suprafața vitrată sudică. Rezultatele au indicat o reducere de aproximativ 14%, de la 16,64 kWh/m² (fără elemente de umbrire) la 14,19 kWh/m²/an (cu elemente de umbrire). Atât valorile obținute pentru încălzire cât și cele pentru răcire sunt în limitele Standardului Clădirilor Pasive. Mai mult, s-a efectuat un studiu privind independența necesarului de energie de grosimea izolației termice a anvelopei exterioare a clădirii. Rezultatele au indicat faptul că procentul de reducere al energiei consumate variază între 9,8% (cazul dublării izolației pe pereții exteriori și acoperiș de la 300 la 600 mm) și 0,94% (în cazul măririi izolației pardoselii de la 150 la 450 mm), o supra izolare a clădirii nefiind justificată din punct de vedere economic. **Secțiunea 3.3** cuprinde simularea dinamică a sistemului de panouri PV utilizând programul dedicat PVsyst. Utilizarea acestui software este recomandată de posibilitatea analizării diverselor configurații în vederea alegerii optimului atât din punct de

vedere tehnologic cât și finanțier. Simularile efectuate au indicat faptul că unghiul de înclinare real sub care au fost montate panourile PV (15°) este mic, tipul de sistem implementat având un optim de producere a energie electrică sub un unghi cuprindând între 35° și 37° .

În partea introductivă din **CAPITOLUL 4** s-a trecut în revistă teoria obținerii funcțiilor de transfer utilizate în analiza conduceției tranzitorii prin elementele de anvelopă a unei clădiri. În literatura de specialitate există două abordări de bază: metoda transformatei Laplace și metoda state-space, ambele realizând corelarea între răspunsul modelului la un moment de timp, intrările în sistem la același pas de timp și la pași anteriori, și răspunsuri anterioare, diferența constând în pașii utilizați în vederea obținerii funcției de transfer. În vederea implementării unui model matematic general (gray-box), bazat pe un număr foarte mic de intrări s-a optat pentru utilizarea unei funcții de transfer echivalente obținute dintr-o reprezentare simplă a clădirii prin sistemul stări-spațiu. **Secțiunea 4.2** conține un studiu amănunțit asupra utilizării modelelor matematice hibrid în modelarea dinamică a energiei necesare pentru încălzirea și răcirea unei clădiri, observându-se faptul că un model matematic gray-box reprezintă o mixtură între punctele forte ale celorlalte două abordări existente: modele pur fizice (white-box) și modele pur empirice (black-box), încurajând utilizarea acestei abordări. Autorul a implementat un model matematic simplu, ce oferă numeroase avantaje în vederea implementării într-un modul de clădire inteligentă. Reprezentarea anvelopei clădirii și a zonei interioare sub forma unei rețele termice simplificată, formată din 2 rezistențe și 3 capacitați termice, a permis implementarea unui Algoritm Genetic în vederea optimizării modelului matematic, Algoritm bazat pe teoria calculului evoluționist, detaliat în **secțiunea 4.3**. În cadrul tezei de doctorat, autorul a gândit un Algoritm Genetic format atât din cromozomi ce conțin doar date zonei interioare a clădirii (optim pentru simularea unei clădiri noi), cât și cromozomi compuși din toate elementele anvelopei clădirii (utilizat în evaluarea unei clădiri existente). Mai mult, pentru a putea realiza un studiu detaliat, Algoritmul Genetic își poate recalcă parametrii cu un pas de timp impus de utilizator. Atât modelul matematic cât și metoda de optimizare au fost înglobate într-o aplicație scrisă în JAVA, ce permite simularea diverselor configurații a Algoritmului Genetic prin intermediu unei interfețe grafice, intuitiv de utilizat chiar și de personal neinstruit. Rezultatele prezentate în **secțiunea 4.4.3** indică faptul că se pot obține rezultate extrem de exacte a consumului de energie pentru încălzire în perioada analizată, comparativ cu datele măsurate. Configurația optimă este descrisă de un număr de 2000 de indivizi din care supraviețuiesc 100, 10 generații, și probabilități de mutație și încruzișare de 70% pentru cazul în care se analizează un cromozom simplu, format din 5 parametri. În acest caz eroarea absolută medie calculată între model și datele reale a fost de doar 0,17 kWh, pentru 121 de zile analizate. Dacă se consideră un cromozom complet, format din 20 de parametri alegerea unui interval de recalculare de 7 zile a coincis cu cea mai bună configurație, eroarea absolută medie fiind de 0,016 kWh, neglijând ultimele 17 zile din simulare când în orice configurație, modelul matematic nu poate estimă cu o eroare acceptabilă consumul real de energie. Rezultatele prezentate au fost obținute în colaborarea cu Silvia Cristina STEGARU, doctorand anul III, în cadrul Școlii Doctorale a facultății de Automatică și Calculatoare, Universitatea POLITEHNICA din București.

5.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Fundamentul tezei de doctorat a fost acela de crea un suport teoretic de referință în vederea creșterii eficienței energetice în sectorul clădirilor. În acest scop, autorul a realizat un studiu amănunțit asupra de metodelor de reducere a energie consumată, cât și asupra cadrului legislativ ce vine în sprijinul acestor metode, prezentate în capitolul de introducere a tezei de doctorat. Mai mult, fiecare capitol conține un suport teoretic ce are rolul de a explica diversele metode utilizate în analizele efectuate.

În vederea creșterii numărului de clădiri cu consum aproape zero de energie în România, condiție impusă prin legislația Uniunii Europene, autorul a efectuat cel mai elaborat studiu până

în prezent al comportamentului unei clădiri pasive în condițiile climatice din București. Astfel, prin analiza efectuată pentru perioada de încălzire, s-a dorit să se ofere un suport practic atât autoritaților abilitate, cât și persoanelor ce doresc implementarea unor clădiri noi, echipate cu sistemele HVAC descrise, sau înglobarea acestor sisteme în soluții deja existente. Rezultatele obținute sunt încurajatoare privind aplicabilitatea infrastructurii studiată atât din punct de vedere confort-eficiență energetică, cât și din punct de vedere economic. Am contribuit de asemenea, efectiv la implementarea componentei hardware a sistemului de politici pe baza căruia s-a efectuat cercetarea prezentată anterior, dar și la montarea bypass-ului utilizat în perioada de răcire.

Plecând de la premisa că nu există un software autohton care să permită simularea în regim dinamic a comportamentului energetic al unei clădiri, s-a optat pentru realizarea unui model matematic ce poate fi utilizat în infrastructura unei clădiri inteligente. Mai mult, programele existente (EnergyPlus, TRNSys, etc.) necesită personal instruit pentru operare și implementare. Din aceste considerente, autorul a optat pentru utilizarea unui model matematic ce necesită sensibil mai puține date de intrare comparat cu alte abordări, dar care descrie comportamentul termic al clădirii. Implementarea acestui model cu ajutorul Matlab-ului a dovedit faptul că diferența comparată cu datele reale este mare, apărând necesitatea implementării unei metode de optimizare. Autorul a gândit și implementat un Algoritm Genetic îmbunătățit, menit să răspundă la cât mai multe cerințe în domeniul simulării dinamice a necesarului de energie pentru încălzirea și răcirea unei clădiri, plecând de la observarea faptului că modulul de calcul evoluționist existent în Matlab nu oferea rezultatele dorite, prezintând totodată dificultăți și restricții în utilizare. Mai mult, în cadrul tezei de doctorat a fost dezvoltă o aplicație, ce urmează a fi îmbunătățită și validată pe o gamă largă de clădiri, atât pe perioada de încălzire cât și pe perioada de răcire. Rezultatele obținute până în prezent oferă un suport atât teoretic cât și practic ce poate fi îmbunătățit în vederea realizării unui software autohton, ce poate rivaliza cu programele de calcul consacrate: EnergyPlus, TRNSys, etc. Abordarea propusă de autor, cât și utilizarea unui număr redus de date de intrare oferă și acuratețea estimării energiei consumate pentru clădirea analizată, oferă un avantaj major în comparație cu software-urile mai sus menționate, încurajând cercetările viitoare. Mai mult, modelul matematic propune un studiu interdisciplinar, unind mai multe arii de cercetare: energetică, automatică, arhitectură, instalații și construcții, necesare pentru a oferi un orizont cât mai larg asupra modelării matematice în regim dinamic în sectorul clădirilor.

5.3. PERSPECTIVE DE CERCETARE

Teza de doctorat încearcă să cuprindă elementele esențiale ale implementării metodelor de eficientizare energetică în sectorul clădirilor. Autorul a încercat să ofere un cadru teoretic și practic, ce poate fi completat ulterior prin analize viitoare. Principalele direcții de cercetare care consider că ar trebui dezvoltate ulterior sunt:

1. Exploatarea de zi cu zi a clădirii test a indicat faptul că aceasta nu îintrunește condițiile optime de confort interior pe perioada de răcire, temperatura interioară ajungând chiar și la valori mai mari de 30°C. Se propune o analiză detaliată a posibilităților de scădere a temperaturii în sezonul cald. Un prim pas a fost efectuat prin implementarea unui sistem de bypass ce are rolul de a scoate din uz recuperatorul de căldură, principalul element de supraîncălzește aerul proaspăt ieșit din sol. Studiile efectuate până în prezent au indicat că temperatura aerului la ieșirea din puțul canadian este corespunzătoare, înregistrând în cele mai multe cazuri temperaturi mai mici de 25°C. Metoda de îmbunătățire a confortului interior trebuie să țină cont de acest aspect, dar și de faptul că suprafața vitrată pe fațada sudică nu este umbrată și există un număr mare de echipamente electronice utilizate. Se impune montarea unor elemente de umbrire care să reducă impactul radiației solare asupra temperaturii de confort interior pe timpul verii. Mai mult, este din ce în ce mai evident faptul că este necesară implementarea unui sistem activ de răcire, deoarece s-a constatat faptul că elementele pasive

nu pot reduce temperatura astfel încât să fie atins confortul termic. În definiția clădirilor pasive există stipulat faptul că este permisă implementarea unui sistem activ de răcire în zonele climatice în care sistemul pasiv nu este suficient, condiția impusă fiind de ordin energetic: consumul specific maxim de energie să nu depășească valoarea impusă de $15 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Acest lucru încurajează utilizarea elementului activ, reducerea consumului de energie putând fi obținută, ca și în cazul perioadei de încălzire, prin îmbinarea eficientă a acestuia cu elementele pasive existente, inclusiv și elemente de umbrări aplicate pe suprafețele vitrate importante. O altă metodă prezentată în literatura de specialitate și care merită o atenție deosebită, este aceea de a utiliza ventilarea nocturnă în vederea atingerii confortului termic corespunzător în perioada de răcire.

