



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POS DRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI
OIPOSDRU



Universitatea
Tehnica
de Constructii
Bucuresti

UNIVERSITATEA TEHNICA DE CONSTRUCTII BUCHARESTI

Facultatea de inginerie a instalațiilor

Catedra de instalații hidraulice, termice și protecția atmosferei

TEZA DE DOCTORAT

*Creșterea productivității energetice a
panourilor fotovoltaice*

Doctorand

Ing. Ionuț-Răzvan CALUIANU

Conducător științific

Prof.univ.dr.ing. Iolanda COLDA

**BUCUREȘTI
2011**

*Titularul prezentei teze de doctorat a beneficiat pe întreaga perioadă a stagiului de pregătire doctorală de bursă atribuită prin proiectul **Burse doctorale pentru ingineria mediului construit**, cod **POSDRU/59/1.5/S/2**, beneficiar UTCB, proiect derulat în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane, finanțat din Fondurile Structurale Europene, din Bugetul național și cofinanțat de către UTCB.*

Motto:

„ O dezvoltare durabilă răspunde cerințelor prezentului fără să compromită capacitatele generațiilor viitoare de a răspunde la ale lor.”

Gro Harlem Brundtland, Primul Ministru norvegian, 1987.

Mulțumiri

Această lucrare a fost elaborată în cadrul Departamentului pentru Studii Doctorale al U.T.C.B. (Universitatea Tehnică de Construcții București) în baza contractului cu Autoritatea de Management a Programului Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane (AM POSDRU).

Cutezanță și rigoare sunt cu siguranță două dintre atrbutele pe care doamna Iolanda Colda, Profesor la U.T.C.B. și conducătorul științific al acestei teze, a știut să mi le comunice pe tot parcursul devenirii mele în domeniul cercetării științifice. Doresc să îi mulțumesc pentru îndrumarea și susținerea care mi-au fost de mare folos în elaborarea și finalizarea acestei lucrări.

Tin să mulțumesc de asemenea domnului Gilles Notton, Conferențiar la Universitatea din Corsica, pentru amabilitatea de a mă primi și a mă îndruma de-a lungul stagiului efectuat în cadrul Laboratorului UMR CNRS 6134 (Unité Mixte de Recherche, Centre National de la Recherche Scientifique), unde am făcut primii pași în domeniul cercetărilor experimentale și teoretice. Totodată doresc să îmi exprim recunoștința tuturor celor care au făcut posibil acest stagiu.

Mulțumesc doamnei Rodica Frunzulică, Profesor la U.T.C.B., domnului Walter Bosschaerts, Profesor la Academia Militară Regală Bruxel și domnului Mircea Ignat, Cercetător la Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA, pentru că mi-au făcut onoarea de a-și asuma dificila sarcină a evaluării acestei teze.

Domului Florin Băltărețu, Conferențiar la U.T.C.B, pentru buna colaborare pe care am avut-o, pentru amabilitate și pentru prietenie, doresc să îi mulțumesc pe această cale.

Mulțumesc profesorilor, cercetătorilor, doctoranzilor, tehnicienilor și tuturor celor implicați în reușita acestei lucrări.

CUPRINS

I. Introducere.....	8
1. Tematica generală și domeniile de studiu.....	8
2. Contextul și obiectivele cercetărilor efectuate.....	9
3. Abordare și rezultate.....	10
II. Conversia fotovoltaică.....	13
1. Radiația solară.....	13
2. Efectul fotoelectric.....	16
2.1. Prințipiu de funcționare al celulelor fotovoltaice.....	17
2.2. Tipuri uzuale de celule fotovoltaice.....	18
2.3. Caracteristici energetice ale celulelor fotovoltaice.....	20
III. Creșterea productivității electrice a panourilor fotovoltaice.....	23
1. Introducere.....	23
2. Modelarea funcționării panourilor fotovoltaice.....	24
2.1. Modelul simplă diodă și modelul dublă diodă.....	24
2.2. Punctul maxim de putere.....	27
2.3. Utilizarea rețelelor neuronale artificiale în domeniul energiei solare și a conversiei fotovoltaice.....	32
2.3.1. Construcția și funcționarea rețelelor neuronale statice.....	33
2.3.2. Modele de rețele neuronale aplicate panourilor fotovoltaice.....	45
3. Modelarea punctului maxim de putere al unui panou BP 585 F.....	51
3.1. Achiziția experimentală a datelor.....	52
3.1.1. Introducere.....	52
3.1.2. Sisteme de achiziție pentru panouri fotovoltaice.....	54
3.1.3. Instalația de panouri fotovoltaice cu achiziție avansată de date a laboratorului UMR CNRS 6134.....	70
3.1.4. Sistemul PV-KLA.....	75
3.2. Model de rețea neuronală feed-forward.....	78
3.3. Simularea și validarea modelului în MATLAB.....	81
3.4. Compararea performanțelor modelului neuronal studiat cu cele ale modelului simplă diodă.....	85
4. Utilizarea microcontrolerelor PIC în instalații fotovoltaice.....	87

4.1. Introducere.....	87
4.2. Arhitectura generală a microcontrolerului PIC 16F877.....	87
4.3. Modelarea și simularea unui sistem de comandă MPPT cu microcontroler PIC 16F877.....	90
5. Concluzii parțiale capitolul III.....	96
IV. Recuperarea energiei în sistemele fotovoltaice hibride.....	99
1. Stadiul actual al utilizării sistemelor fotovoltaice hibride.....	99
2. Studiul fenomenelor termice aplicate panourilor fotovoltaice.....	107
2.1. Convecția liberă.....	107
2.2. Radiația termică.....	115
3. Modelarea transferului termic pentru un panou fotovoltaic BP 585F.....	118
3.1. Metoda elementului finit.....	118
3.2. Modelarea 2D în COMSOL.....	124
3.3. Simulații și rezultate în COMSOL Multiphysics.....	130
3.4. Recuperarea căldurii cu termoelemente.....	138
4. Concluzii parțiale capitolul IV.....	143
V. Concluzii generale. Contribuții originale și perspective.....	146
Bibliografie.....	149
Anexe.....	155
Listă de notații, abrevieri și indici.....	161

CAPITOLUL I

Introducere

1. Tematica generală și domeniile abordate

Economia de energie este la ora actuală o prioritate mondială, prezervarea planetei și a resurselor ei devenind obiective principale internaționale. Crize energetice, ce derivă din epuizarea sau exploatarea din ce în ce mai grea a surselor de energie convenționale, se adaugă schimbări climatice vizibile, cauzate de emisia în atmosferă a gazelor cu efect de seră. În acest context, în anul 1997 a fost negociat și încheiat protocolul de la Kyoto, care este în vigoare din anul 2005 și prin care țările semnatare se obligă să reducă emisiile poluante din atmosferă cu 5,2% în perioada 2008-2012 în raport cu cele din anul 1990. În noiembrie 2004, 127 de țări ratificaseră deja acordul, inclusiv membrii Uniunii Europene, dintre care făceau parte România și Bulgaria.

Contextul energetic mondial, conduce către o preocupare intensă în domeniul energiilor neconvenționale. Dintre acestea, energia solară ocupă un loc important. Se poate menționa faptul că Pământul nu primește, la suprafața sa, decât o mică parte din radiația emisă de Soare, după ce aceasta suferă fenomenele de transmisie, absorție și difuzie la nivelul atmosferei. În aceste condiții intensitatea ei scade cu 30% în cazul în care cerul este senin și clar. Anual, pe continente se primesc în jur de $1,5 \times 10^{18}$ kWh, de 10 000 de ori mai mult decât consumul energetic mondial [WWW. 4], Soarele devenind astfel una dintre cele mai importante surse neconvenționale.

Energia solară poate fi captată și transformată fie în energie electrică prin utilizarea tehnologiilor fotovoltaice, fie în energie termică, prin utilizarea diferitelor tipuri de panouri solare termice. În acest context, domeniile pe care le-am abordat în acest studiu sunt producerea energiei electrice cu ajutorul panourilor fotovoltaice și transferul termic ce are loc la nivelul acestora.

2. Contextul și obiectivele cercetărilor efectuate

Panourile fotovoltaice sunt dispozitive ce transformă energia solară în energie electrică. Problema producerii acestora este dată de fenomenologia ce decurge din caracterul aleator al sursei solare și al variațiilor meteorologice imprevizibile. Astfel un sistem fotovoltaic rămâne tributar atât fiabilității sale, cât și ritmului și hazardului aprovizionării cu energie primară.

Pe de altă parte sistemele fotovoltaice nu utilizează decât o mică parte din radiația solară și de anumite lungimi de undă, pentru a produce energie electrică. Restul energiei primite la suprafață este transformată în căldură, ce conduce la creșterea temperaturii celulelor componente și la scăderea randamentului lor. În consecință, creșterea productivității energetice a acestor instalații presupune atât eficientizarea funcționării lor în domeniul electric, cât și studiul fenomenelor termice care au loc.

Obiectivul studiului electric a fost obținerea maximului de putere disponibil la bornele unui panou fotovoltaic BP 585 F. Acest lucru este posibil prin intermediul unui etaj de adaptare între generatorul PV și utilizatorul de sarcină. Deși există mai multe tipuri de algoritm de comandă a unui astfel de etaj, acestea prezintă dezavantaje importante în funcționare. În aceste condiții obiectivul a fost realizarea unui model de predicție a punctului maxim de putere al unui panou BP 585 F utilizând rețele neuronale artificiale și implementarea acestui model pe un microcontroler PIC 16F877, care să genereze semnalul de comandă a sistemului de urmărire a punctului maxim de putere.

Cercetările în domeniul termic au avut ca scop evidențierea influenței distanței de montaj și a unghiului de înclinare asupra transferului termic de la nivelul panoului BP 585 F. Un alt obiectiv a fost investigarea posibilității recuperării căldurii cu elemente termoelectrice și posibilitatea intensificării schimbului termic la nivelul feței inferioare a modulului prin utilizarea de nano-materiale.

3. Abordare și rezultate

Am structurat lucrarea în trei capitole principale în care tratez pe rând problemele privitoare la radiația solară și la performanțele energetice ale celulelor PV, problemele privitoare la modelarea fenomenelor electrice și în final problemele privitoare la modelarea transferului termic ce au loc la nivelul unui panou BP 585 F și studiile aferente.

Astfel, în capitolul al II-lea am abordat din punct de vedere teoretic fenomenul de radiație solară și procesele fizico-chimice care au loc la nivelul atmosferei terestre. De asemenea am evidențiat principalele tipuri de celule fotovoltaice, tehnologia de fabricație, principiul lor de funcționare și caracteristicile lor energetice. Toate acestea sunt necesare în modelările și studiile ulterioare.

În capitolul al III-lea am studiat creșterea productivității electrice a panourilor PV. Acest lucru este posibil fie prin construirea de celule din materiale cu performanțe ridicate, fie prin eficientizarea instalațiilor existente. Realizarea transferului maxim de putere dintre generatorul PV și receptor se face cu ajutorul adaptoarelor DC-DC. Noutatea studiului constă în faptul că am realizat comanda unui astfel de etaj utilizând un model optim de rețea neuronală artificială implementată pe microcontrolerul PIC 16F877. Am studiat și am comparat diverse arhitecturi și tehnici de antrenare a rețelelor neuronale artificiale, aplicate modulului BP 585 F. Am prezentat două instalații de achiziție de date instalate la laboratorul UMR CNRS 6134, Ajaccio, Franța și în final am realizat și am prezentat schema electrică a modulului de comandă al sistemului de urmărire a punctului maxim de putere.

În general aceste sisteme sunt instalate la bornele unui câmp de panouri fotovoltaice. Rezultatele studiilor pe care le-am efectuat arată posibilitatea realizării și implementării unui de sistem urmărire a punctului maxim de putere pe fiecare panou al unui ansamblu. Prin acesta se va urmări menținerea fiecărui modul la punctul său maxim de putere.

Capitolul al IV-lea conține modelul COMSOL al unui modul BP 585 F precum și studiile privitoare la recuperarea energiei termice și la intensificarea schimbului de căldură. Am evidențiat influența distanței de montaj a modulului BP 585 F față de un perete, influența unghiului de montaj asupra schimbului termic și a formării stratului limită, precum și influența utilizării unui nano-material pe fața inferioară a panoului. În finalul capitolului am prezentat rezultatele experimentale privind posibilitatea recuperării căldurii sub formă de energie electrică prin utilizarea elementelor cu efect Seebeck.

În capitolul al V-lea am evidențiat rezultatele generale ale cercetărilor, contribuțiile originale și perspectivele studiilor efectuate.

CAPITOLUL II

Conversia fotovoltaica

1. Radiația solară

Energia solară primită anual pe Terra însumează $1,5 \times 10^{18}$ kWh, aproape de 10 000 de ori mai mult decât consumul anual de energie în lume [WWW. 4]. Soarele este considerat un corp negru având o temperatură de $T \approx 6000K$ care interacționează cu Pământul și cu atmosfera sa. Intensitatea maximă a radiației solare la intrarea în atmosferă este de 1353 W/m^2 și se numește constantă solară. Mici variații în jurul acestei valori se datorează variației distanței dintre Terra și Soare, aproximativ $\pm 1,7\%$, irregularităților suprafetei solare și rotației acestuia.

Soarele emite o radiație electromagnetică cu o putere de aproximativ $3.86 \times 10^{26} \text{ J/s}$, într-o gamă variată de lungimi de undă, de la raze X la unde radio. Cea mai mare parte din această energie este emisă între 0,2 și $8 \mu\text{m}$, repartizată în următoarea manieră: 10% ultraviolet, 40% spectru vizibil și 50% infraroșu. Spectrul solar este reprezentat în figura 2.1.

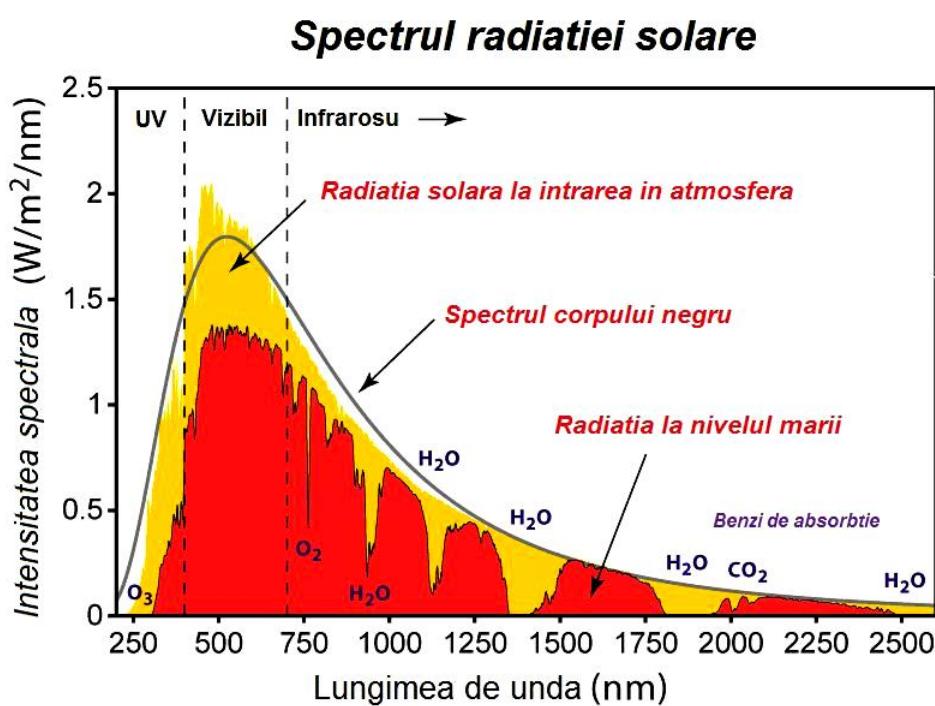


Figura 2.1 – Spectrul radiației solare [WWW. 1]

Datorită trecerii sale prin atmosferă, radiația solară este supusă fenomenelor de absorbție, difuziune și transmisie, fiind redusă cu aproximativ 30%. La nivelul Pământului, radiația solară se poate clasifica în:

- *radiația directă* – componenta paralelă, provenită de la discul solar și măsurată după direcția normalei la suprafață.
- *radiația difuză* – radiația primită de o suprafață plană provenită din toată emisfera văzută de pe acea suprafață, cu excepția discului solar.
- *radiație reflectată* – este rezultatul reflexiei razelor de către suprafete reflectante; această componentă depinde de albedoul suprafetei respective.
- *radiația globală* – radiație directă și radiație difuză.

Pentru funcționarea panourilor PV, radiația directă este cea mai importantă. În cazul unui cer senin, aceasta are cea mai mare intensitate atunci când soarele se găsește la punctul său de maxim spre Sud în emisfera nordică și spre Nord în emisfera sudică. Acest lucru se datorează celei mai scurte distanțe pe care undele electromagnetice trebuie să le parcurgă de-a lungul atmosferei terestre. Înclinarea unei suprafete, orientată spre sud ca în figura 2.2 și poziția ei față de soare este descrisă de unghiul h (înălțimea la care se găsește soarele la ora respectivă) și unghiul azimutal γ . Datorită mișcării de revoluție a Pământului, poziția soarelui este diferită față de suprafața din figura 2.2 și în funcție de sezon.

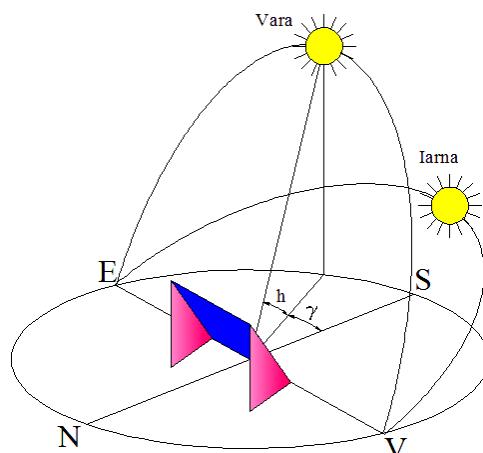


Figura 2.2 – Unghiuri solare

Totodată intensitatea radiației solare este o funcție de unghiul zenital și starea atmosferei, incluzând conținutul de ozon, de vapori de apă, de aerosoli, de praf și de nori. În figura 2.3 este prezentată variația intensității radiației solare în funcție de unghiul zenital și coeficientul AM pentru presiunea aerului la nivelul mării 10^5 N/m^2 , un conținut de apă de-a lungul unei coloane verticale de $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^2$, conținut de ozon $0,0034 \text{ m}^3/\text{m}^2$, ambele măsurate în condiții standard de temperatură și distanță medie Pământ-Soare [SOR. 04].

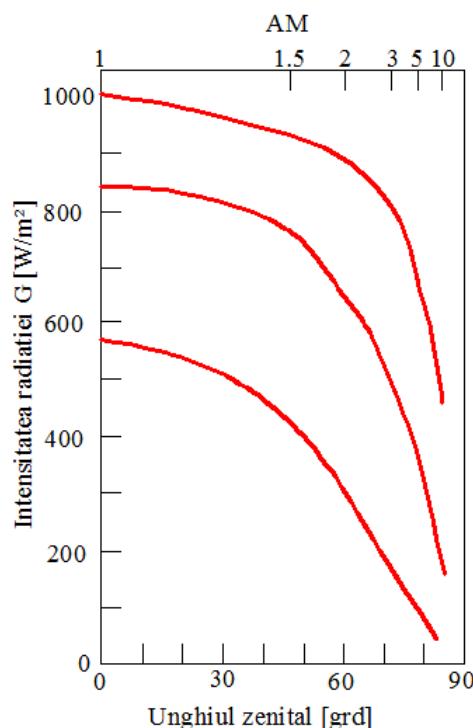


Figura 2.3 – Intensitatea radiației solare normale la suprafață

- a) atmosferă ipotecă – turbiditate zero,
- b) atmosferă clară – turbiditate 0,01,
- c) atmosferă poluată – turbiditate 0,4 [SOR. 04]

2. Efectul fotoelectric

Datorită absorbției radiației electromagnetice, în anumite materiale electronii de pe straturi energetice inferioare pot trece pe straturi energetice superioare, devenind astfel liberi. Fenomenul invers se produce însotit de eliberare de energie. Lumina, în special ultra-violetele, poate descărca materialele electrizate negativ,

având ca efect emiterea de raze asemănătoare razelor catodice. Aceste fenomene au fost descoperite de Hertz și Hallwachs în anul 1887. Alte studii din același domeniu au fost publicate de Lenard în anul 1900 [WWW. 3]. Efectul fotoelectric este un fenomen fizic propriu semiconductoarelor. Aceasta presupune o strânsă legătură între lumină și proprietățile electrice ale materialelor. Efectul fotovoltaic este studiat pentru prima dată de Alexandre Edmond Becquerel, în anul 1839. Primele celule fotovoltaice au fost construite de către Johann Elster și Hans Geitel, fiind utilizate la măsurarea intensității luminoase.

2.1 Principiul de funcționare al celulelor fotovoltaice

În anul 2001, 99% dintre celulele fotovoltaice au fost realizate din siliciu, element chimic din familia cristalogenilor, cel mai abundant din natură după oxigen (27, 6%). Siliciul se găsește în formă naturală în compuși precum silica (nisip, quartz, cristobalit etc.) sau silicății (feldspat, caolin etc.), nefiind un element toxic [CAL. 08].

Datorită faptului că siliciul are 4 electroni pe ultimul strat, pentru a realiza elemente electronegative (de tip N) sau electropozitive (de tip P), acesta este dopat cu elemente de valență superioară (fosfor), respectiv cu elemente de valență inferioară (bor). Prin acest procedeu se alcătuiesc semiconductoarele de tip N, respectiv semiconductoarele de tip P. Prin punerea în comun, în aceeași rețea cristalină în maniera de a avea conductivitate electrică, a unui material de tip N cu un material de tip P se obține o joncțiune PN. O celulă fotovoltaică este alcătuită dintr-o joncțiune de acest tip, doi electrozi, o grilă conducătoare și un strat antireflexie .

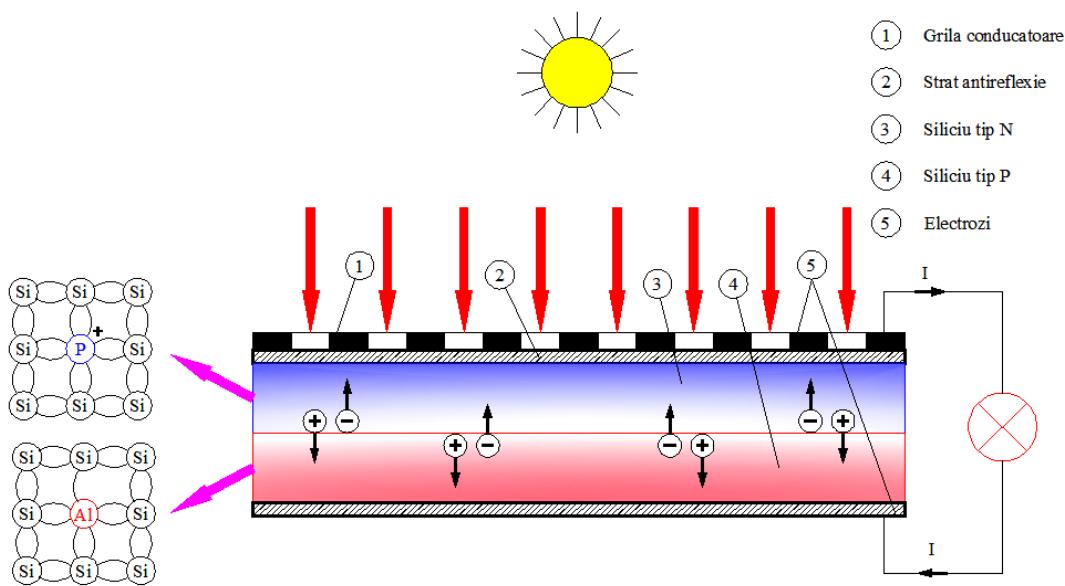


Figura 2.4 – Structura și principiul de funcționare al unei celule PV cu Si

O celulă PV transformă o parte din energia radiativă primită de la soare în electricitate, pentru lungimile de undă cuprinse în spectrul vizibil și foarte puțin din ultraviolete și infraroșii. Acest fenomen se datorează faptului că electronii din materialul de tip N absorb energia fotonilor proveniți din radiația solară, devenind liberi în rețeaua cristalină. Datorită existenței câmpului electric creat de joncțiunea PN, acești electroni liberi se deplasează către electrodul pozitiv, dând naștere unei diferențe de potențial.

Pentru ca un electron din banda de valență a materialului să devină liber și să poată participa la conduction, acesta trebuie să absoarbă o anumită energie. Această cantitate are o valoare proprie pentru fiecare material semiconductor. Valorile uzuale pentru celulele PV sunt:

- $1,12\text{eV}$ ($\lambda = 11\text{nm}$) pentru siliciu cristalin;
- $1,65\text{eV}$ ($\lambda = 75\text{nm}$) pentru siliciu amorf;
- $0,66\text{eV}$ ($\lambda = 188\text{nm}$) pentru germaniu.

În consecință fotonii cu lungimi mari de undă, a căror energie cinetică este mică desprind puțini electroni de pe stratul de valență și au o eficiență scăzută în producerea energiei electrice. Pe de altă parte fotonii cu lungimi foarte mici de undă,

bogați în energie vor fi absorbiți la suprafața celulei într-o zonă nefavorabilă producerii energiei electrice. Surplusul de energie este transformat în căldură și conduce la încălzirea materialului [CAL. 08], [CAL. 09-3].

2.2 Tipuri uzuale de celule fotovoltaice

Siliciul este cel mai utilizat material pentru producerea de celule PV la nivel industrial. În urma proceselor tehnologice industriale se obține siliciul metalurgic cu o puritate de 98%. Acesta este supus apoi unei etape de purificare chimică, obținându-se siliciul de calitate electronică, sub formă lichidă. Ultima etapă este cea de dopare pentru obținerea materialelor de tip P și de tip N. O celulă PV trebuie să funcționeze între 2 și 3 ani pentru a produce energia necesară procesului său de fabricație.

Celule cu siliciu monocristalin

În urma răcirii sale, siliciul cristalizează, dând naștere unui singur cristal. Aceasta se decupează în fâșii subțiri pe care sunt aplicate apoi celelalte straturi componente ale unei celule PV. Culoarea lor este în general albastru uniform. Avantajul principal al acestui tip de celule este randamentul lor foarte bun ($\approx 17\%$). Dezavantajele constau în costul ridicat de producție și randament scăzut în cazul unei slabe iluminări.

Celule cu siliciu policristalin

În timpul cristalizării se formează mai multe cristale. Decuparea în fâșii conduce la realizarea de celule compuse din mai multe cristale. Acestea sunt de asemenea albastre, dar se pot distinge diversele motive formate în urma cristalizării. Avantajele acestei tehnologii sunt: randament bun al celulelor ($\approx 13\%$), preț de producție mai scăzut. Dezavantaje: randament scăzut în cazul unei slabe iluminări.

Sunt cele mai utilizate celule la nivel industrial, pentru producerea de panouri PV, având cel mai bun raport calitate-preț.

Celule cu siliciu în stare amorfă

În acest caz siliciul nu este cristalizat, ci se depune pe o foaie de sticlă. Culoarea are o tentă gri. Avantajele constau într-un randament bun în cazul unei slabe iluminări și în costul scăzut de producție. Dezavantajele sunt un randament scăzut în cazul intensităților mari ale radiației solare și degradarea materialului într-un timp relativ scurt de funcționare.



Figura 2.5 – Celule cu siliciu (monocristalin, policristalin și amorf) [WWW.3]

Celule tandem

Celulele tandem se realizează prin asocierea tipurilor de celule prezentate mai sus, sub formă de straturi. Această combinație conduce la absorbirea unui spectru mai larg al radiației electromagnetice pentru producerea de energie electrică. În acest fel se ameliorează randamentul de conversie, față de o celulă simplă. Costul de producție în acest caz este evident mai ridicat.

Celule cu film subțire

Această tehnologie presupune reducerea cantității de material folosită la producerea de celule PV, dar poate conduce și la o scădere a randamentului de conversie. Acest tip de celule a devenit des utilizat din prisma costurilor scăzute de fabricație, greutății reduse a panoului și flexibilității lor. Din această categorie fac parte celulele CdTe, CIGS și GaAs.

Celule din polimeri

Acest tip de celule se fabrică din polimeri organici și reprezintă una dintre cele mai noi tehnologii PV. Celulele sunt în general realizate în film (10 nm) din polifenilen-vinil și fulerene de carbon.

2.3 Caracteristici energetice ale celulelor fotovoltaice

Randamentul unei celule PV este definit ca raportul dintre puterea electrică furnizată la bornele sale și puterea radiației incidente:

$$\eta = \frac{P_e}{P_i} \quad (2.1)$$

Puterea electrică disponibilă la bornele unei celule PV variază în funcție de: intensitatea radiației solare, temperatura celulei, unghiul de incidentă al razelor solare, caracteristicile constructive ale celulei și condițiile meteorologice (temperatură ambientă, viteza vântului etc.)

Tip de celulă	Randament			Domenii de aplicabilitate
	Teoretic	În laborator	Real	
m-Si	27,0 %	24,7 %	14,0-16,0 %	Module de mari dimensiuni pentru acoperișuri și fațade, aparate de putere mică, aerospațiale (sateliți).
p-Si	27,0 %	19,8 %	12,0-14,0 %	Module de dimensiuni mari pentru acoperișuri și fațade, generatoare de toate puterile.
a-Si	25,0 %	13,0 %	6,0-8,0 %	Aparate de putere mică (calculatoare), module de dimensiuni mari pentru acoperișuri și fațade.
GaAs	29,0 %	27,5 %	18,0-20,0 %	Sisteme cu concentratoare, aerospațiale.
CIGS	27,5 %	18,2 %	10,0-12,0 %	Aparate de putere mică (calculatoare), module de dimensiuni mari pentru acoperișuri și fațade.
CdTe	28,5 %	16,0 %	8,0 %	Module de dimensiuni mari pentru integrarea în construcții.

Tabelul 2.1 – Randamentul celulelor PV și domeniul lor de aplicabilitate.

Răspunsul spectral al unei celule PV este eficacitatea cu care aceasta transformă energia radiației solare în electricitate. Eficacitatea sa depinde în cea mai mare măsură de proprietățile materialului din care este fabricată. Chiar dacă prin

definiție fotonul are o masă nulă, el deține totuși o energie cinetică. Aceasta se definește ca fiind produsul dintre constanta lui Planck și frecvența radiației (relația 2.2) [DUC. 99]:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.2)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

Factorul de formă este definit ca raportul dintre puterea maximă furnizată de o celulă PV în condiții date de funcționare și puterea livrată de o celulă ideală, în aceleași condiții de funcționare:

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.4)$$

Pentru celulele cristaline factorul de formă variază între 0,75 și 0,85, iar pentru cele amorse între 0,5 și 0,7.

CAPITOLUL III

Creșterea productivității electrice a panourilor fotovoltaice

1. Introducere

La ora actuală există diverse tehnologii și materiale pentru a produce celule solare. Dintre cele mai noi se numără materialele organice, plasticul sau celule în film subțire, obținute din combinații ale semiconductoarelor cu alte materiale.

Cu toate acestea piața fotovoltaică este dominată în proporție de aproape 80% de tehnologia siliciului cristalin. Cele mai mari randamente ale acestora s-au obținut în laborator pentru celule mici (2cm x 2cm), iar valoarea acestora se situează la 25%. Eficiența modulelor comercializate este de 14% pentru celule din siliciu mono-cristalin (m-Si) și 12% pentru cele poli-cristaline (p-Si). În ceea ce privește celulele amorse cu strat subțire de siliciu, randamentul acestora, utilizând tehnologii complexe de fabricație, nu se ridică la mai mult de 5-8% [EIC 03].

Există două posibilități de creștere a productivității energetice a unui panou fotovoltaic. Fie prin studiul și concepția de noi materiale pentru celulele fotovoltaice care să transforme o mai mare parte din spectrul emis de soare în energie electrică, fie optimizarea și eficientizarea instalațiilor deja existente.

După studiul modelelor analitice, am realizat și am implementat în MATLAB un model determinist, bazat pe teoria rețelelor neuronale artificiale, pentru a caracteriza funcționarea celulelor fotovoltaice. Am comparat performanțele modelului neuronal cu cele ale modelului simplă diodă, pe baza datelor experimentale preluate în cursul stagiului doctoral la laboratorul UMR CNRS 6134 al Universității din Corsica. Am implementat apoi modelul neuronal pe un microcontroler PIC 16F877.

În general există un sistem de urmărire al punctului maxim de putere montat pentru un ansamblu de panouri fotovoltaice. Scopul acestui studiu a fost conceperea unui sistem de achiziție a datelor și de urmărire a punctului maxim de putere, cu microcontroler PIC, care să poată fi implementat pe fiecare panou al unui câmp fotovoltaic, urmărindu-se prin acesta creșterea productivității energetice a întregului sistem.

2. Modelarea funcționării panourilor fotovoltaice

Există în literatura de specialitate mai multe modalități de descriere a funcționării celulelor fotovoltaice. Deoarece acestea sunt generatoare ale unui fotocurent, modelele cele mai uzuale sunt obținute prin suprapunerea caracteristicii unei diode semiconductoare cu un generator de curent, independent de tensiune. La acestea se adaugă pierderile prin rezistențele electrice existente ale materialului în sine, ale contactelor electrice și ale altor fenomene ce au loc în interiorul celulei fotovoltaice [EIC 03].

2.1 Modelul simplă diodă și modelul dublă diodă

Cele mai utilizate modele pentru a caracteriza funcționarea celulelor fotovoltaice sunt modelul simplă și dublă diodă. Spre deosebire de modelul cu o diodă, cel cu două diode ține seama și de fenomenul de recombinare a putătorilor de sarcină în zona goluri-sarcină.

Modelul simplă diodă

Circuitul descris în figura 3.1 ține cont de fenomenele ce intervin în funcționarea reală a celulei fotovoltaice (PV). Sursa de curent legată în paralel cu o diodă semiconductoare modelează o celulă ideală, la care se adaugă cele două rezistențe electrice ce modelează pierderile de curent și de tensiune [CAL. 11].

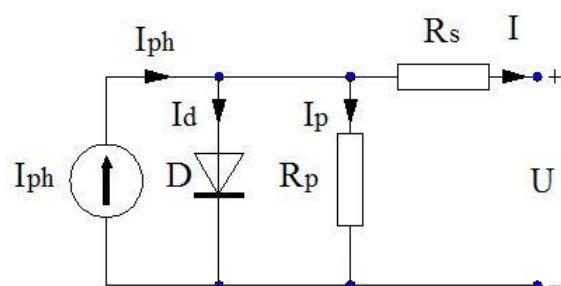


Figura 3.1 – Modelul simplă diodă al unei celule PV

Caracteristica tensiune-curent a unei diode este exprimată conform relației 3.1, unde curentul invers de saturatie I_s se situează în jurul valorii de $1 \cdot 10^{-11} A/cm^2$ [CAS. 02], și depinde de temperatura celulei după o lege exponentială.

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{e}{kT} U_d} - 1 \right] \quad (3.1)$$

Curentul produs de sursa I_{ph} depinde de intensitatea radiației solare, coeficientului de absorbție a lungimii de undă a radiației solare și de caracteristica de difuziune și de recombinare a electronilor în material conform relației 3.2 [EIC. 03]. O parte din acest curent străbate dioda D, acest fapt modelează fenomenul de recombinare purtătorilor de sarcină în interiorul celulei solare. Rezistența mică a muchiilor celulei solare conduce la o nouă pierdere de curent evidențiată prin existența unei rezistențe în paralel R_p în circuitul din figura 3.1, având o valoare mare în general ($R_p > 10\Omega$). Rezistența contactelor electrice și rezistența internă a celulei sunt reprezentate prin R_s de ordinul miliohmilor [LOR 94]. Aceste rezistențe au mici variații în funcționare, dar pentru simplificare le-am considerat constante de-a lungul studiului efectuat.

$$I_{ph} = I_{ph,STC} \frac{G}{G_{STC}} [1 + \alpha_1 (T_c - T_{c,STC})] \quad (3.2)$$

Prin aplicarea teoremelor lui Kirchhoff pentru circuitul din figura 3.1 se obține caracteristica tensiune-curent a unei celule fotovoltaice, după cum urmează:

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_d - I_p \\ U + U_s - U_d &= 0 \end{aligned} \Rightarrow I_p = \frac{U_d}{R_p} = \frac{U + IR_s}{R_p}$$

Înlocuind I_d și I_p cu expresiile lor se obține:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{nkT_c}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (3.3)$$

Modelul dublă diodă

Față de circuitul anterior, modelul dublă diodă ține cont de variația coeficientului de idealitate al diodei semiconductoare. Acesta este o funcție de tensiunea de la bornele celulei. La valori mari de tensiune, fenomenul de recombinare al purtătorilor de sarcină se realizează cu precădere în regiunile de suprafață și în regiunile de dopare, coeficientul de idealitate fiind aproape de valoarea unitară. La valori mici de tensiune, recombinarea are loc cu precădere în regiunea joncțiunii, iar coeficientul de idealitate se apropie de valoarea doi. Recombinarea în zona joncțiunii este modelată prin adăugarea unei diode în paralel cu prima, ca în figura 3.2 [CAL. 09-2]:

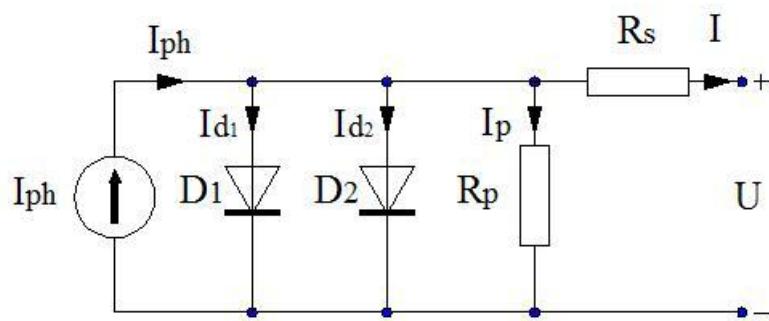


Figura 3.2 – Modelul dublă diodă al unei celule PV

Ecuatia 3.3 devine în acest caz:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{n_1 k T_c}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{n_2 k T_c}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (3.4)$$

Curenții de saturare pot fi determinați ținând cont de coeficienții de difuzie $C_1 = 150...180 \text{ A/K}^3$, $C_2 = (1,3...1,7) \cdot 10^{-2} \text{ A/K}^{-5/2}$ și de energia necesară electronilor pentru a trece din banda de valență în banda de conducție, notat E_{gap} .

$$I_{s1} = C_1 \cdot T_c^3 \cdot e^{-\frac{E_{gap}}{kT_c}} \quad \text{și} \quad I_{s2} = C_2 \cdot T_c^{\frac{5}{2}} \cdot e^{-\frac{E_{gap}}{2kT_c}} \quad (3.5)$$

2.2 Punctul maxim de putere

Puterea electrică livrată de o celulă fotovoltaică nu este suficientă pentru majoritatea aplicațiilor domestice sau industriale. Din acest motiv, celulele fotovoltaice se asociază în serie pentru a mări valoarea tensiunii la borne și astfel se realizează un panou (modul). Apoi, modulele se asociază fie în serie pentru creșterea și mai mult a tensiunii, fie în paralel pentru creșterea curentului prin circuit. Aceste asocieri serie-paralel formează câmpurile fotovoltaice.

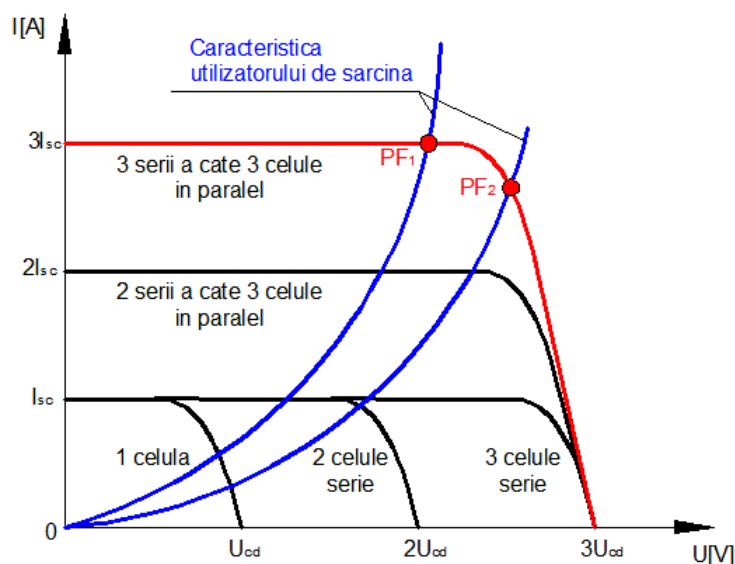


Figura 3.3 – Asocierea celulelor PV și punctul de funcționare

Caracteristica tensiune-curent ($U-I$) a unui modul fotovoltaic depinde în principal de intensitatea radiației solare și de temperatura celulelor. Astfel pentru diferiți parametri meteorologici există o caracteristică de funcționare a generatorului fotovoltaic. La intersecția caracteristicii $U-I$ cu caracteristica sarcinii de la bornele generatorului PV se găsește punctul de funcționare (PF) așa cum este reprezentat în figura 3.3. Acest punct diferă în general de punctul maxim de putere (MPP), la care sistemul poate funcționa, când între generator și sarcină se realizează transferul optim de putere. În consecință MPP depinde de condițiile de funcționare ale generatorului fotovoltaic, dar și de caracteristicile electrice ale sarcinii de la borne [CAL. 10-3], [CAL. 11]. Scopul sistemelor de urmărire a punctului maxim de putere (MPPT) este de a menține punctul de funcționare cât mai aproape de MPP. În figura 3.4 sunt prezentate două caracteristici $U-I$ ale aceluiași generator PV pentru două

valori diferite ale intensității radiației solare și ale temperaturii celulelor componente, cât și caracteristicile tensiune-putere aferente.

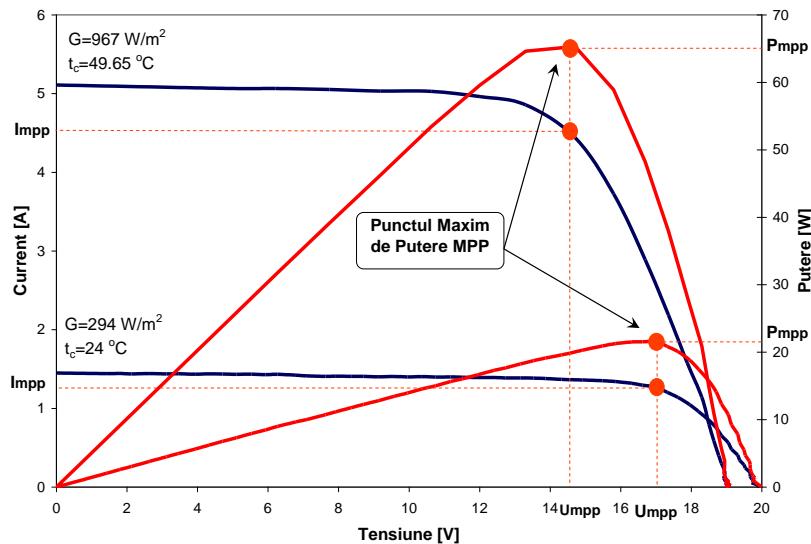


Figura 3.4 – Influența parametrilor meteo asupra caracteristicii U-I și punctul maxim de putere (MPP) [CAL. 11]

Un modul fotovoltaic funcționează în punctul maxim de putere dacă sunt îndeplinite simultan condițiile 3.6:

$$U_{pv} = U_{opt}; \quad I_{pv} = I_{opt}; \quad R_{pv} = R_s = \frac{U_{opt}}{I_{opt}} \quad (3.6)$$

Acest lucru nu se întâmplă în mod obișnuit datorită variațiilor parametrilor meteorologici și a parametrilor electrici de funcționare ai generatorului PV. De asemenea utilizatorul de sarcină nu respectă în cele mai multe cazuri condiția de adaptare $R_s = R_{opt}$. Pentru a realiza transferul maxim de putere dintre generatorul PV și receptor se interconectează un convertor DC-DC (figura 3.5):

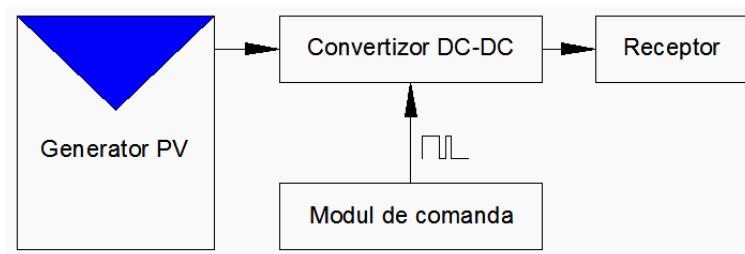


Figura 3.5 – Adaptarea utilizatorului de sarcină rezistiv la generatorul PV

Convertorul DC-DC realizează adaptarea continuă a sarcinii la generatorul PV, prin utilizarea unui semnal de comandă în impulsuri modulate. Semnalul este aplicat pe baza unui tranzistor MOSFET cu timp mic de comutație. Pentru aplicații ce necesită tensiuni mici se utilizează un convertor coborâtor de tensiune (buck – figura 3.6), iar pentru aplicații ce necesită tensiuni ridicate unul ridicător de tensiune (boost – figura 3.7).

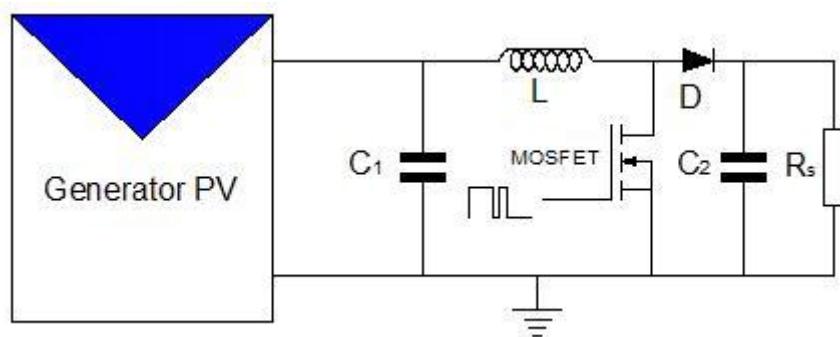


Figura 3.6 – Schema de principiu a unui convertor DC-DC tip Boost

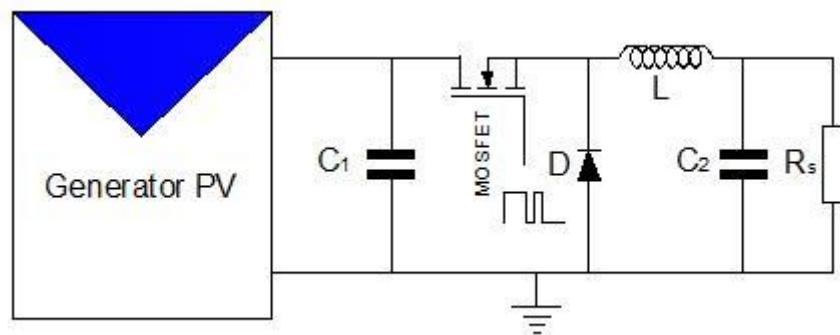


Figura 3.7 – Schema de principiu a unui convertor DC-DC tip Buck

La o frecvență stabilită, între 20kHz și 200kHz, factorul de umplere al semnalului de comandă al tranzistorului MOSFET este calculat în mai multe feluri, în funcție de algoritmul de urmărire a punctului maxim de putere. În regim staționar factorul de umplere depinde de rezistența de sarcină R_s și de rezistența optimă R_{opt} , în funcție de tipul convertorului. Pentru convertorul tip „Boost” este valabilă relația 3.7, iar pentru cel „Buck” relația 3.8 [AZI. 07]:

$$\alpha_{opt} = I - \sqrt{\frac{R_{opt}}{R_s}} \quad (3.7)$$

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{R_s}{R_{opt}}} \quad (3.8)$$

Există în literatură mai multe tipuri de algoritmi de urmărire a MPP, iar dintre cele mai utilizate se numără algoritmul P&O (Perturbe & Observe), metoda circuitului deschis și a scurt circuitului (Open and Short Circuit), algoritmul Conductanței Incrementală (Incremental Conductance) și altele [LIU. 04]. Cu toate că aceste metode sunt utilizate pe scară largă, ele prezintă dezavantaje ca răspuns lent la variații rapide ale intensității radiației solare, oscilații în jurul MPP sau chiar urmărire în direcția greșită.

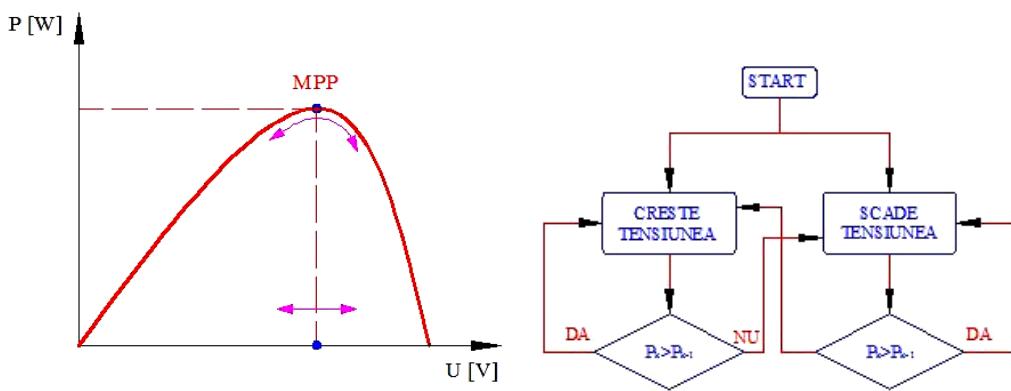


Figura 3.8 – Algoritmul MPPT Perturbe & Observe

În figura 3.8 am reprezentat algoritmul P&O și schema logică aferentă. Acest algoritm este foarte simplu și ușor de implementat. Modalitatea de a găsi MPP este prin încercări repetate, adică prin modificarea tensiunii la bornele generatorului și prin compararea puterii electrice livrate în acest caz cu puterea de la pasul anterior. Dacă puterea de la pasul prezent este mai mare se continuă modificarea sarcinii în același sens, iar dacă nu se modifică în sens invers. Această modalitate de a găsi MPP conduce la oscilații în jurul MPP, chiar și în condiții staționare de funcționare, iar în cazul unor variații brusăte ale intensității radiației solare poate conduce chiar la urmărirea MPP în direcția greșită [FEM. 04], [FEM. 05], [AMR. 07].

Un alt algoritm mai des utilizat în sistemele MPPT este „Incremental conductance”. Aceasta se bazează pe urmărirea valorii derivatei puterii în raport cu tensiunea, după cum am arătat în figura 3.9.