2. Se dorește validarea modelului matematic pe o gamă largă de clădiri, impedimentul fiind lipsa datelor de validare (consumul de energie pentru încălzire). Mai mult, în perioada de tranziție dintre anotimpuri, când consumul de energie prezintă o variație importantă de la oră la oră, modelul matematic nu a putut estima cu precizia dorită datele, apărând necesitatea implementării unui model matematic mai complex, modular, ce poate analiza fiecare perioadă în parte. Acest lucru se poate realiza prin implementarea unui Algoritm Genetic auto-adaptiv, care, în funcție de experiențele anterioare, să decidă modalitatea și pasul de timp pentru care să își recalculeze parametrii analizați. Ideea propusă de autor în acest sens este ca, după efectuarea unei analize de sensibilitate detaliată, fiecărui parametru ce influențează major modelul matematic să îl fie atribuită o pondere ($0\dots1$), reprezentând importanța lui în ierarhia de calcul. Cu cât parametrul respectiv are o pondere mai apropiată de 1, acesta este calculat cu prioritate, reducând timpul de calcul, dar în același timp crescând eficiența de estimare, pentru o perioadă dată fiind considerat spre optimizare doar un număr redus de parametri. Etapa imediat următoare în dezvoltarea aplicației implementate de autor este reprezentată de introducerea în codul de bază a metodologiilor de calcul a radiației solare prin elementele de envelopă și de estimare a aporturilor interne totale.

3. În cadrul modelului matematic prezentat se încearcă în prezent o modalitate de a realiza o predicție a consumului de energie în adevăratul sens al cuvântului, mai ales ținând cont de faptul că în literatura de specialitate, termenul „Prediction – eng. Predicție” este utilizat pentru a descrie procesul de validare al unui model matematic gray-box. Prima etapă, și o reușită de remarcă în domeniu, ar fi implementarea unui modul ce poate prezice energia necesară pentru o perioadă scurtă (oră, zi), denumită *short-time forecasting*. În vederea prezicerii energiei consumate pe o perioadă lungă de timp, se dorește extinderea modelului matematic prin implementarea unui sistem ce înglobează prediciția datelor meteorologice, utilizate mai apoi ca date de intrare în modelul matematic existent. Reușita acestor două metode de predicție poate avea aplicabilitate inclusiv în domeniul producătorilor și distribuitorilor de energie, având posibilitatea de a-și modela procesele în funcție de prezicerile unui model matematic eficient, în ipoteza existenței sale într-un număr cât mai mare de clădiri. Această abordare poate sta la baza dezvoltării unor aşa numite orașe inteligente (Smart Cities), unde transmiterea informației are loc bidirectional între clădire și furnizorul de energie, având ca infrastructură de fundamente o rețea intelligentă (Smart Grid).

După cum se poate observa, teza de doctorat prezintă elemente existente de creștere a eficienței energetice în domeniul clădirilor, dar propune și fundamentul unei metode eficiente și avantajoase din punct de vedere economic în vederea estimării și prezicerii necesarului de energie, metodă ușor de aplicat în cercetările viitoare privind clădiri, rețele și orașe inteligente.

ANEXE

ANEXA A1. DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRII

Diseminarea rezultatelor tezei de doctorat intitulată „*Contribuții la dezvoltarea modelului matematic gray–box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică*”, realizată de ing. CĂRUȚĂȘIU Mihail-Bogdan, coordonator prof.dr.ing Adrian BADEA a fost realizată printr-o serie de publicații în reviste de specialitate și conferințe naționale și internaționale.

1. **B. CĂRUȚĂȘIU**, V. Tanasiev, C. Ionescu, A. Danu, H. Necula, A. Badea, "Reducing energy consumption in low energy buildings through implementation of a policy system used in automated heating systems", Energy and Buildings, Nr. 94, pg. 227-239, 2015 - publicat
2. **B. CĂRUȚĂȘIU**, C. Ionescu, H. Necula, A. Badea, "The efficient management of thermal energy gained in a low energy building", Quality-Access to Succes, Vol. 16, Nr. 149, 2015 – acceptat spre publicare
3. **B. CĂRUȚĂȘIU**, S. Stegaru, C. Ionescu, E. Slușanschi, A. Badea, N. Țăpuș, "An optimization method based on evolutionary computation used for estimating the energy consumption for heating in a building", Buletinul Științific UPB – acceptat spre publicare
4. A. Danu, **B. CĂRUȚĂȘIU**, V. Tanasiev, A. Badea, "Achieving high energy performance for low energy buildings in Romanian climate using green energy", Buletinul Științific UPB, 2015 – acceptat spre publicare
5. S. Stegaru, **B. CĂRUȚĂȘIU**, E. Slușanschi, C. Ionescu, N. Țăpuș, A. Badea, "The influence of genetic operators in a Genetic Algorithm used for estimating the energy consumption in a passive house", RoEduNet - XIV NER 2015, Craiova, 2015 - publicat
6. **B. CĂRUȚĂȘIU**, C. Ionescu, H. Necula, A. Badea, "The importance of finding the optimal parameters of a Genetic Algorithm used in estimating the energy consumption in buildings", EENVIRO, București 2015 – trimis spre publicare
7. A. Badea, **B. CĂRUȚĂȘIU**, V. Tanasiev, "Metode de modelare dinamică a necesarului de energie aplicate pentru o clădire cu consum foarte redus de energie". AOŞR, Iași 2015 – trimis spre publicare
8. V. Tanasiev, **B. CĂRUȚĂȘIU**, A. Badea, "Dynamic simulation of energy consumption for a passive house in Romanian climate conditions: a case study", CIEM , București, 2011. - publicat
9. **B. CĂRUȚĂȘIU**, V. Tanasiev, C. Ionescu, A. Badea, "Nearly zero energy buildings in temperate continental climate – a case study for Romania", COFRET, Paris, 2014 - publicat
10. **B. CĂRUȚĂȘIU**, V. Tansiev, A. Badea, "Căi de eficientizare a consumurilor energetice în sectorul clădirilor", AOŞR, Constanța, 2014 – publicat

ANEXA A2. CREAREA FUNCȚIEI DE TRANSFER UTILIZATĂ ÎN MODELAREA MATEMATICĂ A CLĂDIRII ANALIZARE, UTILIZÂND PROGRAMUL DE CALCUL MATLAB

```

clc
clear all
%acoperis
Thickness_c=[0.022,0.13,0.4];
Conductivity_c=[0.58,1.74,0.039];
Density_c=[950,100,120];
Sp_heat_c=[840,100,800];

%perete exterior
Thickness_e=[0.022, 0.25, 0.3];
Conductivity_e=[0.8,0.14,0.04];
Density_e=[2400,600,140];
Sp_heat_e=[840,800,800];

%pardoseala
Thickness_f=[0.022,0.008,0.1,0.12,0.1,0.051];
Conductivity_f=[0.1,0.044,0.04,1.74,0.025,0.11];
Density_f=[890,70,45,600,35,1281];
Sp_heat_f=[2100,840,840,850,1300,838];

%perete interior
Thickness_i=[0.022,0.25,0.13,0.03,0.05];
Conductivity_i=[0.58,0.8,1.74,0.04,1.7];
Density_i=[850,1925,580,45,600];
Sp_heat_i=[800,921,800,840,850];

% Thermal Resistances
%1. acoperis
Rc1=1/19.9;
Rc2=sum(Thickness_c./Conductivity_c);
Rc3=1/3.1;
%2. perete exterior
Re1=1/19.9;
Re2=sum(Thickness_e./Conductivity_e);
Re3=1/3.1;
%3. pardoseala
Rf1=sum(Thickness_f./Conductivity_f)/2;
Rf2=Rf1;
Rf3=1/3.1;
%4. perete interior
Ri1=1/3.1;
Ri2=sum(Thickness_i./Conductivity_i);
Ri3=1/3.1;
%geam
Rw=1.66;

% Thermal Capacitances
%1. acoperis
C_tot_c=sum(Thickness_c.*Density_c.*Sp_heat_c);
Cc1=C_tot_c/2;
Cc2=Cc1;
%2. perete exterior
C_tot_e=sum(Thickness_e.*Density_e.*Sp_heat_e);
Ce1=C_tot_e/2;
Ce2=1;
%3. pardoseala
C_tot_f=sum(Thickness_f.*Density_f.*Sp_heat_f);
Cf1=C_tot_f/2;
Cf2=Cf1;

```

```
%4. perete interior
C_tot_i=sum(Thickness_i.*Density_i.*Sp_heat_i);
Cil=C_tot_i/2;
Ci2=Cil;

%matricele A[8x8, B[8x9],c=[1x8];d=[1x9]

A = 3600*[-1/(Rc1*Cc1)-1/(Rc2*Cc1), 1/(Rc2*Cc1), 0, 0, 0, 0, 0, 0;
            1/(Rc2*Cc1), -1/(Rc2*Cc2)-1/(Rc3*Cc2), 0, 0, 0, 0, 0, 0;
            0, 0, -1/(Re1*Ce1)-1/(Re2*Ce1), 1/(Re2*Ce1), 0, 0, 0, 0;
            0, 0, 1/(Re2*Ce2), -1/(Re2*Ce2)-1/(Re3*Ce2), 0, 0, 0, 0;
            0, 0, 0, 0, -1/(Rf1*Cf1)-1/(Rf2*Cf1), 1/(Rf2*Cf1), 0, 0;
            0, 0, 0, 0, 1/(Rf2*Cf2), -1/(Rf2*Cf2)-1/(Rf3*Cf2), 0, 0;
            0, 0, 0, 0, 0, -1/(Ri1*Ci1)-1/(Ri2*Ci1), 1/(Ri2*Ci1);
            0, 0, 0, 0, 0, 1/(Ri2*Ci2), -1/(Ri2*Ci2)-1/(Ri3*Ci2)];

B = 3600*[0, 1/(Rc1*Cc1), 0, 1/Cc1, 0, 0, 0, 0, 0;
            1/(Rc3*Cc2), 0, 0, 0, 0, 1/Cc2, 0, 0, 0;
            0, 1/(Re1*Ce1), 0, 0, 1/Ce1, 0, 0, 0, 0;
            1/(Re3*Ce2), 0, 0, 0, 0, 0, 1/Ce2, 0, 0;
            0, 0, 1/(Rf1*Cf1), 0, 0, 0, 0, 0, 0;
            1/(Rf3*Cf2), 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
            1/(Ri1*Ci1), 0, 0, 0, 0, 0, 1/(2*Ci1), 0;
            1/(Ri3*Ci2), 0, 0, 0, 0, 0, 1/(2*Ci2), 0];

c = [0, 1/Rc3, 0, 1/Re3, 0, 1/Rf3, 1/Ri1, 1/Ri3];

d = [1/Rc3 + 1/Re3 + 1/Ri3 + 1/Rf3 + 1/Ri1 + 1/Rw, 1/Rw, 0, 0, 0, 0, 0,
      0, 1];

% Algoritmul de calcul - constante functie de transfer
fi = expm(A);
I=eye(size(A));

R0=I;
e1=-trace(fi*R0)/1;

R1=fi*R0+e1*I;
e2=-trace(fi*R1)/2;

R2=fi*R1+e2*I;
e3=-trace(fi*R2)/3;

R3=fi*R2+e3*I;
e4=-trace(fi*R3)/4;

R4=fi*R3+e4*I;
e5=-trace(fi*R4)/5;

R5=fi*R4+e5*I;
e6=-trace(fi*R5)/6;

R6=fi*R5+e6*I;
e7=-trace(fi*R6)/7;

R7=fi*R6+e7*I;
e8=-trace(fi*R7)/8;

e=[e1, e2, e3, e4, e5, e6, e7, e8];
sig1=A\ (fi-I)*B;
```

```

sig2=A\ (sig1-B);

S0=c*R0*sig2+d;
S1=c*(R0*(sig1-sig2)+R1*sig2)+e1*d;
S2=c*(R1*(sig1-sig2)+R2*sig2)+e2*d;
S3=c*(R2*(sig1-sig2)+R3*sig2)+e3*d;
S4=c*(R3*(sig1-sig2)+R4*sig2)+e4*d;
S5=c*(R4*(sig1-sig2)+R5*sig2)+e5*d;
S6=c*(R5*(sig1-sig2)+R6*sig2)+e6*d;
S7=c*(R6*(sig1-sig2)+R7*sig2)+e7*d;
S8=c*R7*(sig1-sig2)+e8*d;

S=[S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8];

%calculul functiei de transfer y(t)

Supr=140;

u=xlsread('Date_intrare_model');
a=u(1,:);
lim=size(u,1);
y=zeros(1,lim);
for t=9:lim

y(t)=(S0*u(t,:)' +S1*u(t-1,:)' +S2*u(t-2,:)' +S3*u(t-3,:)' +S4*u(t-4,:)' +S5*u(t-5,:)' +S6*u(t-6,:)' +S7*u(t-7,:)' +S8*u(t-8,:)' -e1*y(t-1) -e2*y(t-2) -e3*y(t-3) -e4*y(t-4) -e5*y(t-5) -e6*y(t-6) -e7*y(t-7) -e8*y(t-8))/1000;
end
q=Supr*y;

```

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

ANEXA A3. VALORILE PARAMETRILOR OPTIMIZAȚI

Tabel A3.1. Valorile inițiale, calculate, ale parametrilor ce formează zona interioară a rețelei termice echivalente

Parametru	Valoare	Unitatea de măsură
$R_{i,1}$	0,062	$\frac{m^2K}{W}$
$R_{i,2}$	0,185	$\frac{m^2K}{W}$
$R_{i,3}$	0,495	$\frac{m^2K}{W}$
$C_{i,1}$	442435	$\frac{J}{m^2W}$
$C_{i,2}$	102710	$\frac{J}{m^2W}$

Tabel A3.2. Valorile inițiale, calculate, pentru parametrii ce formează anvelopa exterioară a clădirii

Parametru	Valoare	Unitatea de măsură
$R_{c,1,2,3}$	3,580629	$\frac{m^2K}{W}$
$C_{c,1,2}$	28628	$\frac{J}{m^2W}$
$R_{f,1,2,3}$	3,228682	$\frac{m^2K}{W}$
$C_{f,1,2}$	98976	$\frac{J}{m^2W}$
$R_{e,1,2,3}$	2,585667	$\frac{m^2K}{W}$
$C_{e,1,2}$	82933	$\frac{J}{m^2W}$
R_w	1,66	$\frac{m^2K}{W}$

Tabel A3.3. Cele mai bune valori estimate pentru parametrii interiori utilizând modul de recalculare al Algoritmului Genetic cu un pas de timp de o zi

Timp [zile]	$R_{i,1}$ $\frac{m^2K}{W}$	$R_{i,2}$ $\frac{m^2K}{W}$	$R_{i,3}$ $\frac{m^2K}{W}$	$C_{i,1}$ $\frac{J}{m^2W}$	$C_{i,2}$ $\frac{J}{m^2W}$
1	0,007133	0,357664	4,58E-04	221220,4	221220,1
2	0,136271	0,005636	0,001713	221209,3	221222,1
3	0,024896	0,011288	0,003184	221220,6	221208,2
4	0,281588	0,007973	2,09E-05	221221,1	221220
5	2,26E-04	0,291987	0,004776	221219,6	221219,9
6	0,147886	0,005385	0,001652	221218,9	221218,3
7	0,002125	0,003035	0,127216	221220,3	221219,6
8	3,06E-04	0,23701	0,004901	221224,2	221223,1
9	0,24594	2,25E-04	0,002885	221219,9	221220,6
10	0,003703	0,079365	0,006092	221219,6	221218,4
11	0,002331	0,00201	0,047763	221220,8	221218,9
12	0,002082	0,004021	0,407995	221220,6	221222,2
13	0,00324	0,301787	0,003615	221219,1	221219,1
14	0,003478	0,002845	0,38748	221219,2	221220,3
15	0,029694	0,015377	0,002613	221220,1	221219,5
16	0,236201	0,001912	0,001364	221220,8	221224,7

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

17	0,348464	0,006325	0,002781	221219,2	221220,6
18	0,011256	0,028047	0,002052	221216,4	221223,1
19	0,003194	0,39216	0,00642	221227,7	221184,8
20	0,186566	0,004622	1,69E-04	221221,3	221219,1
21	0,00936	0,133905	0,003066	221225,5	221217,5
22	0,384959	0,002333	0,002823	221220,1	221217
23	1,66E-04	0,022837	0,012315	221219,4	221219
24	0,006675	0,149439	0,002791	221222,4	221215,7
25	0,001764	0,005025	0,303563	221226,6	221221
26	0,005761	0,090342	0,009807	221222,6	221219,8
27	0,326002	0,001458	0,002049	221219	221232,8
28	0,004258	0,001286	0,159387	221222	221215,7
29	0,004761	0,043317	0,004461	221223,9	221219,7
30	0,012641	0,009124	0,002778	221217,7	221217,5
31	0,005916	0,012091	0,015505	221220,8	221218,6
32	0,00386	0,001491	0,232611	221219,7	221219,4
33	0,010536	0,007189	0,003751	221194,8	221219,1
34	0,157137	0,001549	0,002468	221220,7	221218,3
35	0,002798	7,39E-04	0,366938	221218,2	221222,7
36	0,005097	0,412181	3,53E-04	221218,4	221217,8
37	0,003689	7,64E-04	0,339716	221219,8	221219,4
38	0,030441	2,66E-06	0,005482	221221,7	221220,4
39	0,001652	0,006815	0,239669	221218,4	221217,1
40	0,002014	0,35499	0,007944	221219,7	221217,9
41	0,006218	0,362057	0,005967	221210,2	221219,5
42	0,006083	0,364982	2,24E-04	221263	221222,4
43	3,05E-04	0,007439	0,168981	221222,7	221219,5
44	0,241922	0,00383	9,06E-04	221218,7	221217,9
45	0,002846	0,253082	0,00174	221218,8	221224,6
46	0,010697	0,38089	0,003321	221216,8	221220
47	0,17904	0,002258	0,003275	221219,7	221219,2
48	0,001398	0,296052	0,004884	221219,7	221220,1
49	0,185013	0,009635	1,54E-04	221218,3	221222
50	0,006092	0,010875	0,002594	221219,4	221218,9
51	0,001661	0,002634	0,431619	221220,5	221220,5
52	3,61E-04	0,331235	0,003771	221219,1	221220,3
53	0,001209	0,001005	0,326244	221219,8	221220,2
54	0,064394	0,004219	6,47E-05	221219,6	221218,2
55	0,007994	0,234307	0,003728	221220	221221,7
56	0,006026	0,307994	0,002662	221219,3	221219,6
57	0,360832	0,002172	0,001813	221219,5	221217,2
58	0,005766	0,271265	0,002683	221217,4	221221,9
59	0,008164	0,213832	8,34E-04	221218,9	221218,5
60	0,001687	0,002308	0,279307	221221,5	221221,7
61	0,042563	4,81E-04	5,21E-04	221220,3	221214,6
62	0,006723	0,249555	0,001938	221219,8	221223,1