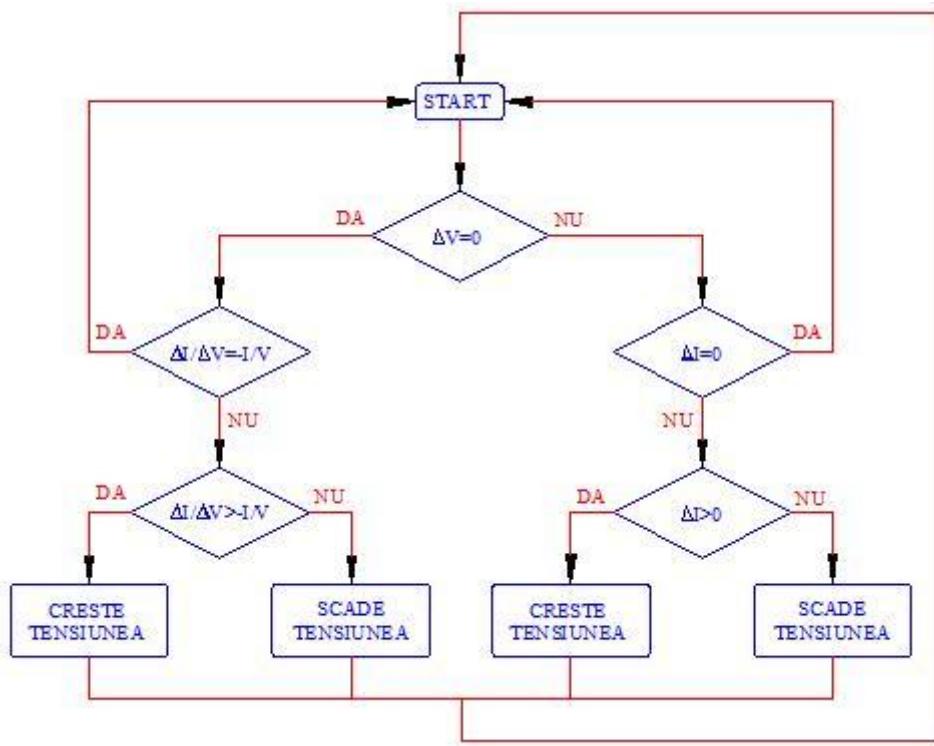


Figura 3.9 – Algoritmul MPPT „Incremental Conductance”

Spre deosebire de precedentul, acest algoritm nu prezintă oscilații în funcționare și nici posibilitatea de a greși direcția de urmărire a MPP, dar necesită resurse informative importante și poate influența frecvența curentului și a tensiunii alternative produse.

Cercetările în acest domeniu se orientează către două direcții și anume: fie optimizarea algoritmilor deja existenți, fie dezvoltarea de noi metode și algoritmi. În ceea ce privește prima alternativă se poate menționa lucrarea lui Taftich. Aceasta studiază un model MPPT bazat pe măsurarea tensiunii la bornele generatorului. Algoritmul combină o metodă neliniară cu algoritmul P&O. Rezultatele arată o creștere a eficienței de urmărire a MPP cu 17% [TAF. 08]. Îmbunătățirea algoritmului P&O a fost studiată și în lucrarea lui Hua [HUA. 03], prin modelarea funcției de transfer și utilizarea mai multor modele de semnal de comandă a MPPT.

Cea de a doua modalitate de eficientizare a sistemelor MPPT este crearea de noi algoritmi. În general aceștia se bazează pe utilizarea tehniciilor de inteligență artificială, mai cu seamă a rețelelor neuronale artificiale.

2.3 Utilizarea rețelelor neuronale artificiale în domeniul energiei solare și a conversiei fotovoltaice

Aplicațiile rețelelor neuronale sunt foarte variate, dar predicția și controlul proceselor este una dintre cele mai elaborate și împreună cu algoritmii genetici pot estima starea viitoare a unui proces, cum ar fi cel de producere a energiei electrice utilizând panouri fotovoltaice.

Dezavantajul modelelor analitice (simplă și dublă diodă) este că acestea necesită metode numerice pentru rezolvarea ecuațiilor implicate, având nevoie de timp și spațiu suficient de memorie. Odată cu evoluția calculatoarelor și al domeniului informatic în general, această problemă a devenit mult mai ușor de rezolvat. Totuși tehniciile de inteligență artificială reprezintă o alternativă.

Rețelele neuronale pot fi învățate din exemple, tolerând defectele în sensul că pot trata seturi de date incomplete sau semnale având o componentă importantă de zgomot, pot rezolva probleme de neliniaritate și odată antrenate pot face predicții și generalizări la o viteză mare de calcul. Au fost utilizate cu succes în diverse aplicații de control al sistemelor, robotică, recunoașterea formelor, medicină, prognoze meteorologice, sisteme energetice, probleme de optimizare, procesarea semnalelor, științe socio-umane etc. O aplicație importantă se regăsește în modelarea și identificarea sistemelor [DUM. 99].

Erorile, raportate de studiile de specialitate din acest domeniu, se găsesc între limite mai mult decât acceptabile, având valori foarte mici, ceea ce sugerează foarte clar posibilitatea utilizării rețelelor neuronale în modelarea sistemelor de producție și de consum a energiei electrice. Rezultate remarcabile pot fi notate și în alte domenii științifice [DUM. 99].

În acest context am avut ca scop principal realizarea un model care să poată caracteriza, cât mai fidel cu putință și utilizând resurse de calcul cât mai mici, funcționarea panourilor fotovoltaice, în diferite condiții meteorologice. Crearea unui astfel de model a condus la optimizarea algoritmilor de urmărire a punctului maxim de putere și a fost implementat cu succes pe un sistem MPPT cu microprocesor.

2.3.1 Construcția și funcționarea rețelelor neuronale statice

Cu toate că primul neuron artificial a fost realizat încă din anii '40 și cercetările au fost pur matematice, în ultimele două decenii se remarcă o creștere a interesului față de acest domeniu, sub aspect teoretic, dar mai ales sub aspect practic, al implementării sale în diverse aplicații [FIL. 02]. Modelele neuronale reprezintă o soluție pe o plajă largă de probleme, pentru a căror rezolvare modelele clasice nu au condus către rezultatele dorite.

Rețele neuronale artificiale fac parte din aria modelelor conecționiste, fiind realizate din unități de procesare paralelă, numite neuroni. Acestea reprezintă modele simplificate ale sistemului nervos biologic. Calculele neuronale se efectuează pe o rețea compusă din neuroni interconectați, având două caracteristici fundamentale: arhitectura și comportarea în timp (dinamica). O altă diferență importantă între modelele neuronale o face tipul de algoritm de învățare, care stabilește când și în ce manieră se modifică ponderile conexiunilor sinaptice. În fine, rețelele diferă prin viteza și eficiența de învățare.

Neuronii, organizați pe nivele ierarhice, pot funcționa ca sumatoare sau comparatoare și permit conexiuni de tip feedback, fie între nodurile aceluiasi strat, fie între straturi [DUM. 99].

Prima regulă de învățare propusă a fost cel a lui Hebb (1949) și arată modalitatea de modificare continuă a ponderilor conexiunilor neuronale pe parcursul acestui proces [DUM. 99].

Rosenblatt, în anul 1958, propune modelul neuronal numit „perceptron”, format dintr-un singur strat de neuroni de tip McCulloch-Pitts, care poate să clasifice în mulțimi anumite tipare similare sau distințe. Legăturile sinaptice sunt modificate prin minimizarea erorii dintre rezultatele date de rețea și valorile dorite. La scurt timp Widrow și Hoff propun rețeaua „ADALINE” care diferă de perceptron doar din punct de vedere a legii de învățare.

Cel mai utilizat algoritm de învățare este „algoritmul backpropagation”, propus de Hopfield în 1984. Termenul de backpropagation provine din faptul că derivata erorii este propagată în sens invers legăturilor sinaptice. Cu toate că este cel mai

popular algoritm, este și cel mai puțin plauzibil din punct de vedere biologic, datorită faptului că nu există nici o dovadă că informația poate circula în sens opus legăturii sinaptice sau că neuronii pot propaga derivata erorii [BAL. 95].

Aplicațiile rețelelor neuronale multistrat cu propagarea inversă a erorii sunt dintre cele mai diverse:

- clasificare și diagnoză;
- predicție și prognoză;
- conducere și optimizare;
- recunoaștere de caracter, vorbire, imagini etc.

Perceptronul

Primele studii făcute asupra creierului uman au condus către realizarea primului model matematic al unui neuron, cel al lui McCulloch și Pitts (figura 3.10), în anul 1943. Un astfel de neuron este compus, după modelul celui biologic, din intrări ponderate, prag de activare și o ieșire, corespunzătoare axonilor, corpului neuronului (soma) și respectiv, dendritelor [HAY. 99].

Ieșirea y va avea valoarea logică „0” sau valoarea logică „1” în funcție de suma intrărilor ponderate:

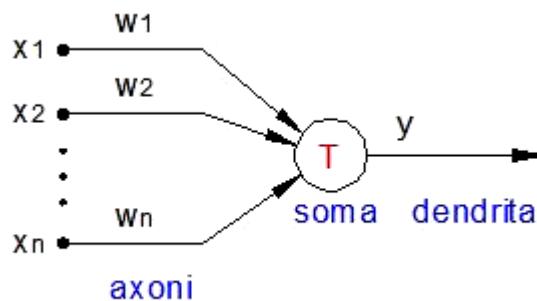


Figura 3.10 – Neuronul McCulloch-Pitts (1943)

$$y = T(\text{net}) = \begin{cases} 1 & \rightarrow \text{net} > I \\ 0 & \rightarrow \text{net} < I \end{cases} \quad \text{unde,} \quad \text{net} = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (3.9)$$

$w_i = 1 \Rightarrow$ sinapsă excitatoare

$w_i = -1 \Rightarrow$ sinapsă inhibitoare.

Cu o funcționare extrem de simplă, acest model are o remarcabilă importanță istorică prin faptul că poate realiza funcțiile logice NOT, OR, AND, NOR, NAND etc. De asemenea, întârzierea, cu durată de o unitate, permite construirea circuitelor digitale secvențiale. Cu o expresie matematică precisă, neuronul McCulloch-Pitts are ca ieșiri doar stări binare, presupunând discretizarea timpului și sincronismul operațiilor. Totodată ponderile conexiunilor sinaptice și pragurile sunt fixe, neexistând în acest caz o regulă de învățare [FIL. 02].

Prin generalizarea modelului neuronal McCulloch-Pitts se obțin modele mai elaborate numite perceptri, ce permit operații mai complexe. Aceștia sunt compuși dintr-o unitate de procesare, mai multe intrări ponderate și o singură ieșire ca în figura 3.11.

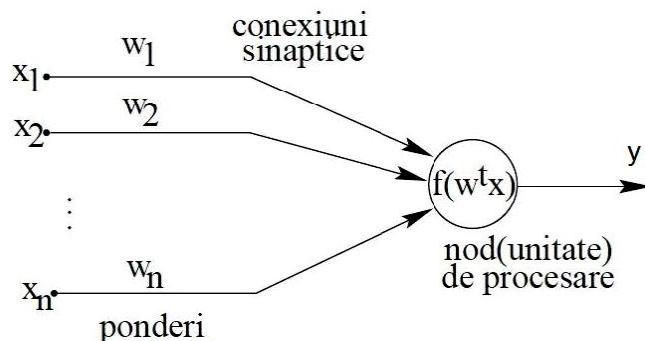


Figura 3.11 – Modelul general al unui perceptron [FIL. 02]

În acest caz, ieșirea neuronului se poate scrie sub forma următoare:

$$y = f(W^T X) \quad (3.10)$$

unde, W reprezintă matricea ponderilor: $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$, X reprezintă matricea valorilor de intrare, iar f funcția de activare. Variabila *net* este asemănătoare potențialului membranei neuronului biologic [DUM. 99].

Functii de activare

Functiile de activare utilizate în modelele conexioniste sunt variate. Se pot utiliza chiar mai multe tipuri de functii în cadrul aceleiași rețele, în funcție de rolul neuronului. Aceste functii se pot clasifica după mai multe criterii:

- După continuitate, functiile pot fi *cu valori continue sau discrete*. Multe modele utilizează funcții cu două valori {0,1} sau {-1,1} sau cu un număr redus de valori. Modelele actuale sunt însă în majoritate dotate cu funcții continue de activare, care permit simultan tratarea mai multor informații de către un singur neuron, ceea ce conduce la rețele mai puternice.
- În funcție de gradul de determinare, functiile pot fi *deterministe sau stohastice*. În acest ultim caz, răspunsul la o intrare dată nu este unic, ci este distribuit după o curbă de probabilitate dată, comportare ce se apropie mai mult de cea a neuronilor biologici. În afară de o mai mare asemănare cu funcționarea creierului uman, variabilitatea unei funcții stohastice are o serie de alte efecte pozitive asupra calculelor efectuate de ansamblul rețelei.
- După cum functiile au sau nu posibilitatea de a lua în considerare valorile anterioare, se poate spune ca functiile de activare sunt *cu sau fără memorie*.

Functia liniară (figura 3.12) este cea mai simplă funcție de activare. Simplitatea ei se traduce prin limitarea capacitatii de calcul a rețelei.

$$y_i = \lambda \cdot net_i \quad (3.11)$$

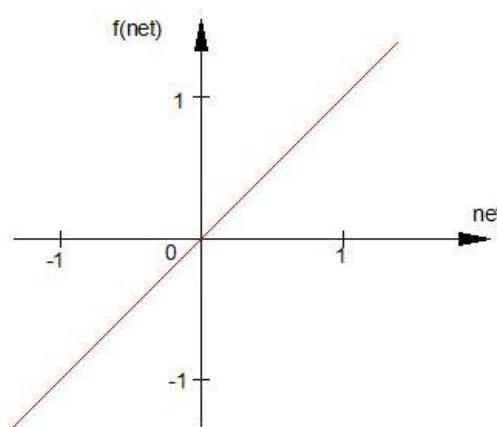


Figura 3.12 – Funcția liniară ($\lambda=1$)

Expresiile generale ale funcțiilor de activare cel mai des utilizate sunt:

$$\text{funcție de activare bipolară: } f(\text{net}) = \frac{2}{1 + e^{-\lambda \cdot \text{net}}} - 1, \lambda > 0 \quad (3.12)$$

$$\text{funcție de activare unipolară: } f(\text{net}) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda \cdot \text{net}}}, \lambda > 0 \quad (3.13)$$

Graficele aferente celor două tipuri de funcții de activare, în funcție de valoarea parametrului λ , sunt prezentate în figura 3.13. Cele două tipuri de funcții continue se numesc caracteristici sigmoidale [DUM. 99].

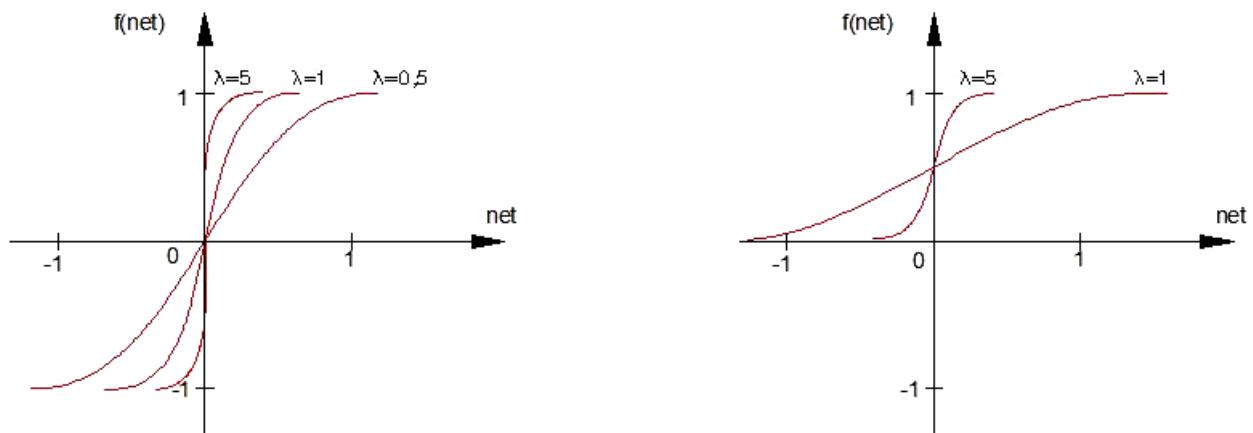


Figura 3.13 – Funcții de activare continuă bipolară și unipolară

Se poate observa că dacă parametrul $\lambda \rightarrow \infty$ cele două funcții continue devin discrete. Figura 3.14 reprezintă graficele acestora, iar relațiile 3.14 și 3.15 expresia lor matematică, după cum urmează:

- **funcție bipolară binară:** $f(\text{net}) = \begin{cases} 1, & \text{net} > 0 \\ -1, & \text{net} \leq 0 \end{cases}$ (3.14)

- **funcție unipolară binară:** $f(\text{net}) = \begin{cases} 1, & \text{net} > 0 \\ 0, & \text{net} \leq 0 \end{cases}$ (3.15)

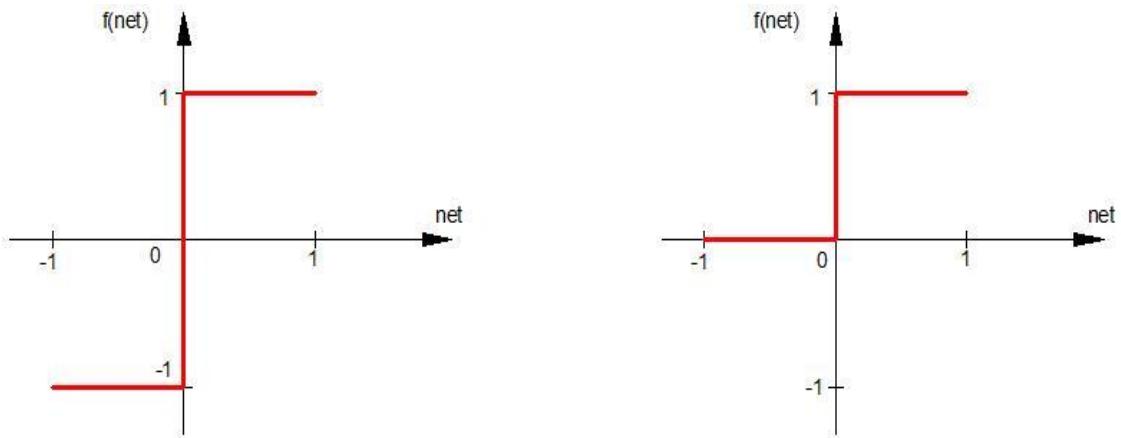


Figura 3.14 – Funcții de activare discrete bipolară și unipolară

Funcția Gauss este dată de formula:

$$y_i = e^{-\frac{net_i^2}{2\sigma^2}} \quad (3.16)$$

Ea este utilizată în rețelele tip RBF (Radial Basis Function) unde fiecare neuron este conceput astfel încât să răspundă de preferință unui ansamblu de valori, denumit "vector prototip". Funcția de activare tip Gauss (figura 3.15) este folosită împreună cu o funcție de ponderare specială (relația 3.17). În acest model, activarea ponderată este funcție de diferență dintre activarea primită de un neuron pe o anumită legătură și ponderea acestei legături.

$$net_i^t = \sqrt{\sum_{j \in N} (w_{i,j} - y_i^t)^2} \quad (3.17)$$

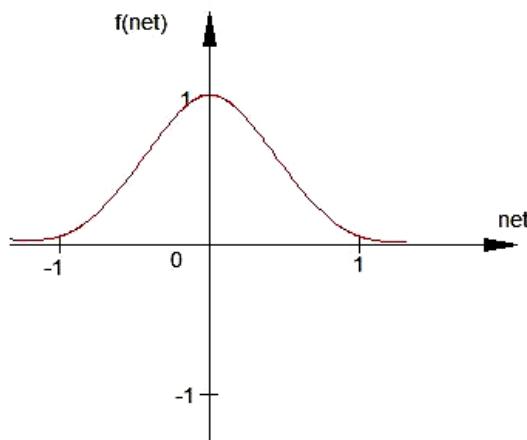


Figura 3.15 - Funcția Gauss

Astfel, prin generalizarea modelului neuronal McCulloch-Pitts se obține modelul unui perceptron. Perceptronul poate fi continuu sau discret, după cum funcția sa de activare este continuă sau discretă, fiind prima mașină instruibilă. Prin învățare se înțelege un algoritm care modifică ponderile conexiunilor sinaptice astfel încât ieșirea dată de neuron sau de rețeaua neuronală să fie cât mai apropiată de cea dorită.

Perceptronul este o mașină care poate să învețe să clasifice anumite tipare. În cazul în care clasele sunt liniar separabile, se determină un vector de ponderi W , printr-un număr finit de iterări, astfel încât operația de clasificare să se realizeze fără erori. În cazul în care clasele nu sunt liniar separabile algoritmul are un comportament oscilant.

Algoritmul de învățare al perceptronului

La om și la animale procesul de învățare nu poate fi observat direct, presupunând schimbarea comportamentului datorită experienței. În cazul rețelelor neuronale artificiale, procesul de învățare poate fi studiat pas cu pas și presupune o relație de tipul *cauză-efect*. Acest proces este dat de teoria aproximării, adică aproximarea unei funcții continue de mai multe variabile $h(x)$ printr-o altă funcție $H(W,X)$, unde X este vectorul de intrare și W este matricea ponderilor sinaptice (a parametrilor rețelei).

Prin procesul de învățare se înțelege găsirea valorilor componente ale matricei W , având la dispoziție suficiente exemple folosite pentru învățare, astfel încât să se obțină cea mai bună aproximare a funcției $h(X)$. Legea generală a învățării pentru rețelele neuronale artificiale este de tipul:

$$\rho[H(W^*, X), h(X)] \leq \rho[H(W, X), h(X)] \quad (3.18)$$

ρ reprezentând o metrică (eroarea între funcția originală și cea aproximată) [FAU. 94].

În sensul celor precizate anterior, algoritmul de învățare al perceptronului, primul de acest fel, dezvoltat de Rosenblatt, face parte din metodele de învățare supervizată și se prezintă sub forma următoare:

Pasul 0 – Se dau datele de intrare :

- vectorul de intrare $\{x(p) \in \Re^n\}_{p=1}^m$;
- vectorul de ieșiri dorite $\{d^p\}$, $p = 1, \dots, m$.

Pasul 1 – Se inițializează valorile ponderilor matricei W cu valori mici aleatoare.

Pasul 2 – Se repetă:

- citește o nouă intrare $\underline{x}^p = [x_1(p), \dots, x_n(p)]$ și ieșirea corespunzătoare d^p ;
 - calculează ieșirea curentă a rețelei $y^p = f(W^T \underline{x}^p)$
 - actualizează ponderile $W^{nou} = W^{vechi} + \Delta w_i$,
- cu $\Delta w_i = c(t^p - y^p)x_i^p$, $i=1, \dots, n$ [LIP. 87].

Rețele statice de tip perceptron multistrat

Prin asocierea mai multor perceptriuni se realizează rețele neuronale statice (feed-forward), având un strat de intrare, unul de ieșire și unul sau mai multe straturi intermediare de neuroni, numite straturi ascunse. Din acest motiv acest tip de rețea se mai numește și rețea multistrat, fiind astfel mai complexă decât perceptronii simpli și având, în consecință, o capacitate de aproximare mult mai importantă. Această arhitectură, împreună cu algoritmul backpropagation (propagarea inversă a erorii) sunt cele mai utilizate în diverse aplicații, inclusiv în modelarea diferitelor fenomene și diferenților parametrii ce intervin în funcționarea panourilor fotovoltaice.

Capacitatea de aproximare mult mai mare se datorează în principal utilizării funcțiilor de activare neliniare ale nodurilor și nu în mod special unui anumit număr de neuroni în straturile ascunse. Aceasta se alege în funcție de experiență astfel încât erorile rezultatelor date de rețea să fie cât mai mici.

Un exemplu de configurație de rețea tip perceptron multistrat este dat în figura 3.16. Această rețea este formată dintr-un strat de intrare compus din trei neuroni (fiecare neuron corespunde unui parametru de intrare), un strat ascuns format din patru neuroni și un strat de ieșire format din doi neuroni (asemănător stratului de intrare, fiecare neuron corespunde unui parametru de ieșire).

Straturile ascunse primesc informații de la alte unități de procesare interne și produc ieșiri tot interne rețelei respective. Din acest motiv aceste straturi se numesc ascunse, deoarece ele sunt izolate față de exteriorul rețelei [DUM. 99].

Informația se procesează în nodurile rețelei, iar rezultatul dat de un nod se propagă ulterior către toate nodurile din stratul următor.

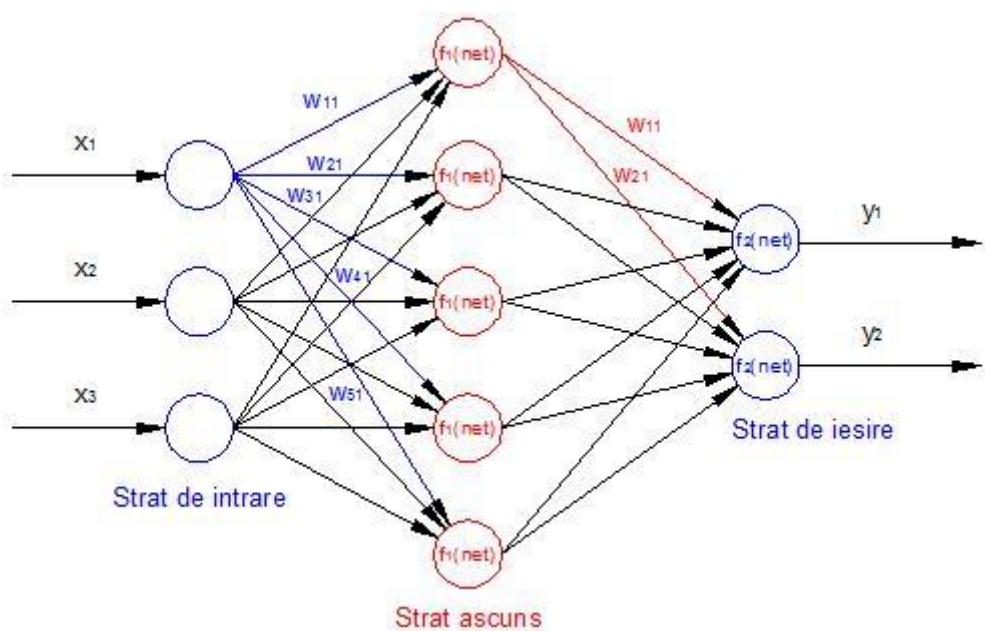


Figura 3.16 – Rețea neuronală perceptron multistrat

Ca metodă de învățare pentru această arhitectură de rețea se folosește în general algoritmul backpropagation (cu propagarea inversă a erorii). Acesta poate fi utilizat pentru orice rețea multistrat cu funcții de activare diferențiable, fiind o metodă de antrenare supervizată bazată pe metoda gradientului descendente ce ajustează ponderile în vederea reducerii erorii [DUM. 99].