Contribuții la dezvoltarea modelului gray-box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

63	0,002185	0,16266	0,009384	221219,4	221220,9
64	0,078739	0,001517	0,004701	221229,1	221216,5
65	0,001716	0,006045	0,155673	221220,9	221219,3
66	4,30E-04	0,359232	0,009391	221215,9	221220,1
67	0,001672	0,008213	0,251828	221217,8	221218,5
68	6,49E-04	0,008468	0,069811	221219,7	221219,9
69	0,013045	0,026691	4,92E-04	221221,2	221213,2
70	0,030485	0,004805	0,006033	221220,1	221221
71	0,004746	0,142916	0,00536	221219	221210,3
72	0,344362	0,008738	0,00117	221219,3	221219,1
73	0,01192	0,136631	0,001593	221222,4	221217,4
74	0,082791	0,005668	0,001116	221225	221223,1
75	0,002861	0,376574	0,010078	221219,4	221219,7
76	0,020448	0,017366	0,003368	221220,3	221220,4
77	0,042125	0,003721	0,00443	221219,9	221219,7
78	2,27E-04	0,3206	0,008003	221217,7	221220,5
79	0,001779	0,232281	0,007203	221220,1	221223,9
80	0,003952	3,03E-04	0,374812	221221,5	221221,7
81	0,002361	0,198338	0,006328	221219,9	221220,1
82	0,015035	0,011277	0,003055	221220,3	221204,2
83	0,005019	0,166941	0,009121	221220	221220
84	0,001929	0,008568	0,293412	221219,9	221219,1
85	0,003689	0,005703	0,068131	221220,2	221221,6
86	0,00547	0,045288	0,009248	221219,9	221220,4
87	0,001759	0,013712	0,022096	221232,4	221219,2
88	0,002799	0,006407	0,203976	221219	221221,2
89	0,004905	0,425146	0,01059	221219,5	221216,2
90	0,001639	0,245857	0,007591	221226,8	221219,3
91	0,036417	0,01283	0,001919	221223,9	221201,7
92	0,054714	0,010773	6,70E-04	221218,2	221220,3
93	0,007635	0,006518	0,021713	221220,7	221212,4
94	0,003838	0,004693	0,118551	221219,8	221217,4
95	0,001285	0,059102	0,00958	221225	221219
96	0,308158	8,98E-04	0,003059	221206,5	221221
97	0,005761	0,272879	0,00981	221219,4	221218,9
98	0,006731	0,424801	0,006117	221220,3	221219,7
99	0,001288	0,086073	0,01512	221219,7	221221,6
100	0,004192	0,057004	0,011779	221220,4	221220
101	0,001799	0,256512	0,010761	221213,8	221223,8
102	0,183377	0,001821	0,005669	221219,3	221230,2
103	0,002265	0,330173	0,011413	221222,4	221220,3
104	0,005266	0,171021	0,020612	221217,7	221219
105	0,264303	5,28E-04	0,002467	221219,7	221219,4
106	0,185026	0,005268	7,70E-04	221219,4	221222,5
107	0,007001	0,355253	0,002138	221220,1	221220
108	0,002379	0,32124	0,002347	221219,7	221334,3

Contribuții la dezvoltarea modelului gray–box utilizat în analiza clădirilor cu înaltă eficiență energetică

109	0,001055	0,280897	0,001789	221218,4	221221
110	0,008972	0,008852	0,00204	221217,7	221219,2
111	0,007859	0,317955	0,002105	221219,6	221224,3
112	4,06E-04	0,397573	0,002138	221220,3	221220,6
113	0,005318	0,389213	0,002277	221220,9	221213,9
114	0,005992	0,232655	5,81E-04	221218,1	221250,2
115	1,75E-04	0,003315	0,278731	221220,6	221220,6
116	0,007176	0,055792	0,005129	221218,9	221220,4
117	4,27E-04	0,265671	0,005248	221208,5	221218,6
118	6,57E-04	0,380713	2,16E-04	221218,8	221222,8
119	0,002632	0,339541	0,003088	221221,2	221217
120	3,03E-04	0,390906	0,01958	221220,4	221219,6
121	1,47E-04	0,387488	0,023596	221221,5	221220,5

ANEXA A4. ESTIMAREA CONSUMULUI DE ENERGIE UTILIZÂND O PERIOADĂ DE 5 ZILE ÎN RECALCULAREA ALGORITMULUI GENETIC

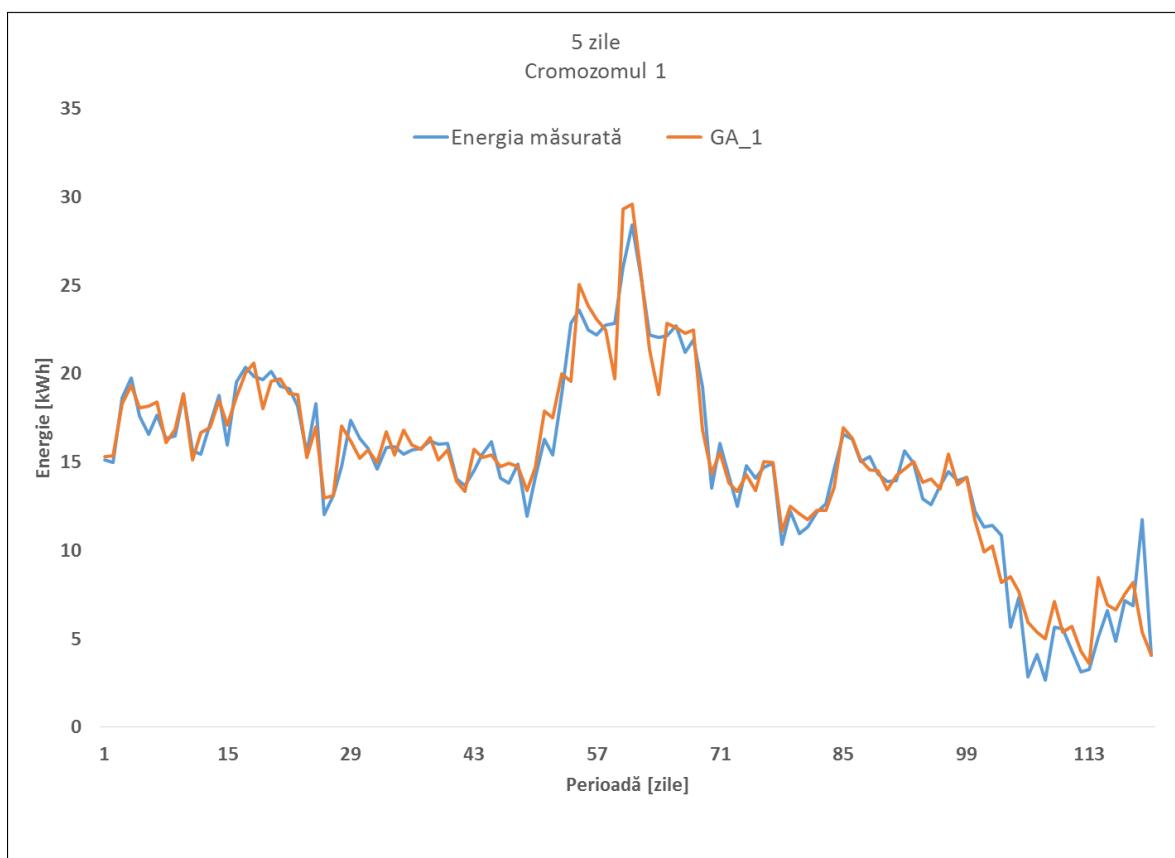


Figura A4.1. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul odată la 5 zile pentru un cromozom format din parametrii interioiri