Fiecare set de date este propagat înainte, strat cu strat, până la calcularea ieșirii rețelei. Se calculează eroarea dintre ieșirea dată de rețea și valoarea dorită, iar apoi aceasta este propagată înapoi pentru ajustarea ponderilor conexiunilor sinaptice. Legăturile înapoi sunt utilizate doar la antrenare, în schimb conexiunile rețelei (înainte) sunt utilizate atât la învățare, cât și la faza de operare [VIN. 07]. Regula generală de învățare se poate exprima astfel:

$$\Delta w_i(t) = c \cdot r \cdot [w_i(t), x(t), d_i(t)] \cdot x(t) \quad (3.19)$$

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \Delta w_i(t) \quad (3.20)$$

Diferența dintre diversele reguli de învățare supervizată este dată de modul diferit de calcul al funcției de învățare. Algoritmul de propagare inversă a erorii este prezentat în figura 3.17.

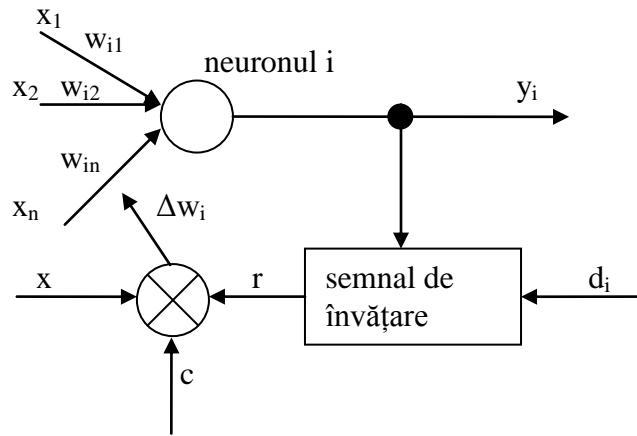


Fig. 3.17 – Modelul de instruire pentru învățare supervizată

Reguli de învățare:

- regula de antrenare a perceptronului

$$r = d_i - y_i; \quad y_i = \text{sgn}(w_i^t x); \quad \Delta w_i = c[d_i - \text{sgn}(w_i^t x)]x \quad (3.21)$$

- regula de învățare Windrow-Hoff

$$r = d_i - w_i^t x; \quad \Delta w_i = c(d_i - w_i^t x)x \quad (3.22)$$

- regula de învățare delta

$$r = [d_i - f(w_i^t x)]f'(w_i^t x); \quad \Delta w_i = c[d_i - f(w_i^t x)]f'(w_i^t x)x \quad (3.23)$$

Regula delta se obține din minimizarea erorii pătratice medii dintre vectorul de intrări x_i și vectorul de ieșiri y_i :

$$E = \frac{1}{2} [d_i - f(w_i^t x)]^2 \Rightarrow \nabla E = -(d_i - y_i)f'(w_i^t x)x$$

Se alege în această situație variația vectorului ponderilor astfel încât să se micșoreze eroarea E, adică o variație proporțională cu gradientul erorii:

$$\Delta w_i = -\eta \nabla E \quad (3.24)$$

unde η este o constantă arbitrară.

Regula de învățare delta este de fapt transpunerea regulii de învățare a perceptronului discret pentru cazul perceptronului continuu și face parte din clasa „**algoritmi ai gradientului conjugat**” [AND. 93]. Acest algoritm presupune începerea căutării în direcția negativă a gradientului, la prima iterare. Această operație presupune spațiu mare de memorie, iar pentru a reduce acest inconvenient s-a utilizat modelul regiunii de încredere cu metoda gradientului conjugat. Metoda presupune următoarele operații:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i p_i \quad (3.25)$$

unde $p_i = -g_i + \beta_i p_{i-1}$, iar factorul $\beta_i = \frac{g_i^T g_i}{g_{i-1}^T g_{i-1}}$.

Algoritmi de antrenare optimizați pentru rețelele statice

După cum se poate observa algoritmul de antrenare cu propagarea inversă a erorii poate fi implementat prin mai multe metode în funcție de modalitatea de calcul a erorii. Pornind de la forma generală de învățare (3.20) algoritmii optimizați de antrenare pentru rețelele multistrat de tip feed-forward, calculează corecția ponderilor rețelei într-un mod diferit, reprezentând o alternativă la algoritmii gradientului conjugat.

a) Metoda lui Newton

Pasul de bază pentru această metodă este:

$$w_i(t+1) = w_i(t) - H_i^{-1} g_i \quad (3.26)$$

unde, H^{-1} reprezintă matricea Hessiană (a derivatelor de ordinul doi ale funcției de performanță) și g_i reprezintă gradientul erorii.

Această metodă prezintă adesea o convergență rapidă, însă presupune o putere de calcul ridicată și spațiu mare de memorie. Pentru a nu calcula matricea Hessiană se poate face o aproximare a acesteia pornind de la gradientul erorii. Aceste metode simplificate se numesc cvasi-newton sau metode ale secantei [DEM. 10].

b) Metoda Levenberg-Marquardt

Ca și metodele cvasi-newton, algoritmul Levenberg-Marquardt a fost creat pentru a optimiza antrenarea rețelelor neuronale artificiale. Această metodă evită calculul matricei Hessiene, aproximând-o după cum urmează:

$$H = J^T J \quad (3.27)$$

unde, J reprezintă matricea Jacobiană ce conține derivatele de ordinul întâi al funcției erorii rețelei neuronale. În acest caz gradientul este calculat:

$$g = J^T E \quad (3.28)$$

Tinând cont de relațiile (3.26), (3.27) și (3.28) se poate calcula pasul acestei metode de antrenare ca fiind:

$$w_i(t+1) = w_i(t) - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T E \quad (3.29)$$

- dacă scalarul $\mu=0$ atunci această metodă este metoda Newton cu aproximarea matricei Hessiene;
- dacă scalarul $\mu \neq 0$ atunci această metodă devine o metodă a gradientului descendente cu un pas mic de calcul.

Deoarece metoda Newton este mai rapidă și mai exactă, dar necesită un spațiu de memorie mai important, ținta va fi să se treacă de la metoda gradientului descendente către metoda Newton. În acest sens se pornește cu o valoare μ ce va fi

micșorată la fiecare pas calculat. Creșterea acestei valori se va face doar în cazul în care se constată o creștere a erorii rețelei.

O altă metodă de reducere a spațiului de memorie necesar este calculul matricei Jacobiene, care are dimensiunile $Q \times n$ (Q fiind numărul seturilor de antrenare, iar n numărul de ponderi), ca două sub-matrice egale și apoi aproximarea matricei Hessiene utilizând relația (3.30).

$$H = J^T J = \begin{bmatrix} J_1^T & J_2^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} = J_1^T J_1 + J_2^T J_2 \quad (3.30)$$

Astfel matricea Jacobiană nu va trebui să existe la un moment dat integral în memoria calculatorul, iar pe măsură ce sunt calculați termenii, sub-matricea Jacobiană corespunzătoare poate fi ștearsă. În acest fel se poate optimiza antrenarea unei rețele neuronale statice, de tip perceptron multistrat feed-forward [DEM. 10].

Descrierea metodei de antrenare Levenberg-Marquardt este dată în [HAG. 94], fiind la ora actuală cea mai utilizată, cea mai rapidă și cea mai eficientă metodă de antrenare a rețelelor neurale. De asemenea poate fi implementată cu ușurință în mediul MATLAB Neural Network Toolbox.

2.3.2 Modele de rețele neuronale aplicate panourilor fotovoltaice

Aplicațiile rețelelor neuronale artificiale (RNA) în domeniul sistemelor energetice regenerabile sunt dintre cele mai diverse: modelarea unui generator solar de abur, sisteme solare pentru încălzirea apei, sisteme HVAC, predicția radiației solare și a vitezei vântului, modelarea funcționării celulelor fotovoltaice, algoritmi de urmărire a MPP etc. [KAL. 00].

În cazul panourilor fotovoltaice, predicția parametrilor se referă la date meteorologice - intensitatea radiației solare și transmitanța atmosferică (indicele de claritate) - necesare la proiectarea acestor instalații sau la variabile interne ale sistemului cum ar fi tensiunea electrică, curentul ce străbate circuitul, rezistențele interne ale panoului etc.

În acest sens, se pot menționa lucrările lui Negnevitsky și Lee [NEG. 95] care au aplicat RNA pentru predicția radiației solare orare, Alawi și Hinai [ALA. 98] care au încercat să realizeze predicția radiației solare globale. Printre cele mai recente lucrări se numără Sfetsos și Coonick [SFE. 01], dar și Sozen [SOZ. 95] care au utilizat RNA pentru predicția potențialului solar al Turciei.

Potențialul energiei solare al Nigeriei a fost modelat cu succes în lucrarea lui Fadare D.A. [FAD. 09] care a folosit RNA în vederea obținerii unor hărți lunare ale radiației solare. Eseuștudiului s-a bazat pe investigarea utilizării rețelelor neuronale artificiale pentru a modela relațiile neliniare dintre intensitatea radiației solare și alți parametri meteorologici. Astfel modelul obținut poate fi utilizat pentru predicția intensității radiației solare lunare în locații din Nigeria unde nu există date înregistrate de stații meteorologice. Rezultatele predicției sunt date sub forma unor hărți lunare din ianuarie până în decembrie.

Modelul constă într-o RNA multistrat cu propagarea în urmă a erorii. Parametrii de intrare sunt: latitudine, longitudine, altitudine, lună, temperatură medie, durata media a însoririi zilnice, umiditatea relativă a aerului, iar parametrul de ieșire este radiația solară.

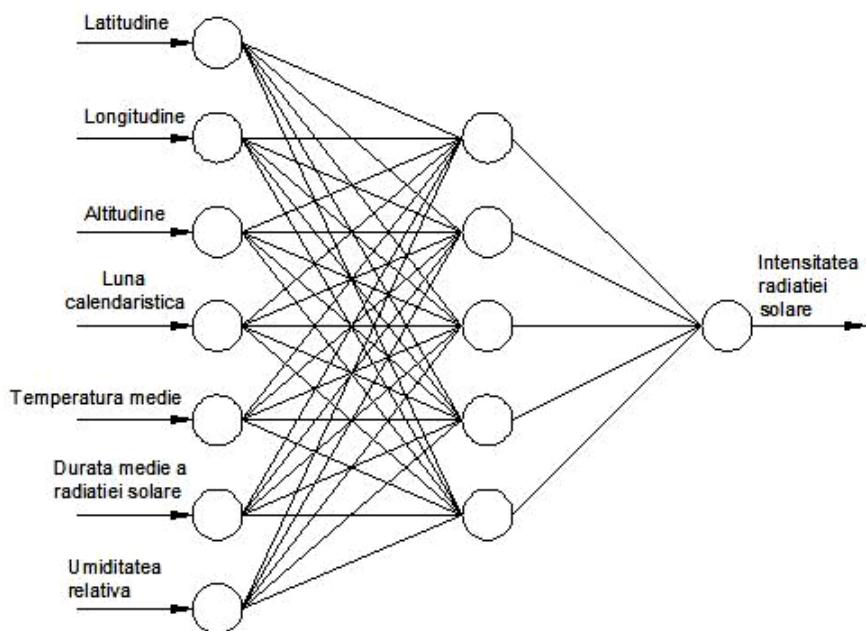


Figura 3.18 – Model de rețea neuronală utilizată la prediciția potențialului solar

Validarea modelului a fost făcută utilizând seturi de date intrare-ieșire deja cunoscute. Rezultatele confirmă posibilitatea utilizării rețelelor neuronale artificiale în scopul predicției potențialului solar în locații unde nu există date meteorologice și acuratețea unui astfel de model. Obținerea unor astfel de date este necesară la proiectarea și dimensionarea aplicațiilor solare.

În lucrarea lui Hontoria [HON. 06] este dezvoltat un nou model bazat pe RNA pentru a genera serii ale intensității radiației solare orare. Modelul se bazează pe capacitatea perceptronului multistrat de a aproxima orice funcție continuă. A fost dovedit faptul că este suficientă utilizarea unui perceptron cu un singur strat ascuns, un anumit număr de neuroni și o procedură adecvată de antrenare. În aceeași lucrare este dezvoltat și un model utilizat pentru obținerea curbelor U-I în condiții standard ale oricărui panou fotovoltaic. Se pornește de la ipoteza că tensiunea electrică produsă de panou este o funcție de curent, temperatură ambiantă și intensitatea radiației solare:

$$V = f(I, T_{amb}, G) \quad (3.31)$$

Astfel problema obținerii curbei U-I în condiții standard se reduce la calcularea funcției f . Un model neuronal poate aproxima această funcție utilizând date deja cunoscute. Procedura de predicție se rezumă astfel la crearea și antrenarea unei rețele de tip perceptron multistrat pentru a obține o posibilă formă a funcției f . În acest fel perceptronul va putea găsi relația dintre datele de intrare și cele de ieșire (deja existente) prin aproximarea funcției ce le leagă. Odată ce funcția a fost găsită, valori viitoare vor putea fi calculate.

Modelul neuronal este compus din stratul de intrare, un strat ascuns cu 3 neuroni și stratul de ieșire (figura 3.19), fiind antrenat pentru conversia curbelor obținute în condiții oarecare în condiții standard:

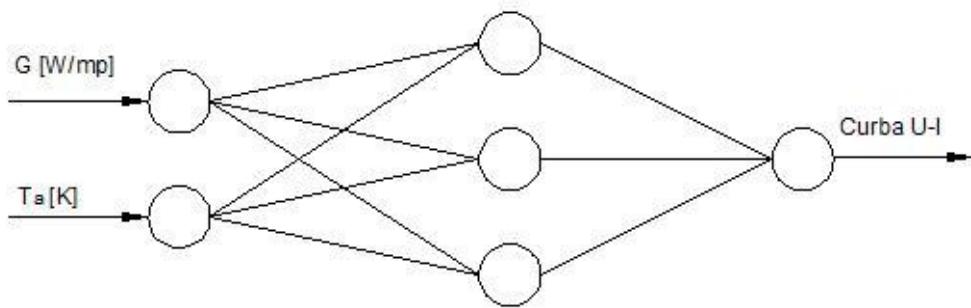


Figura 3.19 – Model neuronal pentru conversia curbelor U-I [HON. 06]

Rezultatele obținute au fost validate folosind seturi de date cunoscute și seturi de date obținute din model, utilizând teste statistice ca eroarea pătratică medie.

Rețelele neuronale artificiale au fost utilizate și pentru determinarea parametrilor circuitului echivalent al unei celule fotovoltaice [KAR. 06]. Având în vedere faptul că aceștia depind în principal de intensitatea radiației solare și de temperatura celulelor, studiul s-a făcut utilizând un model de rețea neuronală și un set de curbe curent-tensiune măsurate.

Pentru a construi rețeaua neuronală s-a plecat de la ideea că aceasta trebuie să fie cât mai mică cu puțință, cu condiția să poată îndeplini scopul pentru care a fost creată. S-a constatat pe cale experimentală că o structură neuronală cât mai mică este optimă atât din punct de vedere practic, cât și din punct de vedere teoretic [KAR. 06].

O problemă o constituie și faptul că structurile de perceptri multistrat de tip "feed-forward" nu pot fi construite decât din experiență, fără să existe o formulă validată pentru diferite situații [REE. 93], [GHO. 95], [ZUR. 92], [CRY. 04].

Configurația propusă este prezentată în figura 3.20. Modelul se compune din două părți principale: rețeaua neuronală utilizată pentru predicția celor cinci parametrii ai circuitului electric și circuitul echivalent simplă diodă al unei celule fotovoltaice. Rezultatul calculului este reprezentat de curentul și de tensiunea produse de respectiva celulă fotovoltaică, în condițiile de temperatură și intensitatea radiației solare date [KAR. 06].

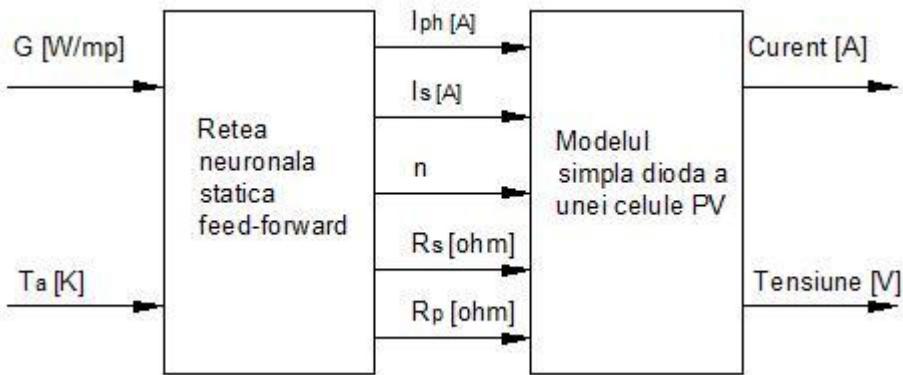


Figura 3.20 – Modelul propus pentru estimarea parametrilor electrici ai schemei simplă diodă [KAR. 06]

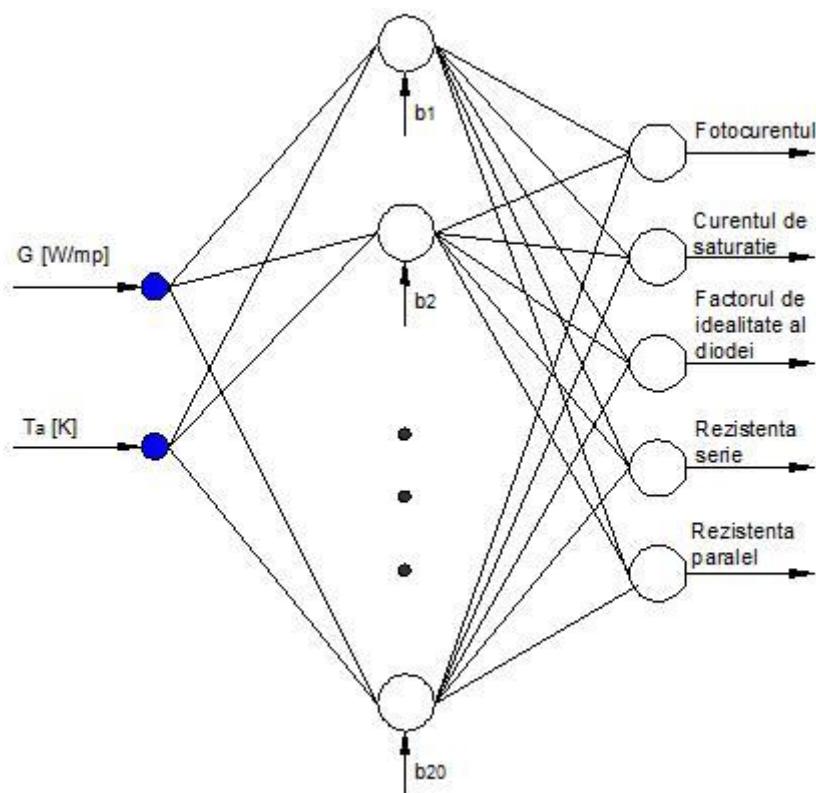


Figura 3.21 – RNA pentru predicția parametrilor circuitului simplă diodă

Rețeaua neuronală modelată este prezentată în figura 3.21 și a fost obținută pe cale empirică. Cele două noduri de intrare corespund intensității radiației solare, respectiv temperaturii ambiante, iar nodurile de ieșire sunt corespunzătoare celor

cinci parametrii necesari rezolvării circuitului electric. Stratul ascuns este compus din douăzeci de neuroni și poate estima cel mai exact [KAR. 06] valorile dorite.

Modelul a fost validat pentru două tipuri de module fotovoltaice, SM-55, respectiv, OST-80, prin compararea rezultatelor cu valori calculate printr-o metodă clasică și cu valori măsurate. Deși rezultatele obținute sunt foarte bune, modelul rămâne unul complicat pentru a fi implementat în sisteme cu microcontroler.

O concluzie importantă este aceea că rezistențele paralel și serie sunt influențate de parametrii meteorologici, din acest motiv modelul clasic este simplificat. Acest fapt este cu atât mai important cu cât o parte din celulă se află la umbră. [SHA.91], [HER. 00] În acest sens parametrii modelului echivalent simplă diodă sau dublă diodă trebuie determinați pentru toate condițiile de operare, lucru destul de dificil în cazul folosirii metodelor analitice.

Saadi și Moussi au studiat un tip de rețea neuronală pentru un sistem fotovoltaic de pompare a apei. Controlul debitului de apă este realizat în buclă, considerând mai multe relații între înălțimea de pompare, debit și intensitatea radiației solare, la o aceeași temperatură a celulelor fotovoltaice [SAA. 03]. Dezavantajul principal al acestui model este că nu poate fi aplicat decât unor sisteme similare, având o arie restrânsă de utilizabilitate.

În lucrarea sa, Bahgat propune un tip de controler MPPT bazat pe un model de rețea neuronală. Aceasta calculează caracteristicile semnalului de control al MPPT. Sistemul este complex și necesită utilizarea unui PC. De asemenea, algoritmul MPPT necesită resurse informaticе importante, dar totodată s-a obținut o creștere a cantității de energie furnizată de 45,2% [BAH. 05]. În figura 3.22 este prezentat schematic sistemul propus. Rețeaua neuronală primește informațiile privitoare la intensitatea radiației solare și la temperatura modulului de la sistemul de achiziție de date și calculează semnalul de comandă pentru circuitul MPPT.

Acest sistem MPPT a fost implementat și testat pentru un panou cu celule în film subțire, având o putere maximă de 65 W în condiții standard, instalat în Egipt, la Departamentul pentru Energie Solară a Centrului Național de Cercetare.

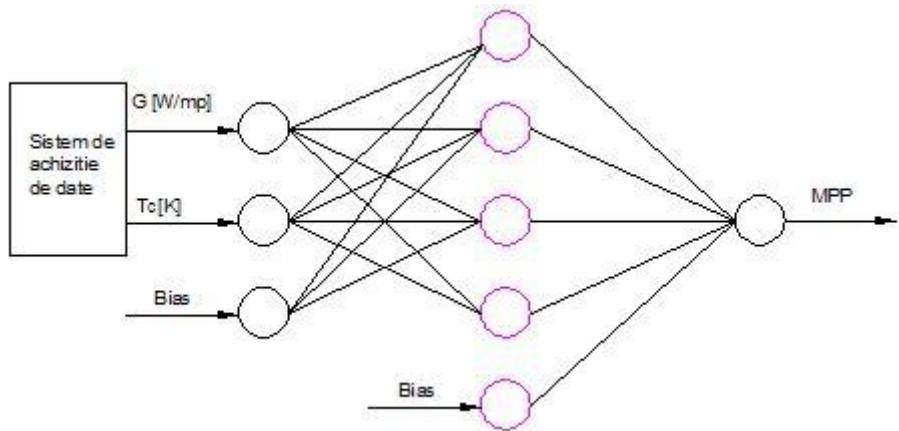


Figura 3.22 – Tip de RNA utilizată la comanda unui controler MPPT [BAH. 05]

Sistemul de achiziție de date este compus dintr-un convertor analog-digital AD574 cu 8 canale, având o rezoluție de 12 biți. Pentru măsurarea tensiunii este folosit un traductor de tip LV 25-P, iar pentru măsurarea curentului un traductor de tip LA 25-NP. Temperatura este măsurată cu un termocuplu de tip K, iar intensitatea radiației solare cu un piranometru Kipp and Zonen.

Algoritmul MPPT este scris în limbajul BASIC și este stocat pe un PC. Odată citite valorile semnalelor de la sistemul de achiziție de date sunt calculate: punctul de funcționare, MPP, cu ajutorul RNA din figura 3.19, și punctul normal de funcționare. Prin compararea puterii livrate de modul cu puterea maximă ce ar putea fi obținută, se calculează un semnal de eroare după algoritmul P&O, cu care se comandă circuitul MPPT.

Se poate spune că utilizarea RNA în sistemele fotovoltaice a adus o îmbunătățire a funcționării acestora. De la predicția potențialului solar, necesar proiectării sistemului fotovoltaic, la aplicații precum modelarea parametrilor de funcționare sau optimizarea algoritmilor MPPT, RNA au fost aplicate cu succes.

3. Modelarea punctului maxim de putere al unui panou fotovoltaic BP 585 F

Pornind de la modelele lui Hontoria [HON. 06], Karatepe [KAR. 06] și Bahgat [BAH. 05], am studiat în continuare diverse arhitecturi și algoritmi de antrenare RNA

pentru a modela punctul maxim de putere al unui panou fotovoltaic BP 585F. Am studiat posibilitatea de a găsi un model de RNA optim, adică destul de complex pentru a estima cât mai bine poziția MPP, dar cât mai simplu posibil pentru a putea fi implementat ulterior pe un microcontroler PIC, care să comande un sistem MPPT. Scopul principal a fost realizarea modelului de RNA și implementarea sa în limbaj CCS pentru microcontrolere.

Sistemul MPPT cu microcontroler PIC prezintă avantajul de a putea fi implementat pe fiecare panou al unui câmp fotovoltaic. Obiectivul este de a menține fiecare modul la punctul său maxim de putere și realizând astfel creșterea productivității energetice a câmpului respectiv.

Am realizat achiziția datelor experimentale necesare antrenării RNA și validării modelului la UMR CNRS 6134, Ajaccio, Franța. Am construit și am validat modelul RNA în MATLAB Neural Network Toolbox. Am implementat apoi modelul RNA pe un microcontroler PIC 16F877 și am comparat performanțele modelului neuronal realizat cu modelul analitic simplă diodă.

3.1 Achiziția experimentală a datelor

3.1.1 Introducere

Se poate preciza încă de la început că dezvoltarea pieței fotovoltaice necesită îmbogățirea cunoștințelor referitoare la productivitatea energetică a panourilor fotovoltaice (PV) pentru a putea estima profitabilitatea implementării lor în diverse locații [CAL. 09-2]. Astfel, există mai multe metode de caracterizare a performanței unui modul PV. În general, producătorii oferă informații referitoare la performanța panourilor PV în condiții de funcționare particulare, în special condițiile standard de test (STC) la o intensitate a radiației solare de 1000 W/m^2 , temperatură celulelor de 25°C și spectrul global al masei de aer de 1,5. Totuși, modulele PV operează în condițiile meteorologice exterioare, care sunt cu mult diferite de STC. Astfel, diferențele panouri PV, construite utilizând diverse tehnologii, funcționează diferit la schimbările intensității radiației solare, temperaturii celulelor și masei aerului [DEL. 02], [MEY. 00], [VAN. 97].

Se conturează astfel necesitatea implementării sistemelor de achiziție de date pentru monitorizarea funcționării panourilor PV, în condiții atmosferice reale. Există pe piață diverse sisteme de achiziție de date pentru panourile PV, dar sunt în general complicate și scumpe [MAR. 03]. De asemenea în situațiile în care instalația PV este greu accesibilă sau izolată, aceasta nu trebuie numai monitorizată, dar și comandată de la distanță.

În condițiile evoluției actuale a tehnologiei se urmărește crearea de sisteme de achiziție și control la distanță a instalațiilor PV, cât mai simple, ieftine și performante. Acest lucru se poate realiza cu ajutorul microcontrolerelor implementate pe fiecare panou PV al unui câmp de panouri, interconectare și legate în rețea la o unitate centrală de prelucrare a datelor.

Obiectivele principale sunt studiul sistemelor de achiziție de date pentru panourile fotovoltaice, precum și conceperea și analiza unui sistem de achiziție de date și de comandă a MPPT cu microcontrolere, care să poată fi implementat pe fiecare panou component al unui câmp fotovoltaic.

Acest sistem se compune dintr-un modul de achiziție a datelor, un modul de urmărire a punctului maxim de putere (MPPT) instalat pe fiecare panou dintr-un câmp PV și un modul de transmitere a datelor către o unitate centrală [CAL. 10-1].

Este bine cunoscut faptul că umbrirea unei singure celule a unui modul fotovoltaic conduce la scăderea productivității acestuia cu aproximativ 50% [CAL. 09-2]. În vederea diminuării acestui fenomen implementarea unui sistem MPPT pe fiecare modul în parte va conduce către o optimizare a productivității întregului câmp PV.

După realizarea unui studiu bibliografic al cercetărilor în domeniul achiziției de date pentru panourile PV, am analizat și am efectuat experimente pe o instalație de panouri fotovoltaice amorse și policristaline, cu achiziție avansată de date. Datele obținute le-am folosit pentru a antrena diverse arhitecturi și modele de rețele neuronale, în vederea obținerii unei predicții optime a punctului maxim de putere la care instalația poate să funcționeze în diverse condiții meteorologice.

Am implementat modelul neuronal obținut pe un sistem MPPT cu microcontroler care să comande funcționarea panoului respectiv. Un astfel de sistem are nevoie de achiziția datelor meteorologice și a parametrilor de funcționare ai modulului PV în timp real, pentru a se putea adapta necesităților sistemului. Sistemul cu microcontroler PIC are două funcții principale și anume cea de achiziție a datelor meteorologice și a parametrilor de funcționare a instalației, precum și cea de urmărire a punctului maxim de putere.

3.1.2 Sisteme de achiziție pentru panouri fotovoltaice

Un sistem de achiziție de date (SAD) are rolul de a prelua informațiile unui sistem fizico-chimic într-o formă utilizabilă ulterior. Aceste informații sunt parametrii fizici sau chimici ai sistemului studiat, a căror mărime trebuie furnizată.

Într-un sistem automat complex SAD preia mărurile fizice sau chimice ale procesului reglat și le transmite spre blocul de afișare sau blocul de stocare, prelucrare și comandă. În funcție de rezultatele prelucrării se va transmite comanda către elementul de execuție, care va modifica parametrii de funcționare ai procesului. Schema generală a unui astfel de sistem automat este prezentată în figura 3.23.

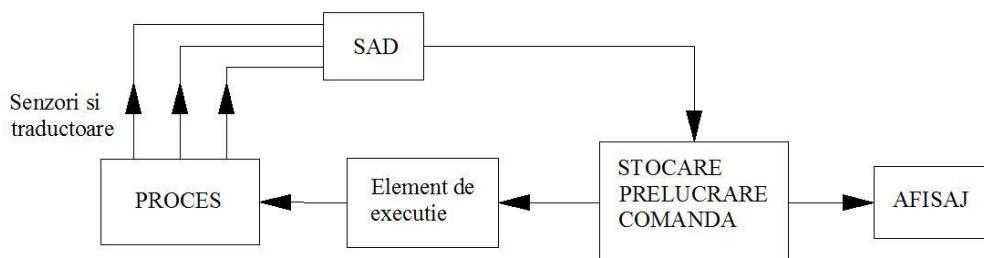


Figura 3.23 – Sistem automat de reglare cu SAD

La rândul său, SAD este alcătuit din mai multe elemente. Senzorii preiau informația din proces și o transmit circuitelor de condiționare, care transformă mărimea fizică într-o mărime electrică. Apoi semnalul este filtrat, amplificat și eșantionat pentru a fi convertit din analogic în digital. Prezența unui microprocesor este necesară pentru coordonarea operațiilor anterioare și pentru procesarea semnalelor obținute. Multiplexorul permite selectarea unui canal, dintre mai multe canale pentru ca semnalele să poată fi utilizate pe rând. Schema generală a unui sistem de achiziție de date este prezentată în figura 3.24.

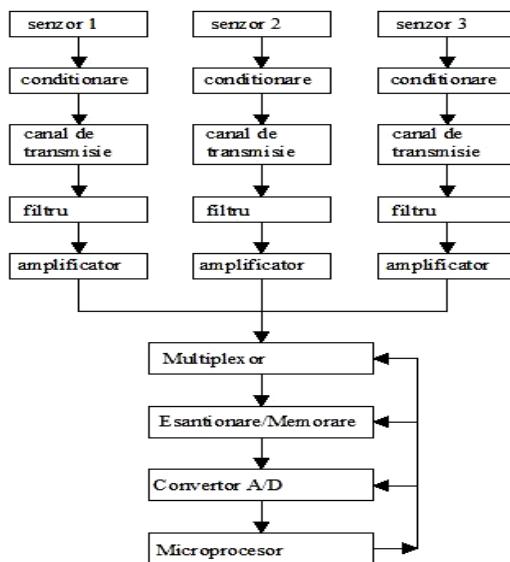


Figura 3.24 – Schema generală a unui sistem de achiziție de date

Senzori și circuite de condiționare

În general prelucrarea semnalelor de către dispozitivele și circuitele specializate, se poate face dacă acestea sunt sub formă de tensiune. Astfel, circuitele de condiționare convertesc semnalele electrice de la senzori, atunci când acestea nu sunt sub formă de tensiune. Dacă semnalele electrice au variații, atunci conversia se face într-o tensiune cu o amplitudine și frecvență determinate la ieșirea senzorului. De asemenea, unele circuite de condiționare oferă și posibilitatea de corectare a semnalului, cum ar fi compensarea efectelor nedorite prin amplificare, filtrare, liniarizare etc.

Senzor	Caracteristici electrice	Cerințe de condiționare
Termocuplu	- ieșire în joasă tensiune; - sensibilitate mică; - ieșire neliniară.	- senzor de referință a temperaturii pt. compensarea punctului rece; - amplificare mare; - liniarizare.
Termorezistență	- rezistență mică (tipic 100Ω) - sensibilitate mică; - ieșire neliniară.	- alimentare de excitare în curent; - configurație 3 sau 4 fire; - liniarizare.
Termistor	- rezistență mare; - sensibilitate mare.	- alimentare de excitare în tensiune sau în curent cu rezistență de referință.
Senzor cu ieșire în curent	- buclă de curent (4-20mA).	- rezistență de precizie.

Tabelul 3.1 – Caracteristicile principale ale unor circuite de condiționare.

În tabelul 3.1 sunt prezentate cerințele circuitelor de condiționare pentru cei mai utilizați senzori din sistemele fotovoltaice.

Condiționarea termocouplelor

Deoarece sunt ieftini, rezistenți și pot opera pe un domeniu larg, termocouplele sunt senzori de temperatură folosiți în sistemele fotovoltaice. Funcționarea lor se bazează pe efectul Seebeck – generare a unei tensiuni termoelectromotoare, variabilă cu temperatura, la bornele unei joncții a două metale diferite. Condiționarea lor presupune existența unei valori de tensiune de referință aplicată la unul din punctele de conexiune ale capătului rece. Această operație se numește compensare și se poate realiza fie hardware, cu o joncție identică inserată și polarizată invers, menținută la o temperatură constantă, fie software, cunoscându-se temperatura mediului ambiant. Schema generală a unui termocuplu este prezentată în figura 3.25. Tensiunea termoelectromotoare obținută la bornele termocuplului are următoarea expresie:

$$U_s = \int_{T_c}^{T_{ref}} S_{\alpha, \beta} dT \quad (3.32)$$

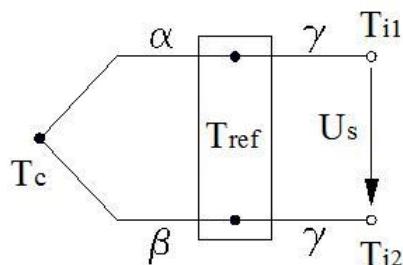


Figura 3.25 – Măsurarea temperaturii cu termocuplul (schemă de principiu)

O altă operație care se poate efectua încă din faza de condiționare este amplificarea semnalului sau creșterea sensibilității. În general ieșirile termocouplelor sunt mici, variind de la 7 la 50 μ V/ $^{\circ}$ C. Se poate calcula rezoluția interfeței de achiziție de date după următoarea formulă (nb – numărul de biți):

$$\frac{D_a}{(2^{nb}) \cdot A} \quad (3.33)$$

Trebuie specificat faptul că o amplificare încă din faza de condiționare a semnalului contribuie la reducerea degradării informației din cauza zgomotelor radiate din mediul de lucru.

Condiționarea surselor de curent

Pentru sursele de curent se utilizează ca circuit de condiționare, convertizorul curent-tensiune cu amplificator operațional. În figura 3.26 este prezentat circuitul general de condiționare a surselor de curent. Deoarece reacția amplificatorului operațional (A.O.) este legată la borna negativă a acestuia, rezultă o diferență de potențial nulă la intrarea sa, aceeași pentru impedanța sursei de curent și impedanța cablurilor de legătură. Rezultă că rezistența R va fi parcursă de întreaga cantitate de curent, debitată de sursă și va crea o diferență de potențial la ieșirea circuitului:

$$V_0 = -i \cdot R \quad (3.34)$$

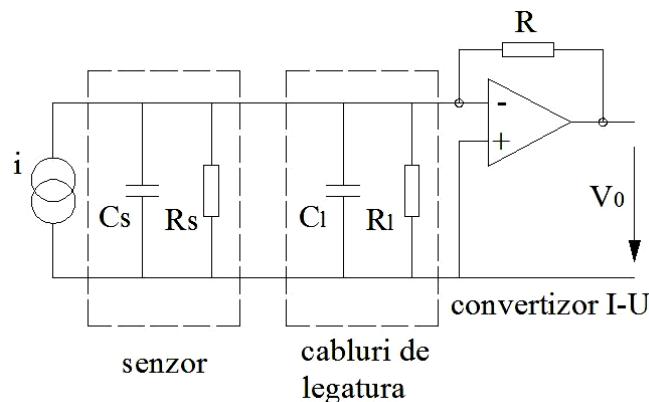


Figura 3.26 – Legarea sursei de curent la convertizorul I-U

Pentru convertizoare I-U trebuie avut în vedere faptul că sunt sensibile la perturbații. Astfel rezistența R trebuie să fie cu atât mai mare cu cât curentul i este mai mic, dar de la valori mai mari de $10^9 \Omega$. Acest lucru implică atât costuri ridicate, cât și instabilitate sau zgomot de fond. Se poate folosi în acest caz un grup de rezistențe, montate în buclă T, ca în figura 3.27:

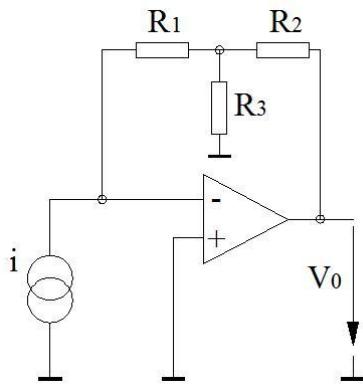


Figura 3.27 – Convertorul I-U cu montaj T

În cazul în care se alege $R_2 \ll R_3$, convertorul are practic același câștig în conversie ca și în cazul folosirii unei singure rezistențe deoarece $R = R_1(1 + R_2/R_3)$, iar valoarea tensiunii V_0 are expresia:

$$V_0 = -i \cdot \left[R_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) + R_2 \right] \quad (3.35)$$

Dezavantajul acestui tip de montaj este prezența unui decalaj al ieșirii și un zgomot crescute. Pentru a minimiza aceste efecte este necesară folosirea unui amplificator operațional cu decalaj scăzut și zgomot mic. De asemenea în cazul măsurării unor curenti mici trebuie utilizate amplificatoare al căror curenti de polarizare sunt inferiori curentului de măsurat. În același timp trebuie utilizat și un ecran de gardă pentru minimizarea curentilor de fugă.

Condiționarea senzorilor rezistivi

Senzorii rezistivi sunt cel mai larg utilizați pentru măsurarea temperaturii în instalațiile cu panouri fotovoltaice. În general se utilizează termorezistențe, dar schemele următoare au aplicabilitate pentru toate tipurile de senzori rezistivi [DIA. 06]. În funcție de tipul de măsurare efectuat asupra senzorului rezistiv există 2 tipuri de circuite de condiționare:

- circuite de condiționare pentru cazul măsurării rezistenței R ; dacă se cunoaște valoarea rezistenței unei termorezistențe Pt 100 se poate deduce temperatura la care aceasta se află, folosind tabele de valori. Senzorul de rezistență R este

alimentat de la sursa I_a și legat prin 2 fire de rezistență R_e de dispozitivul de măsură având rezistență de intrare R_i (figura 3.28).

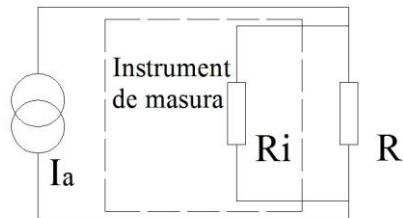


Fig. 3.28 – Măsurarea rezistenței în montajul cu 4 fire

Tensiunea măsurată la bornele rezistenței R_i are expresia:

$$v_m = \frac{R \cdot R_i}{R + R_i + 2R_e} \cdot I_a \quad (3.36)$$

- circuite de condiționare pentru cazul măsurării variației de rezistență ΔR ; în acest caz se folosește puntea Wheatstone dezechilibrată, măsurându-se variația de temperatură ΔT în jurul unei valori de echilibru T_0 . Puntea Wheatstone poate fi alimentată în curent sau în tensiune și poate avea una, două sau trei rezistențe variabile în brațele sale. Modelul unei punți Wheatstone alimentată în tensiune (a) și alimentată în curent (b) este prezentat în figura 3.29.

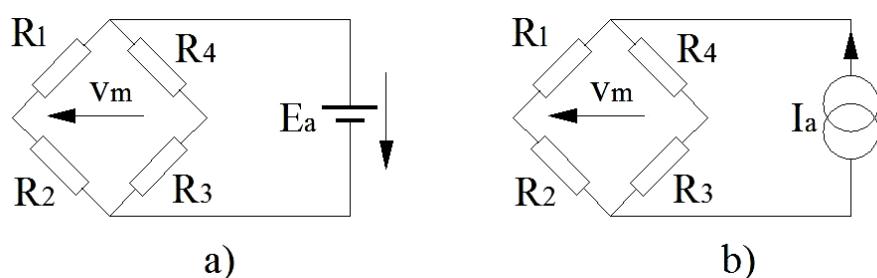


Figura 3.29 – Puntea Wheatstone alimentată în tensiune (a) și în curent (b)

1. Expresia tensiunii dedezechilibră a unei punți Wheatstone cu 3 rezistențe fixe $R_1 = R_3 = R_4 = R_0$ și un senzor R_2 , având variația $R_2 = R_0 + \Delta R_2$, este [DIA. 06]:

a) punte alimentată în tensiune

$$v_m = \frac{\Delta R_2}{R_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_2}{2R_0}} \cdot \frac{E_a}{4} \quad (3.37)$$

b) punte alimentată în curent

$$v_m = \Delta R_2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_2}{4R_0}} \cdot \frac{I_a}{4} \quad (3.38)$$

2. Expresia tensiunii de dezechilibru a unei punți Wheatstone cu 2 rezistențe fixe $R_3 = R_4 = R_0$ și un senzor R_2 , având variația $R_2 = R_0 + \Delta R_2$, este [DIA. 06]:

a) punte alimentată în tensiune

$$v_m = \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{R_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_2 + \Delta R_1}{2R_0}} \cdot \frac{E_a}{4} \quad (3.39)$$

b) punte alimentată în curent

$$v_m = (\Delta R_2 - \Delta R_1) \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_2 + \Delta R_1}{4R_0}} \cdot \frac{I_a}{4} \quad (3.40)$$

Condiționarea foto-senzorilor

Pentru a măsura intensitatea radiației solare, în sistemele fotovoltaice se folosesc în general celule fotovoltaice etalon, datorită simplității și costurilor reduse, folosind proprietățile joncțiunii p-n. Perechile electron-gol create prin absorbția fotonilor proveniți de la soare sunt separate datorită existenței câmpului electrostatic generat de joncțiunea materialelor p și n. Se produce astfel o diferență de potențial la bornele celulei fotovoltaice, numită tensiune fotoelectrică. În cazul în care circuitul este închis, această tensiune dă naștere curentului fotoelectric [EIC. 03], [PAR. 86]:

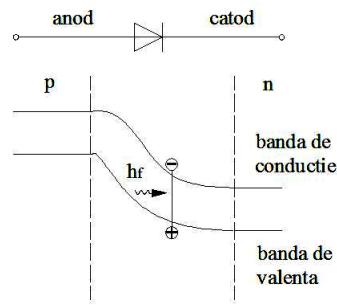


Figura 3.30 – Principiul de funcționare al unei fotocelule

Datorită tensiunilor mici la borne, montajului de măsură necesită utilizarea unui amplificator. În cazul în care fotodioda nu este polarizată, adică nu este alimentată de la o sursă exterioară, acesta se comportă ca un generator și se poate vorbi despre un efect fotovoltaic. Se poate măsura fie tensiunea de mers în gol, fie curentul de scurt-circuit. Avantajul folosirii unei fotocelule constă în posibilitatea de a măsura cu o precizie bună intensitățile luminoase slabe. În figura 3.31 sunt prezentate schemele de racordare pentru măsurarea tensiunii la borne (a) și pentru măsurarea curentului de scurt-circuit (b):

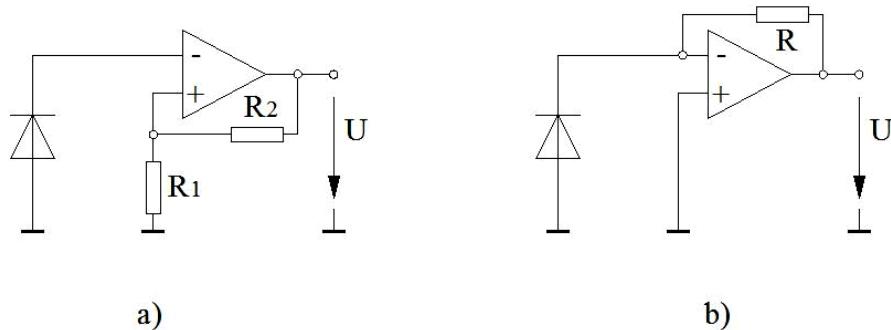


Figura 3.31 – Montaj de măsură a intensității radiației solare cu fotodiode

În figura 3.32 sunt prezentate alte aparate pentru măsurarea radiației solare folosite în sistemele de achiziție de date pentru instalațiile cu panouri fotovoltaice.



Fig. 3.32 – Aparate de măsură a intensității radiației solare: pirheliometru și mecanismul său, piranometru și modul său de montare

Eșantionarea semnalelor

O problemă importantă în achiziția de date este transformarea semnalelor analogice în semnale numerice care să poată fi procesate de către un calculator. Pentru aceasta, într-o primă etapă semnalul este eșantionat. Această operație trebuie corect efectuată pentru a putea conserva toată informația conținută în semnalul analogic inițial. În general, prelevarea eșantioanelor se face periodic, cu o perioadă T_e , numită perioadă de eșantionare, semnalul analogic continuu fiind astfel transformat într-un semnal discret. Pentru a reconstituire semnalul inițial $x(t)$ se impun condiții perioadei de eșantionare, ce decurg din teorema de eșantionare.

Teorema lui Shannon (eșantionării)

Un semnal analogic $x(t)$ având o lărgime de bandă finită, limitată la f_{\max} (Hz) nu poate fi reconstituit exact, plecând de la eșantioanele $x(kT_e)$, decât dacă acestea au fost prelevate cu o perioadă mai mică sau egală cu $1/2 \cdot f_{\max}$ [KUN. 86]. Cu alte cuvinte, dacă f_{\max} este frecvența maximă care apare în spectrul $x(t)$, condiția lui Shannon se exprimă în următoarea manieră:

$$f_e = \frac{1}{\Delta t} \geq 2 \cdot f_{\max} \quad (3.41)$$

Se consideră un semnal $x(t)$, ce urmează să fie eșantionat, utilizând impulsuri Dirac periodice de perioadă T_e . Fie $X(f)$ și $\Phi_x(f)$ respectiv transformata Fourier și densitatea spectrală ale semnalului $x(t)$. De asemenea $x_e(t)$, $X_e(f)$ și $\Phi_e(f)$ respectiv semnalul eșantionat, transformata sa Fourier și densitatea spectrală de putere. Atunci sunt îndeplinite următoarele condiții:

$$x_e(t) = x(t) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - kT_e) \quad (3.42)$$

$$X_e(f) = f_e \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(f - nf_e) \quad (3.43)$$

$$\Phi_e(f) = f_e^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \Phi_x(f - nf_e) \quad (3.44)$$

În cazul în care semnalul de bază $x(t)$ are o densitate spectrală de putere de formă trapezoidală, respectându-se teorema lui Shannon ecuațiile de mai sus corespund următoarelor figuri, unde impulsurile Dirac sunt reprezentate cu săgeți proporționale cu valoarea funcției în punctul respectiv [PAR. 86]:

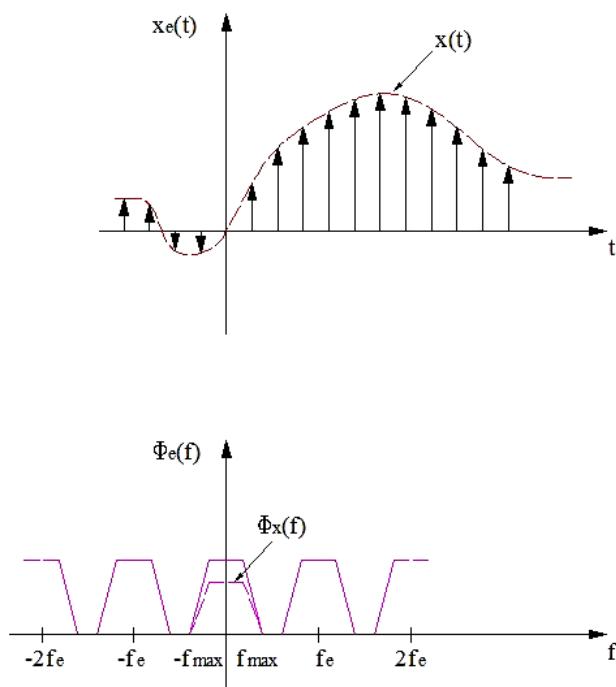


Figura 3.33 – Eșantionarea unui semnal cu spectru trapezoidal de putere

Se poate observa în figura 3.33 că în interiorul benzii $[-f_{\max}, +f_{\max}]$ spectrul semnalului original este nedeformat cu condiția respectării teoremei eșantionării. Perioada de repetiție a densității spectrale de putere este egală cu frecvența de eșantionare. În realitate eșantionarea se îndepărtează, mai mult sau mai puțin, de eșantionarea ideală prezentată. Apar astfel deformații în spectrul semnalului eșantionat, după cum urmează.