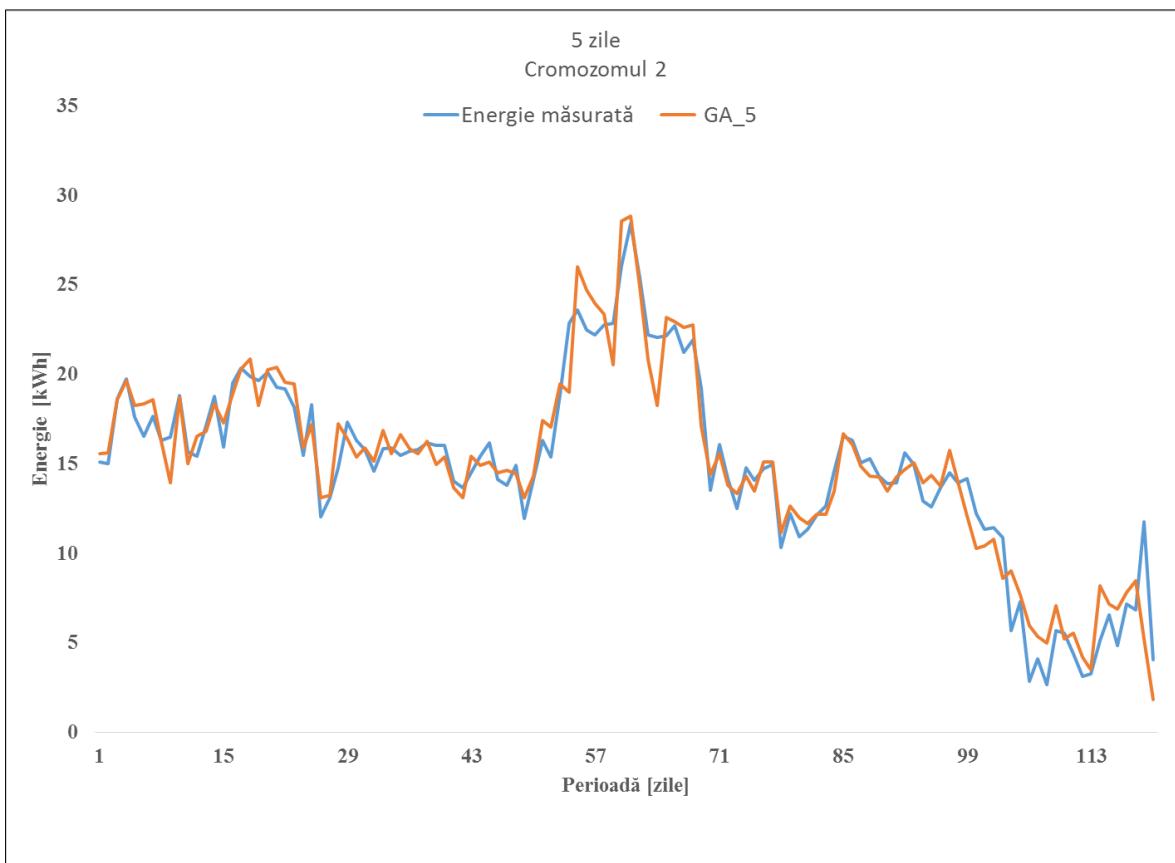


Figura A4.2. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul odată la 5 zile pentru un cromozom format din 20 de parametri, dar cu aplicarea operațiilor genetice pentru cei interioiri

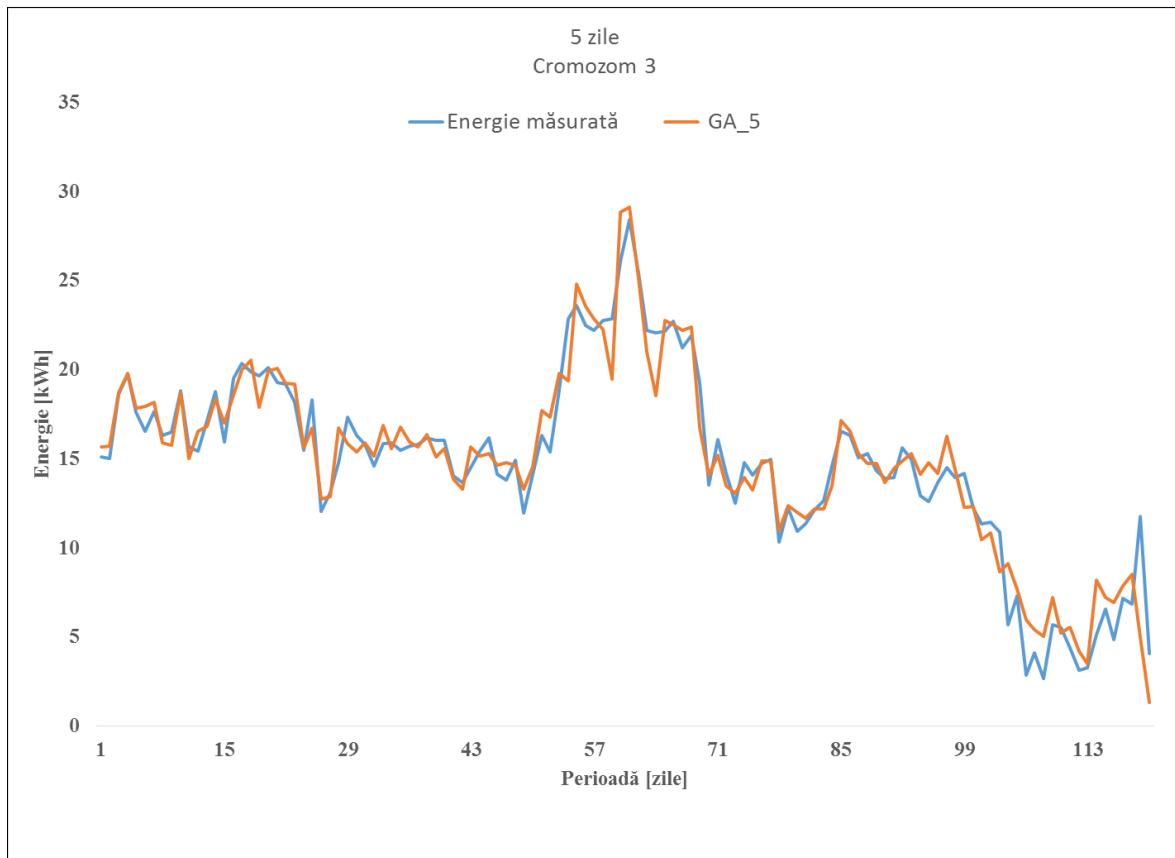


Figura A4.3. Comparație între datele măsurate și rezultatul modelului matematic optimizat recalculând algoritmul odată la 5 zile pentru un cromozom complet, format din 20 de parametri

ANEXA A5. REZULTATELE ANALIZEI DE SENZITIVITATE

Tabel A5.1. Rezultatele analizei de sensibilitate aplicată pentru parametrii interioiri

1st run	Ri1	Ri2	Ri3	Ci1	Ci2
Ri1	1	0,7952	0,7959	-0,4586	-0,4586
Ri2	0,7952	1	0,7939	-0,4566	-0,4566
Ri3	0,7959	0,7939	1	-0,4573	-0,4573
Ci1	-0,4586	-0,4566	-0,4573	1	0,28
Ci2	-0,4586	-0,4566	-0,4573	0,28	1
2nd run	Ri1	Ri2	Ri3	Ci1	Ci2
Ri1	1	0,8052	0,8047	-0,4606	-0,4606
Ri2	0,8052	1	0,8087	-0,4646	-0,4646
Ri3	0,8047	0,8087	1	-0,4641	-0,4641
Ci1	-0,4606	-0,4646	-0,4641	1	0,28
Ci2	-0,4606	-0,4646	-0,4641	0,28	1
3rd run	Ri1	Ri2	Ri3	Ci1	Ci2
Ri1	1	0,8042	0,8014	-0,4614	-0,4614
Ri2	0,8042	1	0,8028	-0,4628	-0,4628
Ri3	0,8014	0,8028	1	-0,46	-0,46
Ci1	-0,4614	-0,4628	-0,46	1	0,28
Ci2	-0,4614	-0,4628	-0,46	0,28	1

Tabel A5.2. Rezultatele analizei de sensibilitate aplicată pentru toți cei 20 de parametri ce compun rețeaua termică echivalentă a clădirii, prima rulare

1st run	Ri1	Ri2	Ri3	Ci1	Ci2	Rc1	Rc2	Rc3	Cc1	Cc2	Rf1	Rf2	Rf3	Cf1	Cf2	Re1	Re2	Re3	Ce1	Ce2
Ri1	1	0,9764	0,9767	0,6148	0,6148	0,4196	0,4195	0,4204	0,6148	0,6148	0,4251	0,4243	0,4246	0,6148	0,6148	0,4191	0,4212	0,4206	0,6148	0,6148
Ri2	0,9764	1	0,9767	0,6148	0,6148	0,4196	0,4195	0,4204	0,6148	0,6148	0,4251	0,4243	0,4246	0,6148	0,6148	0,4191	0,4212	0,4206	0,6148	0,6148
Ri3	0,9767	0,9767	1	0,6145	0,6145	0,4193	0,4192	0,4201	0,6145	0,6145	0,4248	0,424	0,4243	0,6145	0,6145	0,4188	0,4209	0,4203	0,6145	0,6145
Ci1	0,6148	0,6148	0,6145	1	0,806	0,6108	0,6107	0,6116	0,806	0,806	0,6163	0,6155	0,6158	0,806	0,806	0,6103	0,6124	0,6118	0,806	0,806
Ci2	0,6148	0,6148	0,6145	0,806	1	0,6108	0,6107	0,6116	0,806	0,806	0,6163	0,6155	0,6158	0,806	0,806	0,6103	0,6124	0,6118	0,806	0,806
Rc1	0,4196	0,4196	0,4193	0,6108	0,6108	1	0,9845	0,9836	0,6108	0,6108	0,4211	0,4203	0,4206	0,6108	0,6108	0,4151	0,4172	0,4166	0,6108	0,6108
Rc2	0,4195	0,4195	0,4192	0,6107	0,6107	0,9845	1	0,9837	0,6107	0,6107	0,421	0,4202	0,4205	0,6107	0,6107	0,415	0,4171	0,4165	0,6107	0,6107
Rc3	0,4204	0,4204	0,4201	0,6116	0,6116	0,9836	0,9837	1	0,6116	0,6116	0,4219	0,4211	0,4214	0,6116	0,6116	0,4159	0,418	0,4174	0,6116	0,6116
Cc1	0,6148	0,6148	0,6145	0,806	0,806	0,6108	0,6107	0,6116	1	0,806	0,6163	0,6155	0,6158	0,806	0,806	0,6103	0,6124	0,6118	0,806	0,806
Cc2	0,6148	0,6148	0,6145	0,806	0,806	0,6108	0,6107	0,6116	0,806	1	0,6163	0,6155	0,6158	0,806	0,806	0,6103	0,6124	0,6118	0,806	0,806
Rf1	0,4251	0,4251	0,4248	0,6163	0,6163	0,4211	0,421	0,4219	0,6163	0,6163	1	0,9742	0,9739	0,6163	0,6163	0,4206	0,4227	0,4221	0,6163	0,6163
Rf2	0,4243	0,4243	0,424	0,6155	0,6155	0,4203	0,4202	0,4211	0,6155	0,6155	0,9742	1	0,9747	0,6155	0,6155	0,4198	0,4219	0,4213	0,6155	0,6155
Rf3	0,4246	0,4246	0,4243	0,6158	0,6158	0,4206	0,4205	0,4214	0,6158	0,6158	0,9739	0,9747	1	0,6158	0,6158	0,4201	0,4222	0,4216	0,6158	0,6158
Cf1	0,6148	0,6148	0,6145	0,806	0,806	0,6108	0,6107	0,6116	0,806	0,806	0,6163	0,6155	0,6158	1	0,806	0,6103	0,6124	0,6118	0,806	0,806
Cf2	0,6148	0,6148	0,6145	0,806	0,806	0,6108	0,6107	0,6116	0,806	0,806	0,6163	0,6155	0,6158	0,806	1	0,6103	0,6124	0,6118	0,806	0,806
Re1	0,4191	0,4191	0,4188	0,6103	0,6103	0,4151	0,415	0,4159	0,6103	0,6103	0,4206	0,4198	0,4201	0,6103	0,6103	1	0,9833	0,9839	0,6103	0,6103
Re2	0,4212	0,4212	0,4209	0,6124	0,6124	0,4172	0,4171	0,418	0,6124	0,6124	0,4227	0,4219	0,4222	0,6124	0,6124	0,9833	1	0,9818	0,6124	0,6124
Re3	0,4206	0,4206	0,4203	0,6118	0,6118	0,4166	0,4165	0,4174	0,6118	0,6118	0,4221	0,4213	0,4216	0,6118	0,6118	0,9839	0,9818	1	0,6118	0,6118
Ce1	0,6148	0,6148	0,6145	0,806	0,806	0,6108	0,6107	0,6116	0,806	0,806	0,6163	0,6155	0,6158	0,806	0,806	0,6103	0,6124	0,6118	1	0,806
Ce2	0,6148	0,6148	0,6145	0,806	0,806	0,6108	0,6107	0,6116	0,806	0,806	0,6163	0,6155	0,6158	0,806	0,806	0,6103	0,6124	0,6118	0,806	1