În mod real, valoarea instantanee a unui semnal este memorată în intervalul D. Impulsurile Dirac se transformă, deci, în impulsuri rectangulare de durată D, ca în figura 3.34. Spectrul densității de putere apare deformat față de cazul eșantionării ideale. Se poate demonstra că, transformata Fourier $X_{em}(f)$ și densitatea spectrală de putere $\Phi_{em}(f)$ au următoarele forme:

$$X_{em}(f) = Df_e \frac{\sin(\pi Df)}{\pi Df} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(f - nf_e) \exp(-j\pi f D) \quad (3.45)$$

$$\Phi_{em}(f) = D^2 f_e^2 \left(\frac{\sin(\pi Df)}{\pi Df} \right)^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \Phi_x(f - nf_e) \quad (3.46)$$

Pornind de la formele ecuațiilor 3.45 și 3.46, față de spectrul eșantionat ideal, spectrul eșantionat cu menținere (real) prezintă o funcție de ponderare sinusoidală.

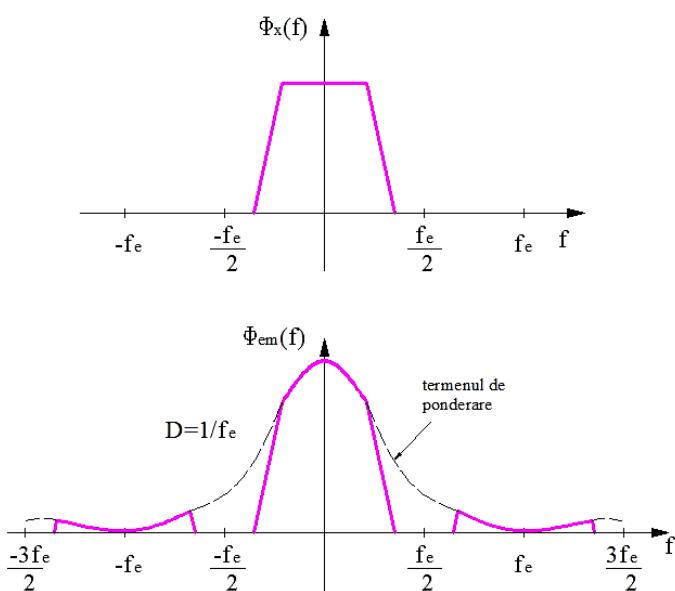


Figura 3.34 – Spectrul de putere pentru eșantionare cu menținere [DIA. 06]

Datorită costului destul de ridicat încă, pentru sistemele fotovoltaice, în special, sunt necesare, pe de-o parte baze de date meteorologice pentru estimarea productivității acestora și pe de altă parte, dacă există, date referitoare la funcționarea unor sisteme similare implementate în același loc. În acest sens au fost dezvoltate mai multe tipuri de sisteme de achiziție de date pentru crearea bazelor de date, dar și pentru monitorizarea sistemelor PV în timpul funcționării, în vederea estimării profitabilității lor [BLA. 97], [WIL. 97], [KIM. 97], [SOR. 04].

Printre primele sisteme de achiziție de date se numără și cel din figura 3.35. Acest sistem este unul dintre cele mai simple. Informațiile sunt preluate prin intermediul senzorilor, digitalizate și transmise unui microcontroler. Aceasta stochează datele în memoria sa EPROM și le transmite, printr-un protocol RS-485, mai departe unei unități centrale PC. Interfețele sunt realizate în Windows 98 sau în MS-DOS, fiind specifice fiecărei aplicații [BEN. 98], [BEN. 99]. Avantajele acestui tip de configurație sunt reprezentate de simplitate, iar dezavantajul major constă în faptul că informația este stocată în memoria EPROM, aceasta având un număr limitat de posibilități de scriere-ștergere.

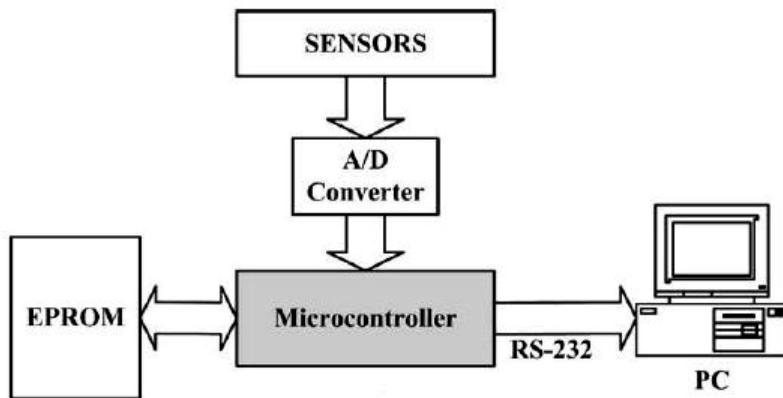


Figura 3.35 – Sistem de achiziție de date cu microcontroler [KOU 03].

Un alt tip de sistem de achiziție de date se poate realiza utilizând aparate data-logging. Acestea măsoară și transmit printr-o rețea RS-485 o serie de date meteorologice și parametrii de funcționare ai unui sistem hibrid fotovoltaic-diesel (figura 3.36). Dezavantajul unui astfel de sistem este lipsa posibilității de control al instalației. Interfețele grafice au fost realizate utilizând LABVIEW data-acquisition [WIC. 01].

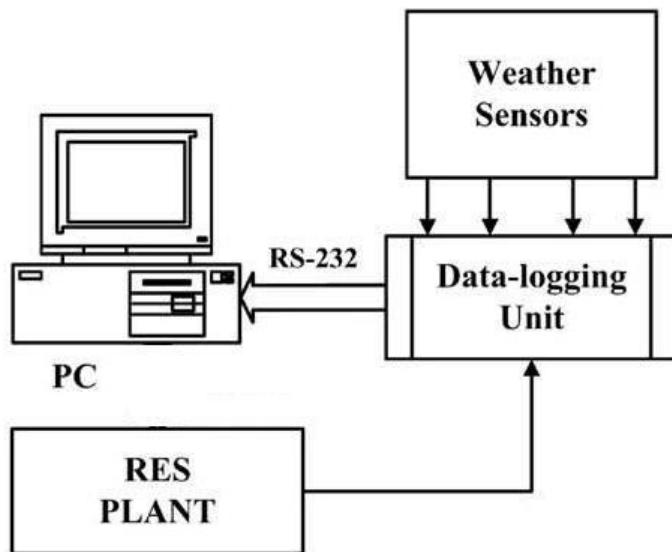


Figura 3.36 – Sistem de achiziție de date cu data-logging [KOU. 03]

Ambele tipuri de sisteme au în comun faptul că transmiterea datelor se face utilizând protocolul RS-485. Acesta este preferat datorită simplității sale software și hardware. Semnalele dorite sunt preluate de senzori și transmise unei unități centrale PC pentru o prelucrare ulterioară. Dezavantajul principal constă în lipsa flexibilității acestor tipuri de sisteme, ele neputând fi implementate decât pe instalațiile pentru care au fost concepute [KOU. 03].

În lucrarea lui Koutroulis [KOU. 03] se propune și un sistem computerizat de achiziție de date, folosind o combinație între cele două sisteme prezentate anterior. Sunt preluate atât date meteorologice utilizând un data-logging, cât și date referitoare la funcționarea sistemului energetic hibrid (figura 3.37).

O serie de senzori preiau informațiile energetice de la sistemul eolian și de la cel fotovoltaic, cum ar fi tensiunea și curentul produse, în timp ce un set de senzori este utilizat pentru a măsura parametrii meteorologici. Semnalele preluate sunt filtrate și amplificate, iar apoi sunt transmise printr-un protocol PCI către o unitate PC prin intermediul unei plăci electronice. Interfața grafică și softul de achiziție sunt realizate în LABVIEW [KOU 03].

Acest sistem a fost instalat într-o casă, lângă sistemul regenerabil hibrid, având coordonatele aproximative latitudine: 35.53° ($35^{\circ} 31_{}^{\prime} 48_{}^{\prime\prime}$ N); longitudine: 24.06° ($24^{\circ} 03_{}^{\prime} 35_{}^{\prime\prime}$ E) și altitudine: 150 m deasupra mării.

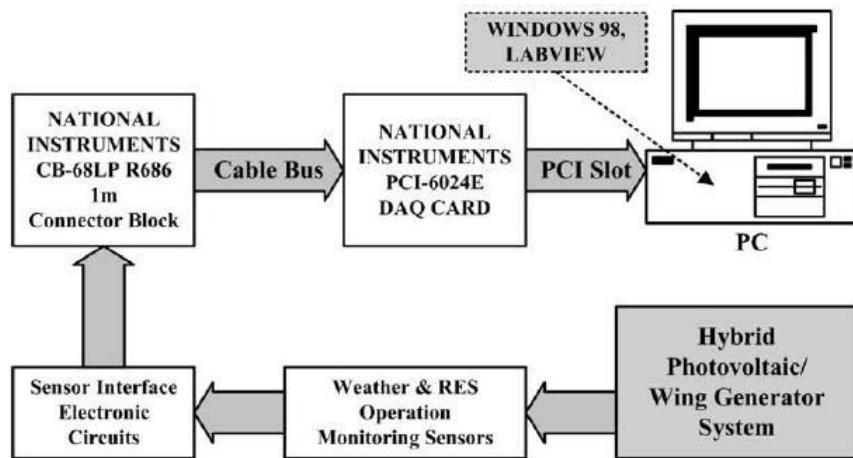


Figura 3.37 – Sistem de achiziție de date pentru un sistem hibrid [KOU 03].

Arhitectura propusă prezintă flexibilitate și adaptabilitate în cazul schimbărilor la nivelul sistemului, datorită mediului de dezvoltare LABVIEW și a placilor electronice adapțabile pentru mai multe tipuri de senzori.

Având la bază o arhitectură de sistem de achiziție și monitorizare de la distanță de tip distribuit, aceeași autori au dezvoltat un sistem care utilizează senzori independenți legați la unități de transmisie prin radio frecvență (RF). Sistemul de măsură se bazează pe arhitectura distribuită Client/Server. Instrumentele de măsură sunt legate la o unitate centrală, având rol de server, iar datele sunt disponibile utilizatorilor în rețea.

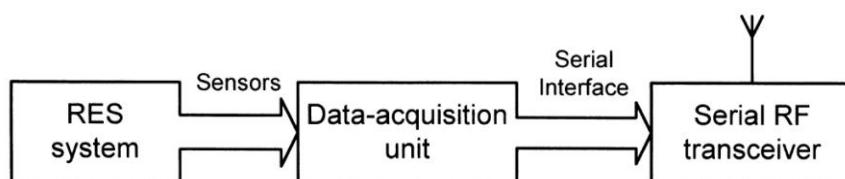


Figura 3.38 – Unitatea de achiziție de date pentru sistem distribuit [KAL 03].

Semnalele de la sistemul energetic sunt preluate de către o unitate independentă de achiziție de date (figura 3.38) și sunt transmise ulterior unei unități colector prin intermediul unui transceiver RF. Unitățile colectoare sunt interconectate apoi la server printr-o rețea Ethernet sau Internet (figura 3.39).

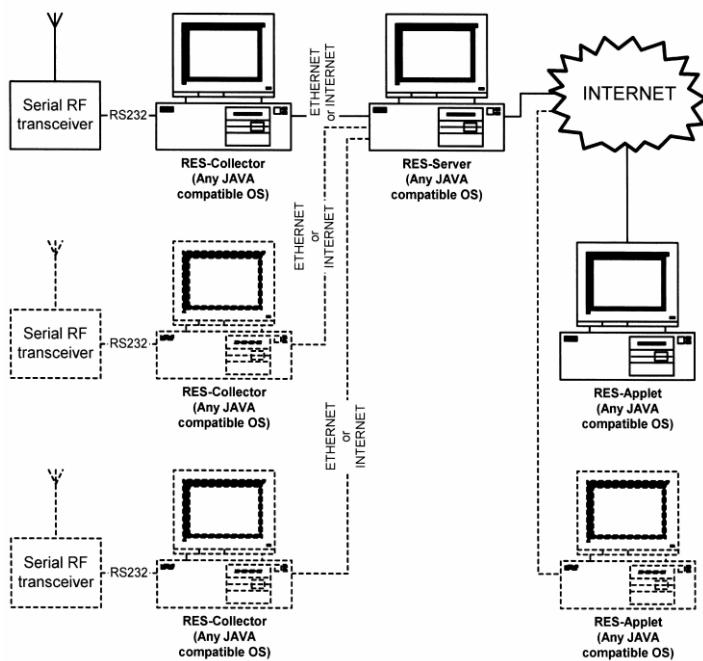


Figura 3.39 – Sistem de achiziție cu unități independente [KAL. 03]

Acest tip de sistem prezintă avantajul că nu necesită o conexiune fizică, cum ar fi interfață de comunicație serial RS-485 sau interfețe standard ca IEEE-484. Acest lucru este important pentru sistemele energetice greu accesibile [KAL. 03].

Pentru a asigura o flexibilitate în implementare, costuri reduse ale investiției și aplicabilitate generală, în lucrarea [GAG. 07], după un studiu al mai multor tipuri de sisteme de achiziție de date și comunicație, s-a optat pentru un sistem care să utilizeze rețeaua GSM, mai precis serviciul de mesagerie text. În condiții normale de funcționare, sistemul trimite periodic informații referitoare la performanța instalației de panouri PV, iar în cazul apariției unor anomalii în funcționare, operatorul este informat printr-un mesaj text. De asemenea, printr-un set de instrucțiuni, utilizatorul poate să modifice setări ale sistemului de achiziție de date, cât și anumite elemente ale instalației. Acest tip de sistem este utilizat cu precădere acolo unde accesul la rețeaua Internet sau la alt tip de rețea de comunicație este greu de realizat. Scopul final al acestor lucrări este realizarea unui sistem care să regroupeze cât mai multe facilități și să fie cât mai flexibil. Comunicația radio a fost introdusă în lucrarea lui Brugnoni [BRU. 05], dar numai pentru distanțe scurte, ca și în lucrarea lui Kalaitzakis [KAL. 03].

În acest sens s-a ales în [GAG. 07], modalitatea de comunicație GSM (Global System for Mobile Communications), în special serviciul de mesagerie text SMS, care este simplu de utilizat și ieftin.

Sistemul de achiziție de date se bazează pe arhitectura NI Field-Point și se compune dintr-un controller FP-2000, cu procesor intern și două unități de achiziție de date FP-AI-100. Comunicațiile între unități se realizează prin conexiune RS-485 și conexiune Ethernet LAN.

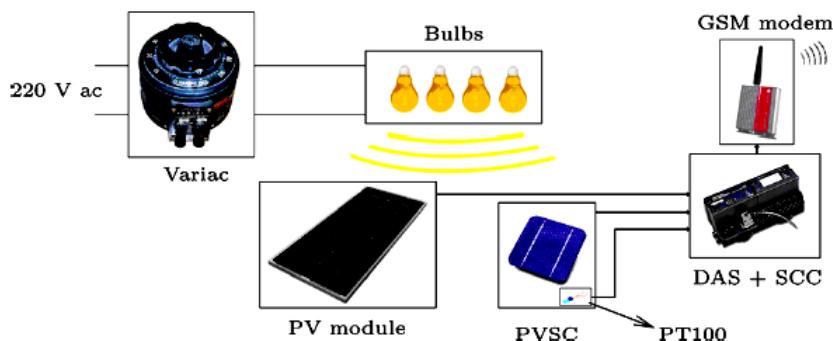


Figura 3.40 – Sistem de achiziție de date cu comunicație GSM [GAG. 07]

Un sistem de achiziție de date mai avansat este prezentat în [BEL. 10] și se compune din panouri PV, sistemul de achiziție de date, legat la o interfață grafică și sarcina variabilă simulată electronic (cu tranzistoare tip MOSFET).

O sarcină electronică variabilă permite testarea sistemelor PV prin controlul curentului sau uneori a tensiunii la bornele acesteia. Aceste circuite de simulare au la bază, în general funcționarea tranzistoarelor MOSFET care sunt mult mai ușor controlabili în curent decât tranzistoarele bipolare [HEN. 09]. În figura 3.41 sunt prezentate principiul de funcționare al sarcinii electronice cu tranzistor MOSFET și o curbă de funcționare a panoului PV obținută cu un astfel de sistem de achiziție de date.

Utilizând o interfață grafică realizată în Visual BASIC 6.0, se pot obține curbele de funcționare ale modulului PV, în diverse condiții meteorologice. Caracterizarea funcționării panoului se realizează prin vizualizarea caracteristicilor I-V, P-V și a punctului maxim de putere, cât și a parametrilor meteorologici. Sistemul nu permite

modificarea nici unui parametru de funcționare. Transmiterea datelor între sistemul de achiziție și PC se face printr-o conexiune RS-485.

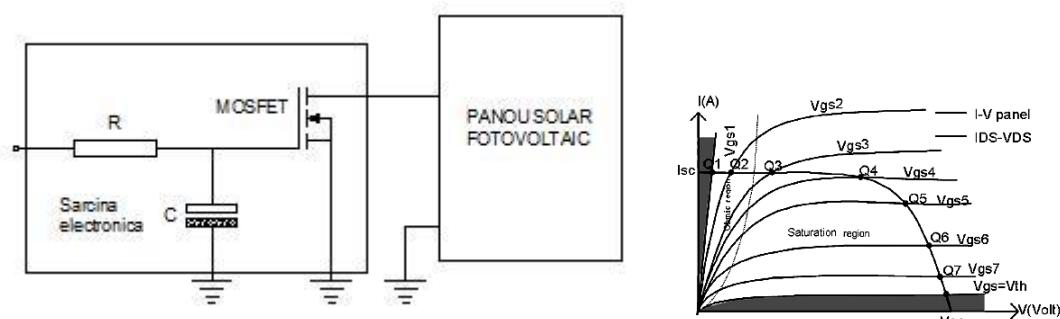


Figura 3.41 – Prinzipiul de funcționare al sarcinii electronice [BEL. 10]

3.1.3 Instalația de panouri fotovoltaice cu achiziție avansată de date a laboratorului UMR CNRS 6134

Pentru a putea studia funcționarea și a estima productivitatea energetică a sistemelor fotovoltaice, pe clădirea laboratorului UMR CNRS 6134, Ajaccio, Franța, a fost montată o instalație de panouri fotovoltaice, cuplate la invertoare și la un sistem de achiziție de date. Energia electrică produsă este livrată în sistemul energetic național francez.

Câmpul fotovoltaic se compune din 3 generatoare (9 module) PV monocristaline cu o putere instalată de 1575 W fiecare și 3 generatoare PV amorfice cu o putere instalată de 600 W fiecare. Instalația este instrumentată în întregime. Astfel se achiziționează date meteorologice (intensitatea radiației solare, temperatura celulelor, temperatura ambientă), date referitoare la funcționarea panourilor (current, tensiune), cât și date referitoare la funcționarea invertoarelor și la cantitatea de energie livrată în sistemul energetic național.

În vederea studierii impactului orientării, înclinării, umbririi și a altor fenomene fizice ce intervin în funcționarea instalației, panourile au 3 orientări diferite, fiind integrate clădirii laboratorului (figura 3.42):



Fig. 3.42 – Instalația fotovoltaică: 3 x 1575 W m-Si/ invertor SMA 2100 W
3 x 600 W a-Si/invertor SMA 700 W

Sistemul de achiziție de date

Sistemul de achiziție de date este format din componenta principală, modulul WEB'log, senzorii și circuitele de condiționare aferent (figura 3.43):

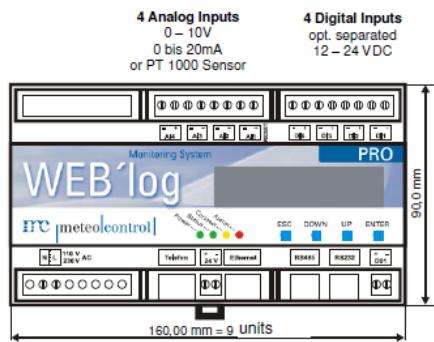


Figura 3.43 – Unitatea centrală de achiziție de date WEB'log

Unitatea centrală oferă facilitatea conectării a patru intrări analogice, 0-10 V, 0-20 mA sau a senzorilor de temperatură (termorezistențe) Pt 1000 și a patru intrări digitale. Alimentarea se face la 230 VCA, unitatea având o sursă integrată, cu posibilitate de alimentare a senzorilor exteriori la 24 VCC (max. 230 mA). De asemenea, în componența unității este integrat și un modem ce oferă posibilitatea de comunicație pe linia telefonică (analog, GSM sau ISDN). Legătura la internet se poate face prin intermediul modemului Ethernet, de asemenea integrat.

Achiziția datelor de la invertoare și de la senzorii de curent se face utilizând protocolul RS 485. Ieșirile digitale pot fi folosite fie pentru afișarea valorilor, fie pentru semnalizare sonoră cu buzer (figura 3.44) [WEB].

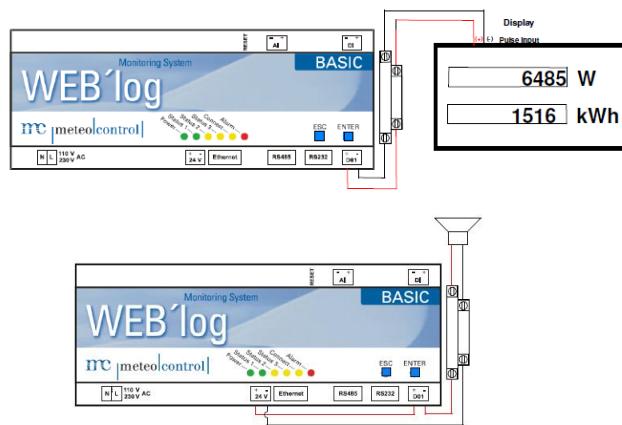


Figura 3.44 – Conectarea unității WEB'log la ieșirile digitale

În figura 3.45 este reprezentată amplasarea senzorilor de temperatură (1-12) și a senzorilor pentru măsurarea intensității radiației solare (G_M1-G_M3). Măsurarea temperaturii modulelor de face cu termorezistențe Pt 100, iar măsurarea intensității radiației solare cu o celulă fotovoltaică etalon Si-12TC. Deoarece curentul de scurt-circuit al unei celule fotovoltaice este proporțional cu intensitatea radiației solare (cf. ecuației 3.2), senzorul Si-12TC operează în mod scurt-circuit printr-o rezistență foarte mică. Compensarea cu temperatura se face activ, senzorul disponând de o sondă internă de temperatură.

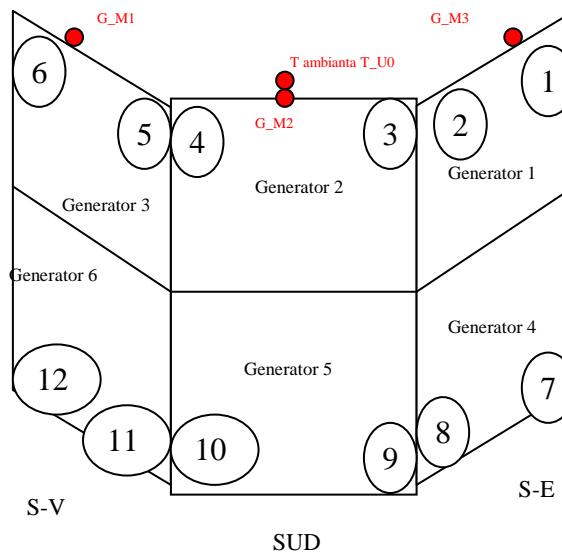


Figura 3.45 – Amplasarea senzorilor

Accesarea unității centrale se face prin internet, apelând adresa IP a acesteia. De pe pagina principală se poate selecta vizualizarea valorilor reale preluate pentru

intrările analogice (temperaturi și intensitatea radiației solare) și pentru intrările digitale (contoarele de energie electrică furnizată în rețeaua de electricitate). Într-o manieră similară se pot consulta datele în timp real referitoare la funcționarea invertoarelor.

Datele sunt preluate în fiecare minut și sunt stocate în memoria unității centrale de achiziție de date. În fiecare zi, la ora 00:00 acestea sunt transmise prin Internet la serverul central Hawi-Energy din Germania și pot fi accesate de oriunde. Datele pot fi vizualizate direct de pe site sub formă de tabel sau grafic, fie pot fi descărcate sub formă de fișier Excel sau HTML, pentru prelucrări ulterioare.

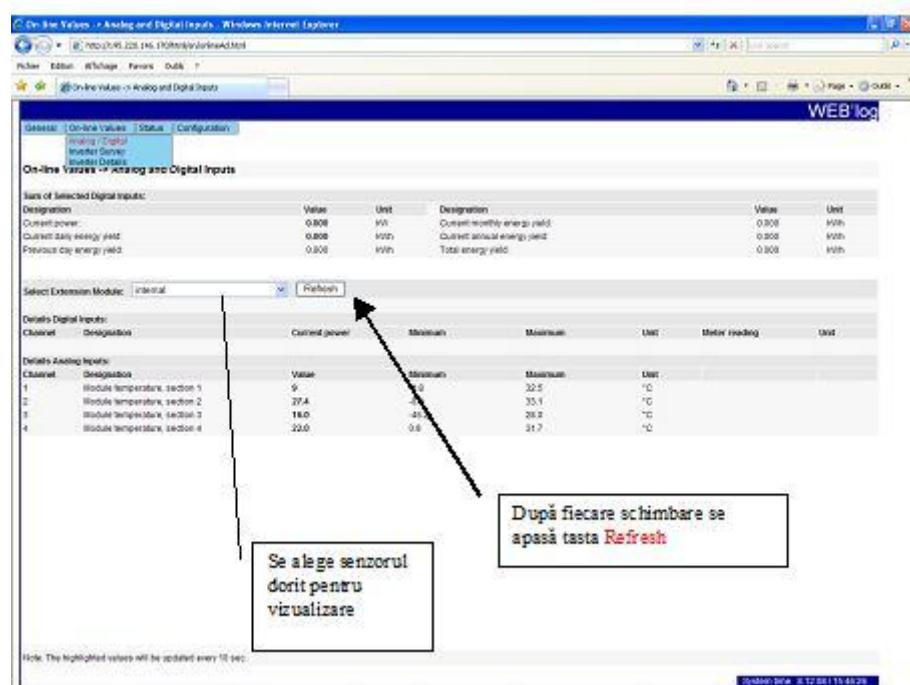


Figura 3.46 – Interfața grafică a unității centrale WEB'log

Datele pot fi folosite pentru antrenarea modelelor de rețele neuronale artificiale în vederea predicției punctului maxim de putere și obținerea unui model optim de rețea care să poată fi implementat în memoria unui microcontroler PIC.