Tabel A5.3. Rezultatele analizei de sensibilitate aplicată pentru toți cei 20 de parametri ce compun rețeaua termică echivalentă a clădirii, a doua rulare

2nd run	Ri1	Ri2	Ri3	Ci1	Ci2	Rc1	Rc2	Rc3	Cc1	Cc2	Rf1	Rf2	Rf3	Cf1	Cf2	Re1	Re2	Re3	Ce1	Ce2
Ri1	1	0,9776	0,9781	0,6141	0,6141	0,418	0,4203	0,4191	0,6141	0,6141	0,4252	0,4255	0,4248	0,6141	0,6141	0,4205	0,4206	0,42	0,6141	0,6141
Ri2	0,9776	1	0,9779	0,6143	0,6143	0,4182	0,4205	0,4193	0,6143	0,6143	0,4254	0,4257	0,425	0,6143	0,6143	0,4207	0,4208	0,4202	0,6143	0,6143
Ri3	0,9781	0,9779	1	0,6138	0,6138	0,4177	0,42	0,4188	0,6138	0,6138	0,4249	0,4252	0,4245	0,6138	0,6138	0,4202	0,4203	0,4197	0,6138	0,6138
Ci1	0,6141	0,6143	0,6138	1	0,806	0,6099	0,6122	0,611	0,806	0,806	0,6171	0,6174	0,6167	0,806	0,806	0,6124	0,6125	0,6119	0,806	0,806
Ci2	0,6141	0,6143	0,6138	0,806	1	0,6099	0,6122	0,611	0,806	0,806	0,6171	0,6174	0,6167	0,806	0,806	0,6124	0,6125	0,6119	0,806	0,806
Rc1	0,418	0,4182	0,4177	0,6099	0,6099	1	0,9839	0,9851	0,6099	0,6099	0,421	0,4213	0,4206	0,6099	0,6099	0,4163	0,4164	0,4158	0,6099	0,6099
Rc2	0,4203	0,4205	0,42	0,6122	0,6122	0,9839	1	0,9828	0,6122	0,6122	0,4233	0,4236	0,4229	0,6122	0,6122	0,4186	0,4187	0,4181	0,6122	0,6122
Rc3	0,4191	0,4193	0,4188	0,611	0,611	0,9851	0,9828	1	0,611	0,611	0,4221	0,4224	0,4217	0,611	0,611	0,4174	0,4175	0,4169	0,611	0,611
Cc1	0,6141	0,6143	0,6138	0,806	0,806	0,6099	0,6122	0,611	1	0,806	0,6171	0,6174	0,6167	0,806	0,806	0,6124	0,6125	0,6119	0,806	0,806
Cc2	0,6141	0,6143	0,6138	0,806	0,806	0,6099	0,6122	0,611	0,806	1	0,6171	0,6174	0,6167	0,806	0,806	0,6124	0,6125	0,6119	0,806	0,806
Rf1	0,4252	0,4254	0,4249	0,6171	0,6171	0,421	0,4233	0,4221	0,6171	0,6171	1	0,9715	0,9722	0,6171	0,6171	0,4235	0,4236	0,423	0,6171	0,6171
Rf2	0,4255	0,4257	0,4252	0,6174	0,6174	0,4213	0,4236	0,4224	0,6174	0,6174	0,9715	1	0,9719	0,6174	0,6174	0,4238	0,4239	0,4233	0,6174	0,6174
Rf3	0,4248	0,425	0,4245	0,6167	0,6167	0,4206	0,4229	0,4217	0,6167	0,6167	0,9722	0,9719	1	0,6167	0,6167	0,4231	0,4232	0,4226	0,6167	0,6167
Cf1	0,6141	0,6143	0,6138	0,806	0,806	0,6099	0,6122	0,611	0,806	0,806	0,6171	0,6174	0,6167	1	0,806	0,6124	0,6125	0,6119	0,806	0,806
Cf2	0,6141	0,6143	0,6138	0,806	0,806	0,6099	0,6122	0,611	0,806	0,806	0,6171	0,6174	0,6167	0,806	1	0,6124	0,6125	0,6119	0,806	0,806
Re1	0,4205	0,4207	0,4202	0,6124	0,6124	0,4163	0,4186	0,4174	0,6124	0,6124	0,4235	0,4238	0,4231	0,6124	0,6124	1	0,9811	0,9817	0,6124	0,6124
Re2	0,4206	0,4208	0,4203	0,6125	0,6125	0,4164	0,4187	0,4175	0,6125	0,6125	0,4236	0,4239	0,4232	0,6125	0,6125	0,9811	1	0,9816	0,6125	0,6125
Re3	0,42	0,4202	0,4197	0,6119	0,6119	0,4158	0,4181	0,4169	0,6119	0,6119	0,423	0,4233	0,4226	0,6119	0,6119	0,9817	0,9816	1	0,6119	0,6119
Ce1	0,6141	0,6143	0,6138	0,806	0,806	0,6099	0,6122	0,611	0,806	0,806	0,6171	0,6174	0,6167	0,806	0,806	0,6124	0,6125	0,6119	1	0,806
Ce2	0,6141	0,6143	0,6138	0,806	0,806	0,6099	0,6122	0,611	0,806	0,806	0,6171	0,6174	0,6167	0,806	0,806	0,6124	0,6125	0,6119	0,806	1

Tabel A5.4. Rezultatele analizei de sensibilitate aplicată pentru toți cei 20 de parametri ce compun rețeaua termică echivalentă a clădirii, a două rulare