Pagina de Internet Hawi-Energy

Pagina de Internet se accesează la www.fr.hawi-energy.com, iar pentru a intra în secțiunea sistemului de achiziție al Laboratorului UMR CNRS 6134 se apasă pe *surveillance*. În acest moment sistemul va cere numele utilizatorului și parola. Odată

accesată, pagina principală prezintă datele constructive ale sistemului global și ale sub sistemelor. De pe această pagină se pot accesa pe rând mai multe meniuri după cum urmează:

- *Centre d'informations*
 - sunt afișate ultimele intervenții asupra sistemului;
- *Analyse des données*
 - cuprinde diagrame deja configurate: variația puterii electrice furnizate, variația intensității radiației solare, energia electrică furnizată etc.
 - oferă posibilitatea utilizatorului de a crea grafice personalizate (4 axe în funcție de timp)
 - oferă posibilitatea de a crea grafice privind funcționarea invertoarelor
 - oferă posibilitatea de comparație a eficienței invertoarelor: grafice de tip energie-timp
- *Surveillance*
 - ultima stare de alarmă a sistemului
- *Rapport*
 - oferă posibilitatea de preluare a datelor stocate pe serverul hawi-energy.
 - se pot genera tabele Excel sau format HTML configurate de utilizator
 - tabelele Excel se pot configura de către utilizator (figura 3.47)

Sélection de la période et du type de rapport

Rapport : FAC Corse :

20	Novembre	2009
20	Novembre	2009

Intervalle

Format

Type de rapport

Annuler **Créer un rapport**

Figura 3.47 – Meniul de generare a tabelului de date

- *Gestion compteur*
 - oferă posibilitatea configurării contorului de energie
- *Environnement*
 - afișează contribuția la protecția mediului
- *Services supplémentaires*
 - afișează producția de energie cumulată
 - afișează cu cât au fost reduse emisiile de CO₂
- *Système de relevé des données*
 - secțiunea administrator
 - modificarea configurației panourilor și a aparatelor sistemului energetic.

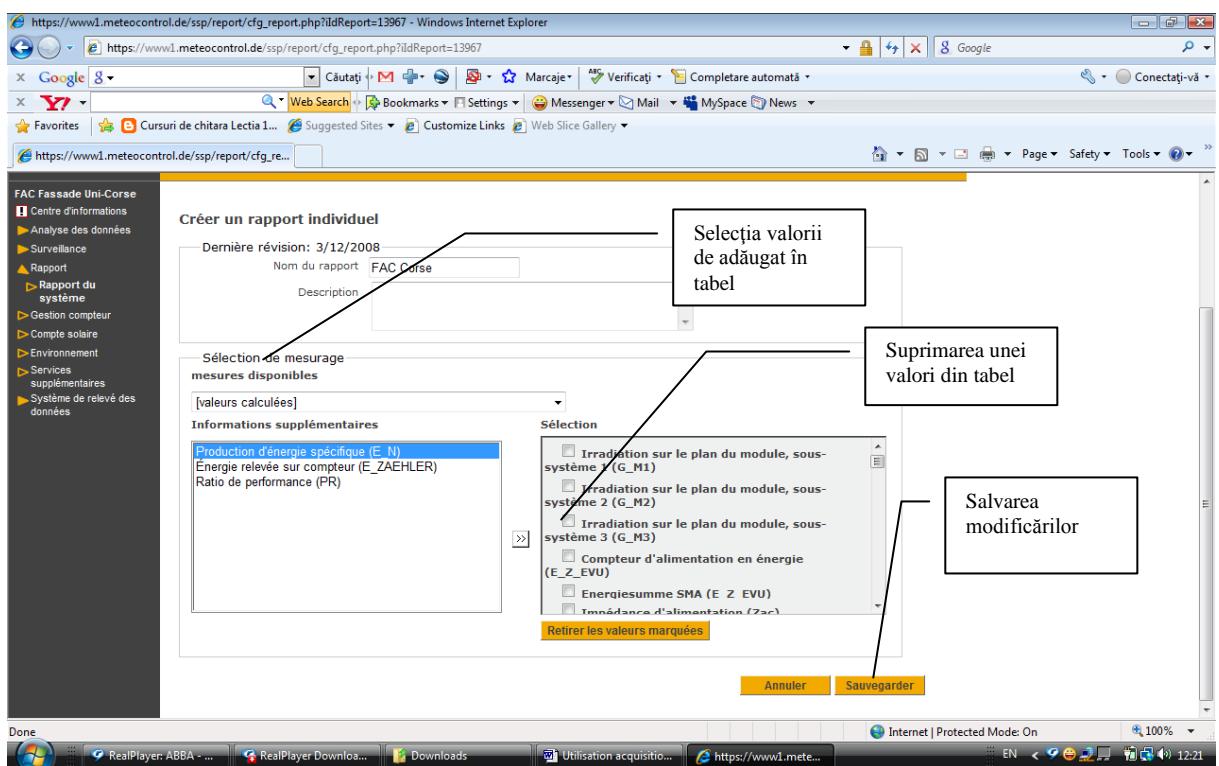


Figura 3.48 – Interfața de configurare a tabelelor de date Excel

3.1.4 Sistemul PV-KLA

Pentru a măsura parametrii de funcționare ai unui panou fotovoltaic s-a construit un stand experimental compus dintr-un modul fotovoltaic BP 585 F și un sistem de măsură adecvat. Datele referitoare la funcționarea modulului și datele meteorologice sunt colectate cu ajutorul diferitelor sonde și a unor circuite

electronice. Informațiile de la toate cele patru canale (tensiune, curent, intensitate a radiației solare și temperatura modulului) sunt preluate în același timp, cu o frecvență maximă de 66 KHz.

În figura 3.49 se pot observa componentele standului experimental și diferențele folosite. Intensitatea radiației solare pe planul modulului este măsurată cu ajutorul unei celule fotovoltaice etalon, compensată în temperatură. S-a putut utiliza un astfel de traductor deoarece într-o celulă de siliciu curentul de scurt-circuit este proporțional cu intensitatea radiației solare. Acest senzor este construit dintr-o celulă fotovoltaică din siliciu monocristalin legată la o rezistență paralelă de $0,1 \Omega$. Deoarece coeficientul de temperatură al curentului de scurt-circuit poate induce eroare de măsură, sonda are o compensare activă a temperaturii care reduce eroarea cu factorul 20. Compensarea se realizează utilizând o sondă de temperatură legată pe spatele celulei senzor. Circuitul electronic de compensare are un consum energetic redus. Calibrarea celulei este 1V la 1000 W/m^2 .

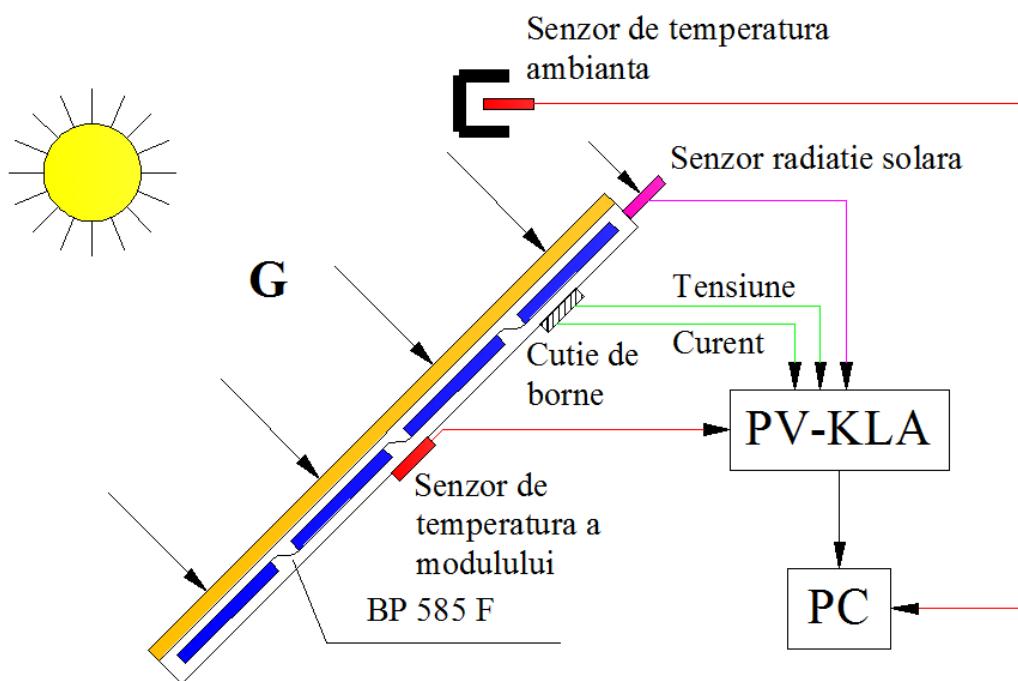


Figura 3.49 – Dispozitiv experimental de măsură a caracteristicii U-I a panoului fotovoltaic BP 585F

Măsurarea temperaturii panoului s-a făcut utilizând sonda de temperatură a aparatului de PV-KLA, o termorezistență Pt 100, lipită pe spatele panoului fotovoltaic, cu un contact termic cât mai bun.

Sarcina variabilă de la bornele panoului, cât și achiziția de date este realizată de asemenea cu același aparat PV-KLA, ce poate fi controlat cu un PC prin intermediul unei conexiuni RS 232.

Analizorul de curbe U-I, PV-KLA, este în consecință utilizat pentru obținerea curbelor U-I al modulelor și generatoarelor fotovoltaice, atât în cercetare, cât și în industrie. Poate fi utilizat în interior cât și în exterior datorită acumulatorilor înglobați. Figura 3.50 prezintă acest aparat.

Programul PVK este realizat utilizând programarea orientată pe obiecte și afișează într-o singură fereastră toți parametrii relevanți pentru curba U-I, cât și graficul aferent. Utilizatorul poate specifica intervale predefinite pentru a realiza măsurări pe o perioadă mai lungă de timp.



Figura 3.50 – Analizorul PV-KLA

De asemenea programul permite calculul coeficientilor de temperatură pentru parametrii ca tensiunea la borne și curentul de scurt-circuit. (figura 3.51).

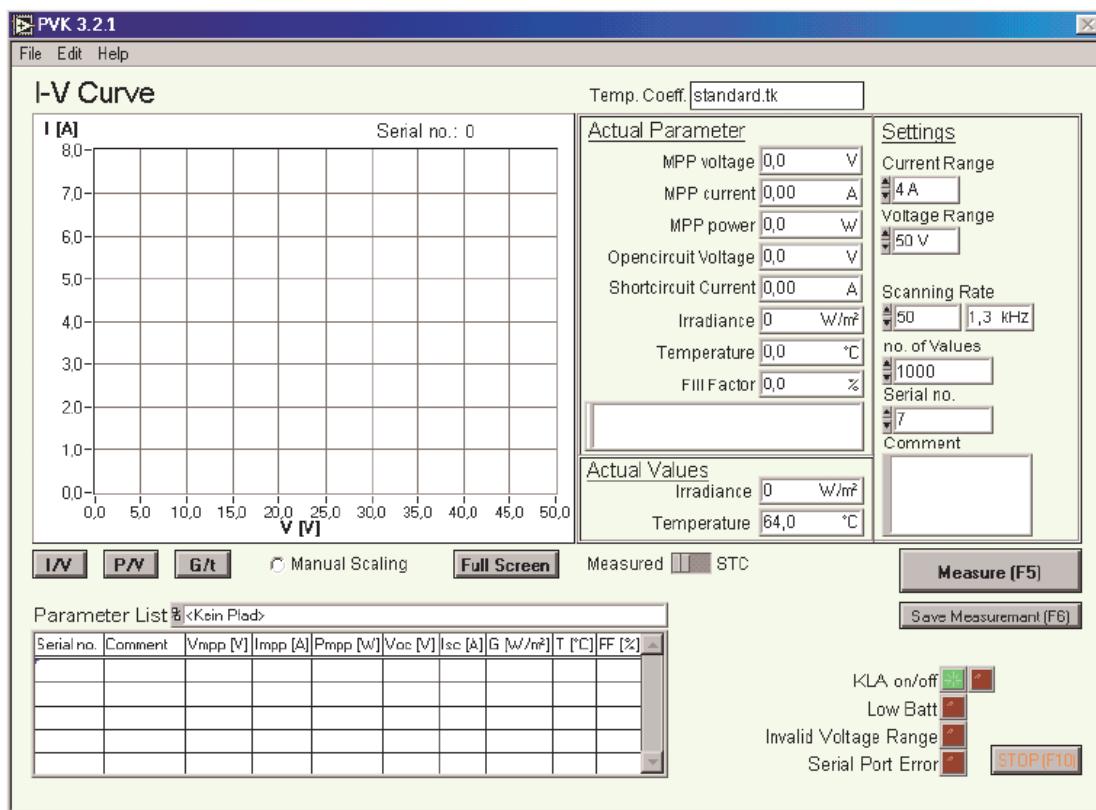


Figura 3.51 – Interfață grafică în Windows a programului PVK

3.2 Model de rețea neuronală feed-forward

Scopul învățării statistice este de a transforma informația în cunoștințe, adică de a simula prin intermediul algoritmilor matematici capacitatea ființelor vii de a învăța din exemple. Aceste modele matematice poartă numele de rețele neuronale artificiale [DRE. 08]. Rețele neuronale sunt modele conecționiste realizate din mai multe unități paralele de procesare interconectate prin sinapse, inspirate din funcționarea sistemului nervos central. Principalele caracteristici ale unei rețele neuronale artificiale sunt arhitectura și dinamica. O altă diferență constă în algoritmul de învățare care calculează valorile ponderilor sinaptice. Alte diferențe sunt viteza de procesare și eficiența procesului de învățare [CAL. 10-3].

În acest studiu am realizat modelarea punctului de putere maximă cu rețele neuronale artificiale, precum și implementarea lor în sistemul MPPT cu microcontroler PIC 16F877.

Am utilizat datele reprezentative achiziționate la Laboratorul UMR CNRS 6134, Ajaccio, Franța, privind funcționarea panoului fotovoltaic BP 585 F și datele meteorologice aferente (prezentate în anexa 1) pentru antrenarea, validarea și testarea mai multor tipuri de arhitecturi și algoritmi de învățare pentru RNA, în vederea găsirii unui model optim, utilizând MATLAB R2007 Neural Network Toolbox.

Datorită faptului că datele de intrare și de ieșire sunt independente de timp, am adoptat arhitecturi de RNA de tip feed-forward. De asemenea acestea, odată antrenate, datorită simplității lor, pot fi implementate cu ușurință în memoria unui microcontroler PIC și pot rula ca algoritm de calcul, fără a suprasolicita unitatea centrală de procesare și unitatea aritmetică ale acestuia.

Am construit pentru început un model RNA cu un strat ascuns compus din trei neuroni, având o funcție sigmoid logaritmică de activare. Am antrenat această rețea cu algoritmul Levenberg-Marquardt (LM) și cu algoritmul Scaled Conjugate Gradient (SCG). Am adăugat apoi câte un neuron în stratul ascuns și am repetat procedura de mai sus, până la atingerea unui număr de zece neuroni. Am folosit aceeași metodă pentru a crea rețelele neuronale cu două straturi ascunse de neuroni.

Datele de intrare ale rețelelor sunt intensitatea radiației solare și temperatura celulelor. Datele de ieșire sunt curentul și tensiunea optime, corespunzătoare punctului maxim de putere [CAL. 09-1] (figura 3.52). Datele de intrare au fost preprocesate și postprocesate prin scalarea lor în intervalul [-1,1]. Acest lucru a fost necesar pentru a fi posibilă antrenarea rețelei.

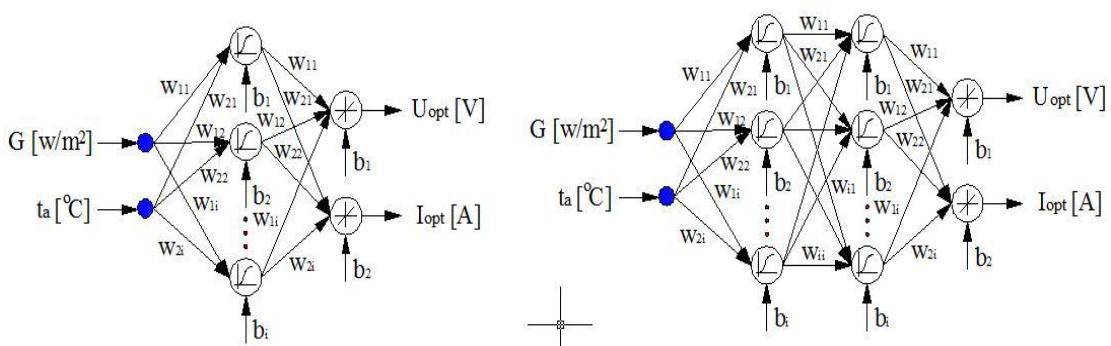


Figura 3.52 – Modele RNA cu un strat și cu două straturi ascunse [CAL. 10-3]

În figura 3.53 este prezentat un model general de neuron din stratul ascuns și un neuron din stratul de ieșire.

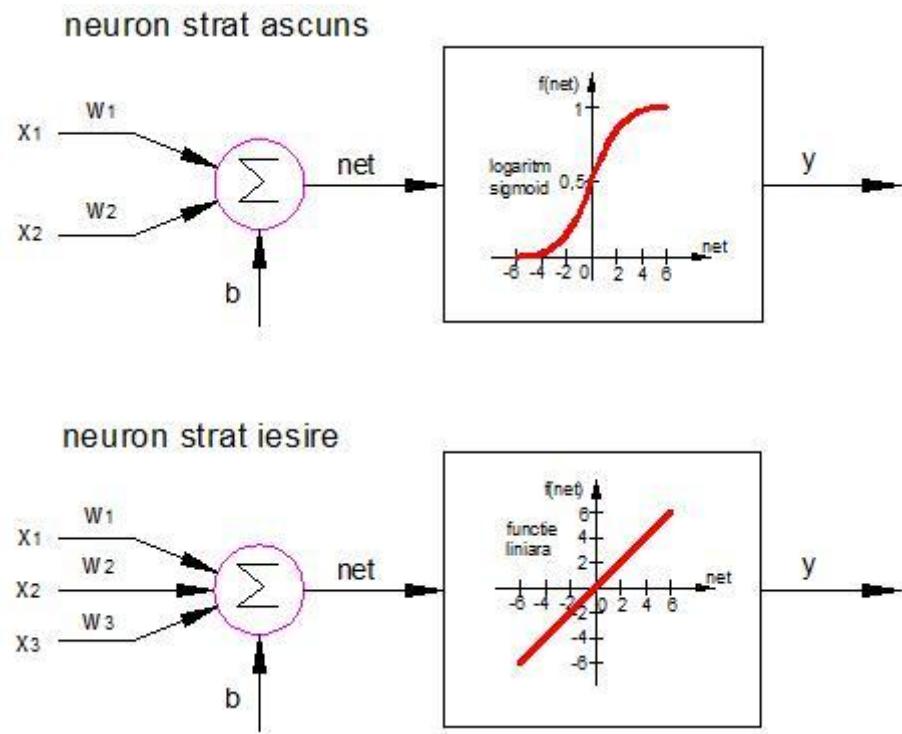


Figura 3.53 – Modele generale de neuroni utilizati în modelul RNA de predicție a punctului maxim de putere

Am utilizat cele două tipuri de metode de învățare (LM și SCG) din clasa *backpropagation* pentru antrenarea diverselor arhitecturi de RNA. Acest lucru a fost posibil datorită faptului că funcția de activare a neuronilor este diferențiabilă. Numele algoritmului se referă la faptul că gradientul erorii este calculat în sensul invers propagării semnalului de intrare. Aceasta este o metodă supervizată de învățare, ce se bazează pe minimizarea gradientului erorii între datele de intrare și datele de ieșire.

Algoritmul *backpropagation* corectează ponderile conexiunilor sinaptice în direcția în care gradientul erorii scade cel mai repede (direcția negativă a gradientului erorii), direcție în care funcția de performanță scade cel mai repede. Chiar dacă funcția de performanță scade cel mai repede în direcția negativă a gradientului, s-a demonstrat că nu este neapărat necesar să se ajungă la o convergență mai rapidă a metodei. Din acest motiv, algoritmii gradientului conjugat caută minimizarea erorii în direcții conjugate, fapt ce produce în general o convergență mai rapidă a soluției [CAL. 09-1], [DEM. 10].

În faza de antrenare sunt utilizate trei funcții. Prima, *fixunknowns* recodează valorile de intrare considerate NaN (Not a Number) în valori numerice, astfel încât rețeaua să poată fi antrenată. Cea de a doua este *removeconstantrows*, ea fiind utilizată pentru a înlătura valorile care sunt aceleași pentru toți vectorii de intrare. Astfel de date nu conțin nici o informație și pot crea probleme la nivelul algoritmului numeric de inițializare sau antrenare a rețelei. Cea de a treia funcție *mapminmax* normalizează valorile vectorilor de intrare în intervalul [-1,1].

Am realizat antrenarea modelelor RNA cu un strat ascuns și cu două straturi ascunse de neuroni utilizând 200 de puncte experimentale reprezentative. Graficele din anexa 2 prezintă variația erorii pătratice medii în faza de antrenare a rețelei și conțin trei curbe, deoarece punctele experimentale sunt împărțite aleatoriu în trei seturi: 60% din puncte sunt folosite pentru a antrena rețeaua neuronală (albastru), 20% din puncte sunt folosite pentru a valida capacitatea de generalizare a rețelei (verde) și 20% din puncte sunt folosite pentru a testa capacitatea rețelei de a răspunde la date noi (roșu).

Procesul de antrenare continuă atât timp cât se produce o reducere a erorii rețelei pentru vectorii de validare. Antrenarea se va opri înainte ca rețeaua să învețe foarte bine seturile de antrenare în avantajul capacitații de generalizare. Această problemă este studiată în multe lucrări de optimizare a algoritmilor de învățare.

3.3 Simularea și validarea modelului în MATLAB

După antrenare am simrat poziția MPP în 31 de puncte experimentale reprezentative, utilizând modelele RNA studiate. Pentru a evalua performanțele lor am calculat eroarea pătratică medie și coeficientul de corelație după cum urmează [CAL. 09-2]:

$$MSE = \left\{ \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{x}_i)^2 / N \right\}^{1/2} \quad (3.47)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]}}^{1/2} \quad (3.48)$$

unde, MSE reprezintă eroarea pătratică medie și CC coeficientul de corelație. y_i este valoarea calculată, x_i valoarea măsurată, \bar{y} valoarea medie calculată și \bar{x} valoarea medie experimentală, N numărul total de date analizate. Rezultatele simulărilor pentru rețele antrenate cu algoritmul LM sunt prezentate în figura 3.54 și 3.55 [CAL.10-3].

Un bun model trebuie să facă un compromis între învățare și generalizare. Astfel, dacă un model este mai puțin complex el are o capacitate redusă de învățare și generalizare, iar dacă este prea complex are o bună capacitate de învățare, dar slabe performanțe de generalizare [DRE. 08]. Analizând figurile 3.54, 3.55, 3.56 și 3.57 se poate observa că cel mai bun model din acest punct de vedere este cel cu un singur strat ascuns cu 5 neuroni. Se preferă un model cu un singur strat ascuns deoarece necesită mai puțin spațiu de memorie pentru implementarea pe microcontroler PIC.