3rd run	Ri1	Ri2	Ri3	Ci1	Ci2	Rc1	Rc2	Rc3	Cc1	Cc2	Rf1	Rf2	Rf3	Cf1	Cf2	Re1	Re2	Re3	Ce1	Ce2
Ri1	1	0,978	0,979	0,612	0,612	0,417	0,416	0,417	0,612	0,612	0,423	0,423	0,422	0,612	0,612	0,418	0,418	0,418	0,612	0,612
Ri2	0,978	1	0,977	0,614	0,614	0,419	0,418	0,419	0,614	0,614	0,425	0,425	0,424	0,614	0,614	0,420	0,420	0,419	0,614	0,614
Ri3	0,979	0,977	1	0,614	0,613	0,418	0,417	0,418	0,613	0,613	0,424	0,424	0,423	0,613	0,613	0,419	0,419	0,418	0,613	0,613
Ci1	0,612	0,614	0,613	1	0,806	0,610	0,61	0,610	0,806	0,806	0,616	0,616	0,615	0,806	0,806	0,611	0,611	0,611	0,806	0,806
Ci2	0,612	0,614	0,613	0,806	1	0,610	0,61	0,610	0,806	0,806	0,616	0,616	0,615	0,806	0,806	0,611	0,611	0,611	0,806	0,806
Rc1	0,417	0,419	0,418	0,610	0,610	1	0,985	0,984	0,610	0,610	0,421	0,421	0,420	0,610	0,610	0,416	0,416	0,415	0,610	0,610
Rc2	0,416	0,418	0,417	0,61	0,61	0,985	1	0,985	0,61	0,61	0,420	0,420	0,419	0,61	0,61	0,415	0,415	0,415	0,61	0,61
Rc3	0,417	0,419	0,418	0,610	0,610	0,984	0,985	1	0,610	0,610	0,421	0,421	0,420	0,610	0,610	0,416	0,416	0,416	0,610	0,610
Cc1	0,612	0,614	0,613	0,806	0,806	0,610	0,61	0,610	1	0,806	0,616	0,616	0,615	0,806	0,806	0,611	0,611	0,611	0,806	0,806
Cc2	0,612	0,614	0,613	0,806	0,806	0,610	0,61	0,610	0,806	1	0,616	0,616	0,615	0,806	0,806	0,611	0,611	0,611	0,806	0,806
Rf1	0,423	0,425	0,424	0,616	0,616	0,421	0,420	0,421	0,616	0,616	1	0,973	0,973	0,616	0,616	0,422	0,421	0,421	0,616	0,616
Rf2	0,423	0,425	0,424	0,616	0,616	0,421	0,420	0,421	0,616	0,616	0,973	1	0,973	0,616	0,616	0,422	0,421	0,421	0,616	0,616
Rf3	0,422	0,424	0,423	0,615	0,615	0,420	0,419	0,420	0,615	0,615	0,973	0,973	1	0,615	0,615	0,421	0,421	0,421	0,615	0,615
Cf1	0,612	0,614	0,613	0,806	0,806	0,610	0,61	0,610	0,806	0,806	0,616	0,616	0,615	1	0,806	0,611	0,611	0,611	0,806	0,806
Cf2	0,612	0,614	0,613	0,806	0,806	0,610	0,61	0,610	0,806	0,806	0,616	0,616	0,615	0,806	1	0,611	0,611	0,611	0,806	0,806
Re1	0,418	0,420	0,419	0,611	0,611	0,416	0,415	0,416	0,611	0,611	0,422	0,422	0,421	0,611	0,611	1	0,983	0,983	0,611	0,611
Re2	0,418	0,420	0,419	0,611	0,611	0,416	0,415	0,416	0,611	0,611	0,421	0,421	0,421	0,611	0,611	0,983	1	0,983	0,611	0,611
Re3	0,418	0,419	0,418	0,611	0,611	0,415	0,415	0,416	0,611	0,611	0,421	0,421	0,421	0,611	0,611	0,983	0,983	1	0,611	0,611
Ce1	0,612	0,614	0,613	0,806	0,806	0,610	0,61	0,610	0,806	0,806	0,616	0,616	0,615	0,806	0,806	0,611	0,611	0,611	1	0,806
Ce2	0,612	0,614	0,613	0,806	0,806	0,610	0,61	0,610	0,806	0,806	0,616	0,616	0,615	0,806	0,806	0,611	0,611	0,611	0,806	1

BIBLIOGRAFIE

- [1] „BP Statistical Review of World Energy” June 2014.
Website: bp.com/statisticalreview
- [2] Agenția Internațională de Energie (IEA): „World Energy Outlook 2013 Factsheet”, Iulie 2013.
Website: <http://www.worldenergyoutlook.org/>
- [3] Administrația Informațiilor Energetice S.U.A.: „International Energy Outlook”, Iulie 2013.
Website: <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/>
- [4] Comisia Europeană – EUROSTAT
Website: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>
- [5] „Leonardo Energy: World Energy Expenditures”, 2014.
Website: <http://www.leonardo-energy.org/world-energy-expenditures>
- [6] Consiliul Mondial al Energiei: *World Energy Resources – Expertiza pe 2013*, 2013
- [7] Enerdata: *Energy Efficiency Trends in Buildings in the EU*, septembrie 2012, pagina 15
- [8] B. Atanasiu, A. Arcipowkska, Synergies between energy efficiency and renewable energy in EU built environment. Further need of data collection for implementing EU buildings policies. Building Performances Institute Europe (BPIE), January 2014, London.
- [9] B. Lapillonne., K. Pollier, Energy efficiency trends in buildings in EU, January 2014
- [10] Commission of the European Communities, *Proposal for a recast of the energy performance of buildings directive (2002-91-EC)*, SEC(2008) 2865, Brussels, 2008
- [11] B. Atanasiu, Principles for nearly zero-energy buildings – paving the way for effective implementation of policy requirements. Building Performances Institute Europe (BPIE), pg.1, noiembrie 2011
- [12] Institutul Național de Statistică: Recensământul Populației și al Locuințelor, 24 august 2012.
- [13] European Environment Agency, Energy efficiency and energy consumption in the household sector (ENER 022), 2011
- [14] Îndrumar pentru eficiență energetică pentru clădiri – I
website:
<http://www.ipconsult.ro/Indrumar%20de%20Eficienta%20Energetica%20pentru%20Cladiri%20I.htm>
- [15] „Build Up Skills România - Raport de analiză a stării actuale” Project
website: <http://www.buildupskills.eu/nationalproject/romania>; <http://www.iee-robust.ro/>
- [16] Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice
website: http://www.mdrap.ro/userfiles/metodologie_calcul_performanta_energetica_iulie2014.pdf
- [17] B. Anastasiu, Implementing Nearly Zero-Energy Buildings (nZBE) in Romania, Building Performances Institute Europe (BPIE)
- [18] Strategia energetică a României pentru perioada 2007-2020, actualizată pentru perioada 2011-2020
- [19] Planul de Eficiență Energetică al Comisiei Uniunii Europene din 08/03/2011 (MEMO/11/149)
website: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-11-149_en.htm?locale=en

[20] Comisia Europeană: Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions – A roadmap for moving to a competitive low carbon economy, martie 2011 Website: <http://eur-lex.europa.eu/>

[21] Directiva 2002/91/CE a Parlamentului European și a Consiliului privind performanța energetică a clădirilor, decembrie 2002
Website: <http://www.epbd-ca.eu/>

[22] Concrete Action: Energy Performance of Buildings
Website: <http://www.epbd-ca.eu/>

[23] Directiva 2010/31/UE a Parlamentului European și a Consiliului privind performanța energetică a clădirilor (reformare), mai 2010
Website: <http://eur-lex.europa.eu/>

[24] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009D0406&from=EN>

[25] www.mdrl.ro/_documente/constructii/reglementari_tehnice/Anexa1_Ordin1071.pdf

[26] Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice
website: <http://www.mdrap.ro/constructii/metodologia-de-calcul-al-performantei-energetice-a-cladirilor>

[27] Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice
website: http://www.mdrap.ro/userfiles/ancheta_publica_ctr531.pdf

[28] Consiliul European pentru o Economie Eficientă Energetică (ECEEE) – Nearly zero energy buildings: achieving the EU 2020 target, februarie 2011

[29] *J. Lausten*, Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings, Agentia Internationala de Energie (IEA), Martie 2008

[30] *P. Torcellini, S. Pless, M. Deru*, Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition, National Renewable Energy Laboratory (NREL), August 2006

[31] *M. Deru, P. Torcellini*, Source Energy and Emission Factors for Energy Use in Buildings, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Iunie 2007

[32] *S. Pless, P. Torcellini*, Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Iunie 2010

[33] *M. Wigginton, J. Harris*, Intelligent Skins, Architectural Press, Oxford, UK, 2002

[34] *T. Nikolau, D. Kolokotsa, G. Stavrakakis*, Intelligent Buildings: The Global Framework.

[35] *J. K. W. Wong, H. Li, S. W. Wang*, Intelligent building research: a review, Automation in Construction, 14 (2005), pg. 143–159

[36] *T. D. J. Clements-Croome*, What do we mean by intelligent buildings?, Automation in Construction 6 (1997), 1981–1987.

[37] *D.L. Loveday, G.S. Virk, J.Y.M. Cheung, D. Azzi*, Intelligence in buildings: the potential of advanced modelling, Automation in Construction 6 (1997) 447–461.

[38] *W.F.E. Preiser, U. Schramm*, Intelligent office building performance evaluation, Facilities 20 (7/8) (2002) 279–287.

- [39] *J. Yang, H. Peng*, Decision support to the application of intelligent building technologies, *Renewable Energy* 22 (2001) 67– 77.
- [40] *A.T.P. So, A.C.W. Wong, K.C. Wong*, A new definition of intelligent buildings for Asia, *The Intelligent Building Index Manual*, 2nd edition, Asian Institute of Intelligent Buildings, Hong Kong, 2001 (October), pp. 1 – 20.
- [41] *L. Chow*, Preface, *The Intelligent Building Index 10: Health and Sanitation*, 3rd edition, Asian Institute of Intelligent Buildings, Hong Kong, 2004, pp. 1– 3.
- [42] Definiția caselor pasive
website: http://www.passipedia.org/basics/the_passive_house_-_definition
- [43] Passipedia:
website: <http://www.passipedia.org/>
- [44] *T. Baracu*, Contribuții la modelarea numerică a clădirilor, teză de doctorat, 2013.
- [45] Sustainable Energy Ireland (SEI), Passive homes – Guidelines for the design and construction of passive house dwellings in Ireland, page 1, 2007.
- [46] *K. Thullner*, Low-Energy Buildings in Europe – Standards, Criteria and Consequences. A study of Nine European Countries, teză de doctorat, 2010.
- [47] website: <http://passivehouserevolution.org/>
- [48] *P. Zangheri, L. Pagliano, S. Carlucci*, Passive house optimization for Southern Italy based on the "New Passivhaus Standard"
website: http://www.eceee.org/library/conference_proceedings/
- [49] Passipedia, Basics
website: http://passipedia.passiv.de/passipedia_en/basics
- [50] *W. Feist, J. Schnieders, V. Dorer, A. Haas*, Re-inventing air heating: convenient and comfortable within the frame of the passive house concept, *Energy Build.* 37 (11) (2005) 1186–1203
- [51] *C. Ionescu, T. Baracu, G-E. Vlad, H. Necula, A. Badea*, The historical evolution of the energy efficient buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49 (2015), 243–253.
- [52] *A. Audenaert, S.H. De Cleyn, B. Wankerckhove*, Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses, *Energy Policy* 36 (2008) 47–55.
- [53] *M. Anastasiu, A. Milandru*, Case pasive adecvate condițiilor climatice din România
- [54] *M-B. Carutasiu, V. Tanasiev, C. Ionescu, A. Danu, H. Necula, A. Badea*, Reducing energy consumption in low energy buildings through implementation of a policy system used in automated heating systems, *Energy and Buildings* 94 (2015), pages 227-239
- [55] *M.R. Brambley*, Advanced Sensors and Control for Buildings Applications: Market Assessment and Potential R&D Pathways, V page, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 2005, April.
- [56] FCINT Policy Editor User Manual University POLITEHNICA of Bucharest, Faculty of Automatic Control and Computer Science, 2012.
- [57] National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. Bucharest Băneasa Climate Normals 1961–1990.

- [58] World Weather Information Service – National Meteorological Administration (NMA): Weather Information for Bucharest.
- [59] ASHRAE Handbook I-P Edition, Indoor Environmental Health, page 10, 2001.
- [60] A. Badea, H. Necula, M. Stan, L. Ionescu, P. Blaga, G. Darie, Echipamente și instalații termice, Editura TEHNICA, ISBN: 973-31-2183-5
- [61] V. Tanasiev, Contributions to the Development of Intelligent Building Concept with High Energy Efficiency, PhD thesis, 2012.
- [62] V. Tanasiev, B. Cărăușiu, A. Badea, Dynamic simulation of energy consumption for a passive house in Romanian climate conditions: a case study, in: International Conference on Energy and Environment – CIEM, Bucharest, 2013.
- [63] B. Cărăușiu, V. Tanasiev, C. Ionescu, A. Badea, Nearly zero energy buildings in temperate continental climate – a case study for Romania, in: Colloque Francophone en Energie, Environment Economie et Thermodynamique–COFRET, Paris, 2014.
- [64] B. Cărăușiu, C. Ionescu, H. Necula, A. Badea, Gestirea eficientă a energiei termice într-o clădire cu consum redus de energie / The efficient management of thermal energy gained in a low energy building, Calitatea–acces la succes/Quality – Access to Success, vol. 16, nr. 149, 2015.
- [65] DOE, U.S. buildings energy data book, website: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/>
- [66] H. Zhao, F. Magoules, A review on the prediction of building energy consumption, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012), pages 3586–3592.
- [67] X. Li, J. Wen, Review of buildings energy modeling for control and operation, Renewable and Sustainable Energy Reviews 37 (2014), pages 517–537.
- [68] J. E. Braun, N. Chaturvedi, An Inverse Gray-Box Model for Transient Building Load Prediction, HVAC&R Research, 8:1 (2002), pages 73–99.
- [69] EnergyPlus. Energy Simulation Software, available at: website: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm
- [70] ESP-r. Energy Modelling Tool, available at: website: <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>
- [71] TRNSYS. Transient System Simulation Tool, available at: website: <http://www.trnsys.com/>
- [72] website: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects_sub.cfm
- [73] J.A. White, R. Reichmuth, Simplified method for predicting building energy consumption using average monthly temperatures. In: Proceedings of the 31st intersociety energy conversion engineering conference, (3) 1996. pages. 1834–1839.
- [74] F.S. Westphal, R. Lamberts, The use of simplified weather data to estimate thermal loads of non-residential buildings, Energy and Buildings 2004; 36(8), pages: 847–854.
- [75] R. Yao, K. Steemers, A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK, Energy and Buildings 2005;37(6), pages 663–671.

- [76] *M. Wetter, P. Haves*, A modular building controls virtual test bed for the integration of heterogeneous systems. In: Proceedings of third nation conference of IBPSA-USA SimBuild, Berkeley, California, 2008.
- [77] *J. Ma, J. Qin, T. Salsbury, P. Xu*, Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control, Chemical Engineering Science, Volume 67, Issue 1, 2012, pages 92–100. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>
- [78] *B. Coffey, F. Haghhighat, E. Morofsky, E. Kutrowski*, A software framework for model predictive control with GeoOpt, Energy and Buildings, Volume 42, Issue 7, 2010, pages: 1084–1092.
- [79] EnergyPlus Engineering Reference
website: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>
- [80] EnergyPlus Documentation
website: <http://nrel.github.io/EnergyPlus/GettingStarted/GettingStarted/>
- [81] PHPP Documentation
website: http://passiv.de/en/04_phpp/04_phpp.htm
- [82] *M. Anastasiu, A. Militaru, E.C. Mladin, I. Udrea, R. Popa, R. Andone*, Calcul de performanță energetică pentru casa pasivă din Universitatea POLITEHNICA București, ISPE
- [83] PVsyst Contextual Help, Use's Guide
website: <http://files.pvsyst.com/pvsyst5.pdf>
- [84] MeteoNorm
website: <http://meteonorm.com/en/features/parameter>
- [85] *A. Badea*, Bazele transferului de căldură și masă, Editura Academiei Române, București, 2005
- [86] *J. E. Seem*, Modeling of Heat Transfer in Buildings, PhD thesis, University of Wisconsin–Madison, 1987
- [87] *D.G. Stephenson, G.P. Mitalas*, Cooling load calculations by thermal response factors, ASHRAE Transactions 73 (1967) III1.1–III1.7.
- [88] *G.P. Mitalas*, Calculation of transient heat flow through walls and roofs, ASHRAE Transactions 74 (1968) 182–188.
- [89] *D.G. Stephenson, G.P. Mitalas*, Calculation of heat conduction transfer functions for multilayer slabs, ASHRAE Transactions 77 (1971) 117–126.
- [90] *I. Crăciun*, ME–11. Transformarea Laplace, Departamentul de Matematică și Informatică, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi”, Iași, suport de curs.
- [91] *X.B. Bassols*, The use of heat transfer functions for heat flow computation through multilayer walls, Master Thesis, Polytech Mons, January 2013
- [92] *D.G. Stephenson, G.P. Mitalas*, Calculation of heat transfer functions for multi-layer slabs, ASHRAE Transactions, vol. 77, no. 2, pages: 117–126, 1971
- [93] *D.C. Hittle, R. Bishop*, An improved root-finding procedure for use in calculating transient heat flow through multi-lazyerd slabs, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 26, no.1 , pages: 1685 – 1694, 1983

- [94] *B. Delcroix, et al.* Improved conduction transfer function coefficients generation in TRNSys multizone building model, Proceedings of BS2013, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28, 2013
- [95] *J.E. Seem, S.A. Klein, J.W. Mithcell.*, Transfer functions for efficient calculation of multidimensional transient heat transfer, Journal of Heat Transfer 111 (1989) 5–12.
- [96] *D. Rowell*, Analysis and Design of Feedback Control Systems, State-Space Representation of LTI Systems, October 2002, suport de curs MIT
- [97] ASHRAE, 2001 ASHRAE Handbook - Fundamentals
- [98] *N.L. Tudor*, Rețele neuronale artificiale – Aplicații Matlab, Editura MATRIX ROM București, România, 2012.
- [99] *R. Yokoyama, T. Wakui, R. Stake*, Prediction of energy demand using neural network with model identification by global optimization, Energy Convers Manage 2009, 50(2), pages: 319-327
- [100] *Z. Hou et al.* Cooling-load prediction by the combination of rough set theory and an artificial neural-network based on data-fusion technique, Applied Energy, 2006, 83(9), pages: 1033-1046
- [101] *J. Yang, H. Richard, R. Zmeureanu*, On-line building energy prediction using adaptive artificial networks, Energy and Buildings, 2005, 37(12), pages: 1250–1259.
- [102] *A.E. Ben-Nakhi, M. A. Mahmoud*, Cooling load prediction for buildings using general regression neural networks. Energy Conversion and Management 2004;45(13–14), pages: 2127–2141.
- [103] *S.A. Kalogirou, M. Bojic*, Artificial neural networks for the prediction of the energy consumption of a passive solar building. Energy 2000;25(5), pages:479–491.
- [104] *X. Wang, Z. Chen, C. Yang, Y. Chen*, Gray predicting theory and application of energy consumption of building heat-moisture system, Building and Environment 1999, 34(4) pages: 417–420.
- [105] *X. Xu, S. Wang*, A simplified dynamic model for existing buildings using CTF and thermal network models, International Journal of Thermal Sciences 47 (2008), pages: 1249–1262.
- [106] *S. Wang, X. Xu*, Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification, International Journal of thermal Sciences 45 (2006), pages: 419–432.
- [107] *X. Xu, S. Wang*, Optimal simplified thermal models of building envelope based on frequency domain regression using genetic algorithm, Energy and Buildings 39 (2007), pages: 525–536.
- [108] *S. Wang, X. Xu*, Parameter estimation of internal mass of building dynamic models using genetic algorithm, Energy Conversion and Management, 47 (2006), pages: 192 –1941.
- [109] *A.E. Eiben, G. Rudolph*, Theory of evolutionary algorithms: a bird's eye view, Theoretical Computer Science 229 (1999), pages: 3–9.
- [110] *M. Dianati, I. Song, M. Treiber*, An Introduction to Genetic Algorithms and Evolution Strategies, University of Waterloo, Ontario, Canada
- [111] *M. Mitchell*, An introduction to genetic algorithms, First MIT Press paperback, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1999, page 6/162.
- [112] *J.H. Holland*, Adaptation in natural and artificial systems: an introduction analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence, University of Michigan Press, 1975.

[113] *G. Jones*, Genetic and Evolutionary Algorithms, University of Sheffield, UK

[114] *J. McCall*, Genetic algorithms for modelling and optimization, Journal of Computational and Applied Mathematics, 184 (2005), pages: 205–222.

[115] *Q. Zhou, S. Wang, X. Xu, F. Xiao*, A grey-box model for next day building thermal load prediction for energy efficient control, Int. J. Energy Res. 2008 (32), pages: 1418–1431.

[116] *G. Teodoroiu, I. Serbanou*, Quantification of solar infrared radiation impact on opaque surfaces of residential buildings envelope as heat gain factor for optimized energy balance model, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, 2013