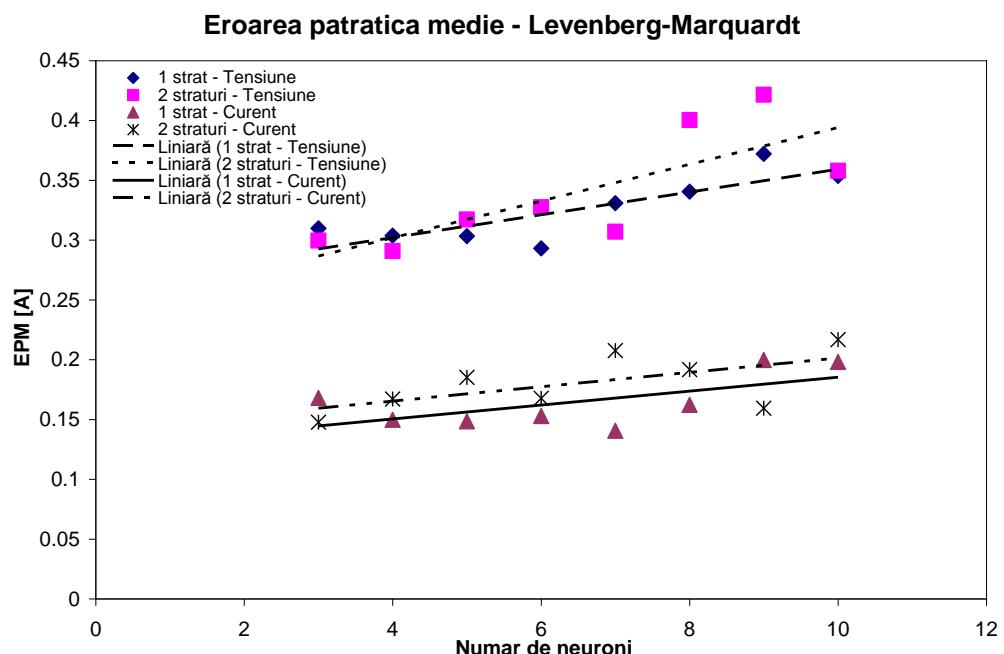


Figura 3.54 – Variația erorii pătratice medii pentru RNA antrenate cu LM

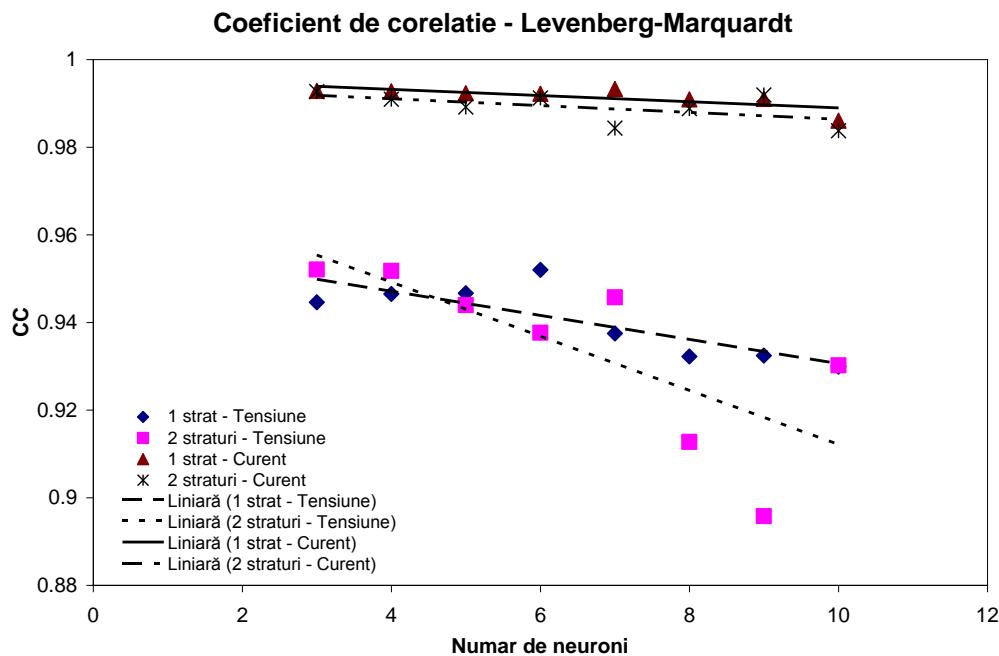


Figura 3.55 – Variația coeficientului de corelație pentru RNA antrenate cu LM

Antrenarea rețelelor cu algoritmul SCG conduce către un rezultat asemănător, diferența provenind din numărul de iterații care trebuie făcute în faza de antrenare, până la obținerea convergenței. Rezultatele simulărilor sunt prezentate în figura 3.56 și 3.57 [CAL.10-3]:

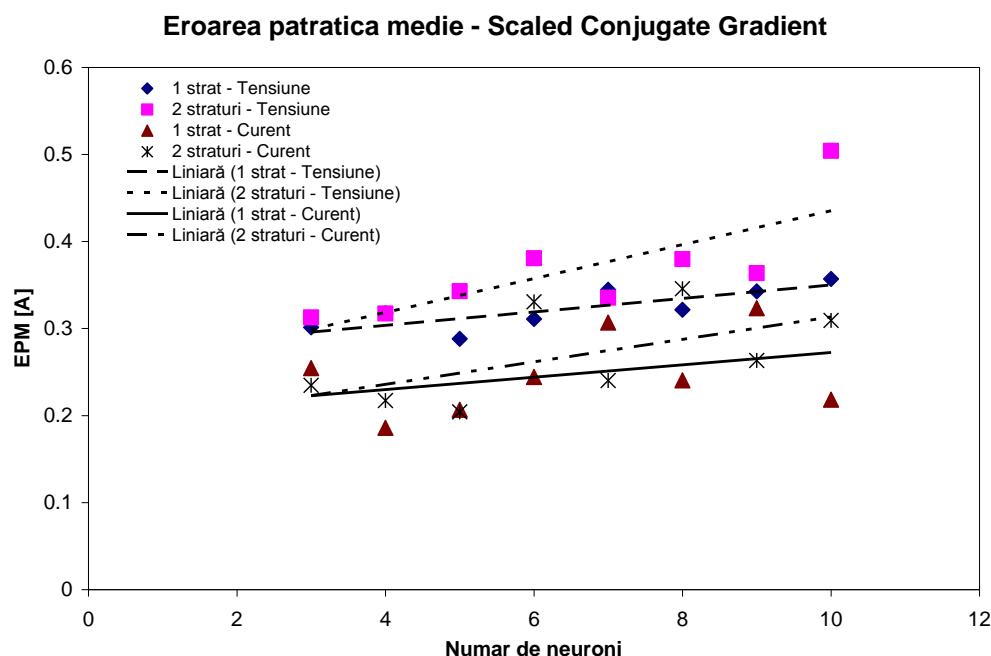


Figura 3.56 – Variația erorii pătratice medii pentru RNA antrenate cu SCG

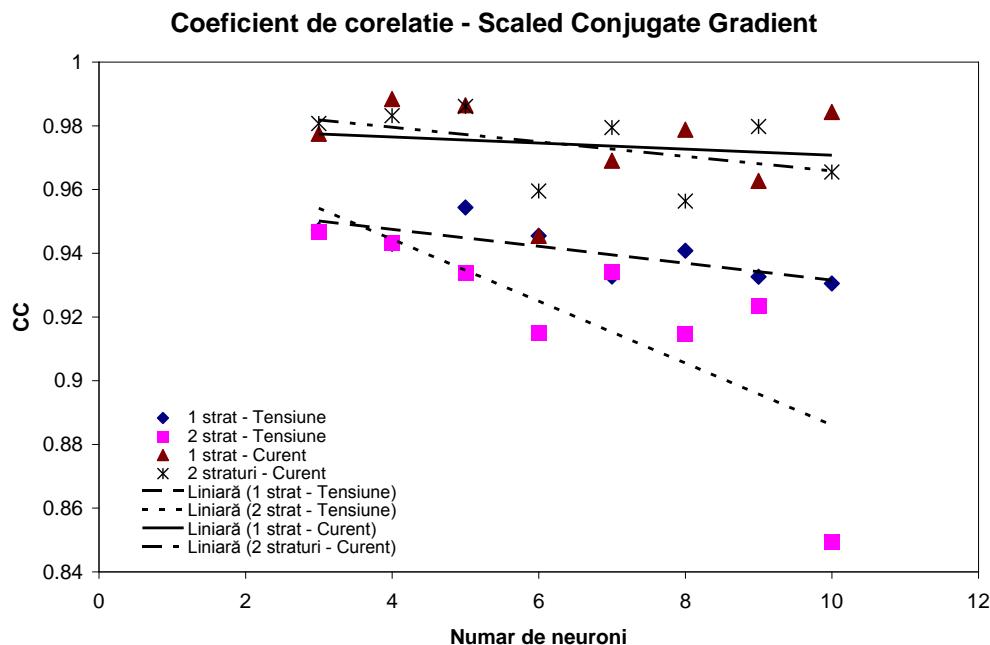


Figura 3.57 – Variația erorii pătratice medii pentru RNA antrenate cu SCG

Algoritmul LM prezintă o convergență mai rapidă și o mai bună acuratețe decât metoda SCG. Deși metoda LM presupune utilizarea unui spațiu de memorie mai important în faza de antrenare, se preferă utilizarea acesteia. Pentru rețeaua antrenată cu metoda LM, având un strat ascuns cu 5 neuroni am calculat coeficientul de corelație în cele 31 de puncte de simulare (figura 3.58 și 3.59), matricele ponderilor sinaptice fiind prezentate în anexa 3.

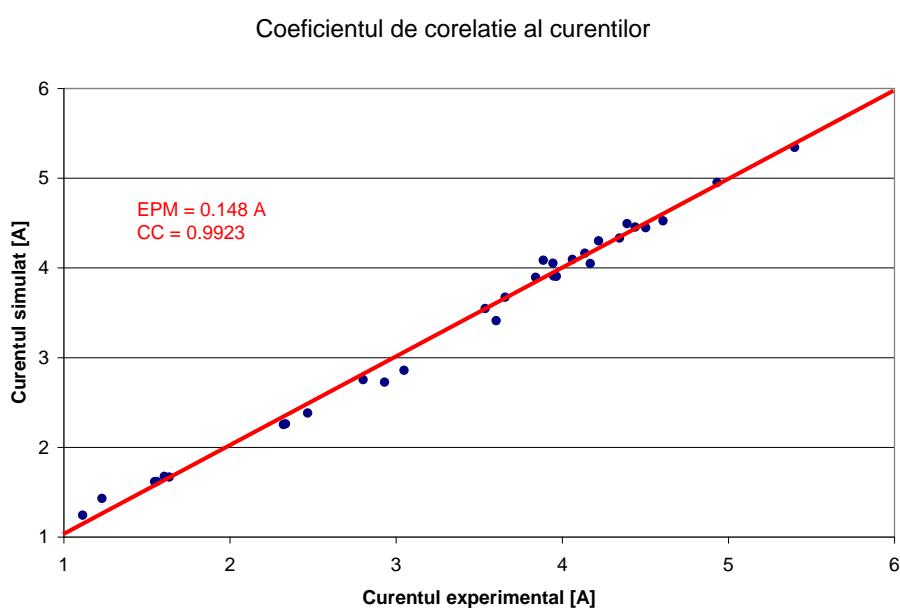


Figura 3.58 – Validarea modelului pentru curenți

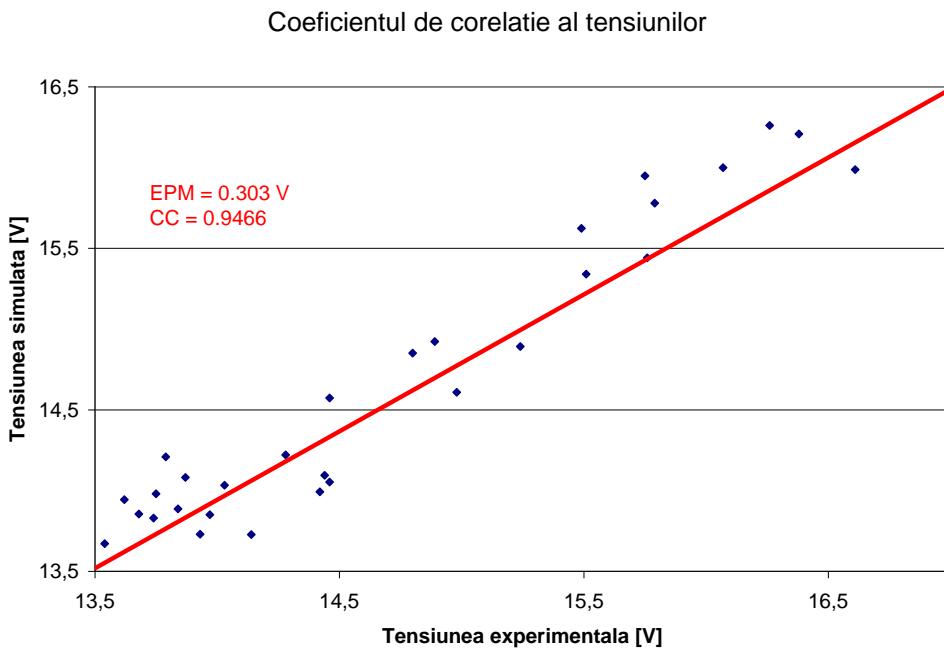


Figura 3.59 – Validarea modelului pentru tensiuni

3.4 Compararea performanțelor modelului neuronal studiat și ale modelului simplă diodă

Pentru a valida modelul RNA construit și pentru a-i compara performanțele cu cele ale modelului analitic simplă diodă, am realizat calculul punctului maxim de putere în cele 31 de puncte experimentale utilizate la simularea funcționării RNA.

Modelul simplă diodă este caracterizat matematic printr-o ecuație implicită de forma $f(V, I) = 0$. Pentru a rezolva o astfel de ecuație se pot utiliza mai multe metode numerice iterative. Cea mai simplă dintre acestea este metoda Newton-Raphson, descrisă de Mathews (1987). Cunoscându-se valoarea tensiunii electrice, curentul I prin circuit se poate determina cu ecuația (3.3). Pentru a o rezolva se procedează astfel: se consideră o valoare inițială I_0 și se face iterația (3.46) până când se verifică relația $|I_{i+1} - I_i| < \varepsilon$ [CAL. 11].

$$I_{i+1} = I_i - \frac{f(V, I)}{\partial f(V, I)} \quad (3.46)$$

Parametrii $R_s = 0.49\Omega$ și $R_p = 150\Omega$ au fost determinați pentru modulul BP 585F și au același ordin de mărime ca cele din literatura de specialitate [EIC. 03]

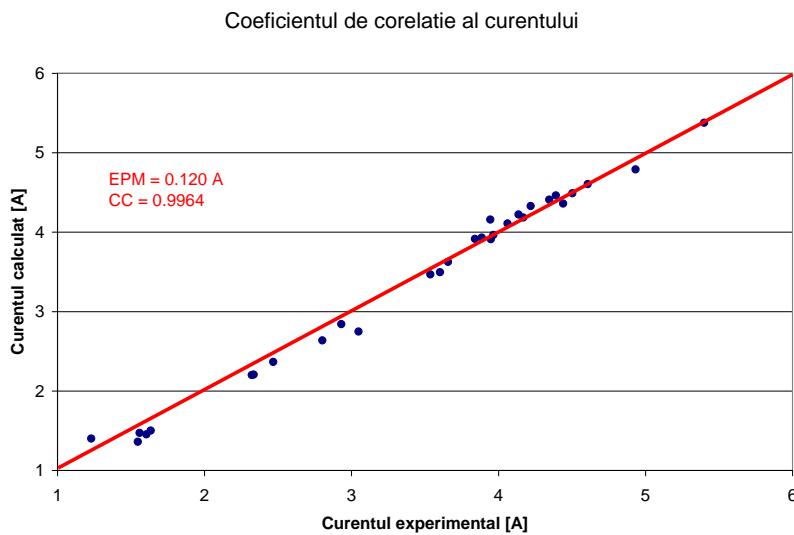


Figura 3.60 – Validarea modelului simplă dioda pentru curenți

Se observă din figurile 3.58 și 3.60 că valorile erorii pătratice medii sunt foarte apropiate, iar coeficientul de corelație tinde către unitate. Se poate concluziona că performanțele celor două tipuri de modele sunt asemănătoare și că modelul neuronal realizat poate fi utilizat în sisteme MPPT.

Un alt aspect important de menționat este că modelul RNA studiat realizează calcule simple ca adunarea, înmulțirea, împărțirea și calculul unei funcții exponențiale (din funcția de activare a neuronilor), în timp ce pentru a calcula MPP cu modelul simplă diodă este necesară o metodă iterativă, ce implică și calcul derivativ. În acest sens se poate spune că un model RNA poate fi implementat mult mai ușor pe un microcontroler PIC, decât un algoritm analitic.

4. Utilizarea microcontrolerelor PIC în instalații fotovoltaice

4.1 Introducere

Pentru ca un panou fotovoltaic să furnizeze maximul de putere către receptor, între el și aceasta trebuie inserat un cuadripol de adaptare. Acesta este în general un convertizor DC-DC, ridicător de tensiune sau coborător de tensiune. Pentru a funcționa la parametri optimi, aceste circuite necesită o lege de comandă, care este denumită în literatură algoritm de urmărire a punctului maxim de putere (Maximum Power Point Tracker sau MPPT). Acest algoritm, oricare ar fi el, reglează raportul ciclic (factor de umplere α), adică frecvența pulsurilor de comandă a circuitului, lucru ce permite adaptarea sarcinii cu generatorul fotovoltaic. Comanda MPPT se poate face analogic, analogic-numeric sau numeric [AZI. 07].

În acest subcapitol am studiat un sistem de achiziție a parametrilor fizici de funcționare ai unui panou PV, transmiterea lor în rețea și comanda MPPT pe baza modelului RNA studiat în subcapitolele 3.2, 3.3 și 3.4, având la bază microcontrolerul PIC 16F877.

4.2 Arhitectura generală a microcontrolerului PIC 16F877

Dezvoltarea circuitelor integrate a condus la posibilitatea implementării într-un singur cip a mii și chiar sute de mii de tranzistoare. Aceasta a fost o primă condiție pentru realizarea microprocesoarelor. Pentru a crea un calculator s-au adăugat la microprocesor periferice cum ar fi memorie, linii de comunicație intrare-iesire, temporizatoare etc. Următorul pas a fost implementarea unui microprocesor și a perifericelor aferente într-un singur cip, numit *microcontroler*. Un microcontroler diferă foarte mult de un microprocesor, diferența principală fiind funcționalitatea. Un microcontroler conține și alte circuite suplimentare, față de un microprocesor, care îi permit stocarea informației, comunicare, temporizare etc. (figura 3.61).

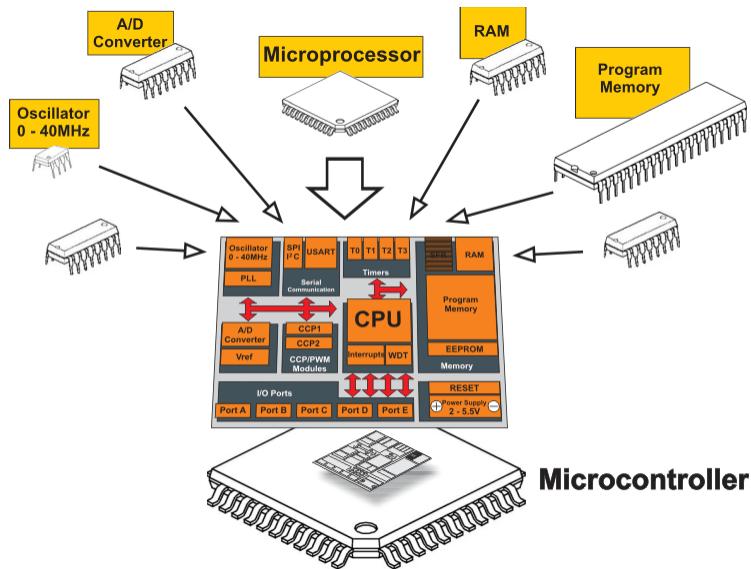


Figura 3.61 – Arhitectura generală a unui microcontroler PIC [VER. 09]

Un microcontroler este creat să conțină toate circuitele necesare pentru diverse aplicații, nefiind necesară adăugarea altor cipuri și realizându-se astfel o economie de spațiu și de investiție [VER. 09].

După cum se poate observa în figura 3.61, un microcontroler conține mai multe tipuri de circuite cu diferite funcționalități și posibilitatea de comunicație prin intermediul portilor intrare-iesire. Acestea pot fi configurate fie ca intrări, fie ca ieșiri cu ajutorul setărilor interne ale microcontrolerului.

Unitatea centrală (CPU), inima unui microcontroler, monitorizează și controlează activitatea internă. Ea se compune din mai multe sub-unități după cum urmează (figura 3.62):

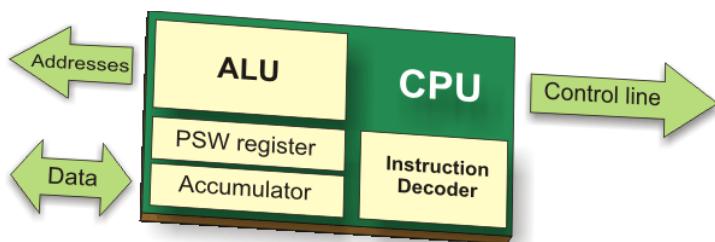


Figura 3.62 – Unitatea centrală a unui microcontroler (CPU) [VER. 09]

- Decodorul de instrucțiuni – recunoaște instrucțiunile din program și comandă circuitele interne în funcție de acestea;

- Unitatea Aritmetică Logică (ALU) – realizează calculele din interiorul CPU;
- Acumulatorul – memorează operațiile efectuate și rezultatele de la ALU.

Alte circuite componente sunt memoria de tip ROM, memoria de tip RAM, convertorul analogic-digital și cel digital-analogic, oscilatorul intern, circuite de temporizare. Arhitectura internă a microcontrolerului PIC 16F877 este prezentată în figura 3.63:

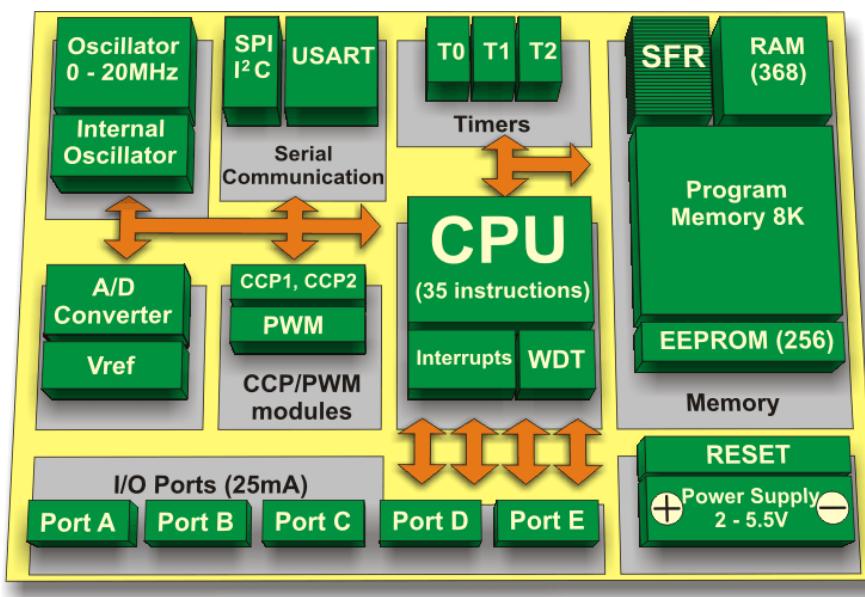


Figura 3.63 – Arhitectura microcontrolerului PIC 16F877 [VER. 09]

Am ales acest tip de microcontroler pentru sistemul MPPT, studiat în continuare, din următoarele considerații tehnice și funcționale, necesare achiziției datelor, procesării lor cu ajutorul rețelelor neuronale artificiale, transmiterii impulsurilor către circuitul MPPT și transmiterea lor în rețea cu protocolul RS-485:

- memorie ROM 8K și tehnologie Flash (permite rescrierea memoriei de un număr practic infinit de ori);
- 368 bytes de memorie RAM;
- convertor analogic-digital cu 14 canale și rezoluție de 10 biți;
- are modul USART incorporat ce permite protocolul RS-485;

- oscilator integrat și calibrat cu posibilitate de selectare a frecvenței de funcționare de la 8 MHz la 31 KHz.

Un microcontroler dispune de mai multe protocoale de comunicație: I2C (Inter Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interface Bus) și USART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Pentru aplicația studiată am folosit protocolul de comunicație RS232, implementat cu modulul USART, pentru simplitatea sa constructivă și funcțională. Această conexiune este asincronă, în sensul că nu se folosește o linie specială de sincronizare cu ceasul interior al microcontrolerului. Sincronizarea transmițătorului și a receptorului se face la o viteză predefinită. Am ales acest protocol și pentru faptul că informațiile transmise nu au o dimensiune mare, iar viteza de transmitere este suficientă, anume 1 Mbit/sec.

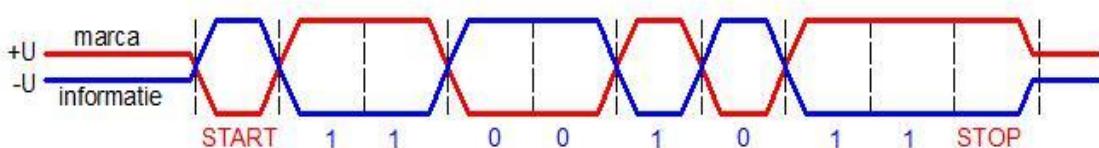


Figura 3.64 – Transmiterea datelor prin RS-485 [VER. 09]

Transmiterea datelor prin RS-485 presupune utilizarea unui format standard numit „non-return-to-zero” (NRZ). În figura 3.64 este prezentat un sir de 8 biți transmiși cu ajutorul modulului USART. În stare inactivă (idle), linia de comunicație are starea logică 1. Începerea transmisiei sau a recepționării unei informații presupune un bit de start, care este întotdeauna bitul 0. Sfârșitul transmisiei sau a recepționării este marcată întotdeauna de bitul 1.

4.3 Modelarea și simularea unui sistem de comandă MPPT cu microcontroler PIC 16F877

Câmpurile fotovoltaice sunt construite, în general, prin legarea în serie și în paralel a mai multor module PV. Legarea în serie se face pentru a mări tensiunea disponibilă, iar legarea în paralel pentru a mări curentul produs. La bornele unei astfel de instalații se montează modulul de urmărire a punctului maxim de putere (MPPT). Acesta realizează o adaptare a sarcinii la generatorul PV (subcapitolul 2).

Scopul sistemului de comandă MPPT cu algoritm RNA este de a menține punctul de funcționare al fiecărui panou PV al unui câmp la punctul maxim de putere. În comparație cu alte tipuri de algoritm MPPT, cel cu RNA este mult mai stabil și mai precis, după cum am arătat în subcapitolul 3.

Sistemul de comandă MPPT cu microcontroler PIC 16F877 rezolvă următoarele probleme ale instalațiilor cu panouri fotovoltaice:

- Achiziția parametrilor meteorologici și de funcționare ai panoului fotovoltaic BP 585 F (intensitatea radiației solare și temperatura modulului);
- Utilizarea datelor preluate pentru predictia punctului maxim de putere la care panoul ar putea funcționa în condițiile date cu ajutorul modelului RNA;
- Comanda convertorului DC-DC cu impulsuri modulate în durată;
- Transmiterea valorilor tensiunii optime și a curentului optim în rețea utilizând protocolul RS-485, către o unitate centrală de stocare și prelucrare ulterioară;
- Posibilitatea implementării unui sistem MPPT pe fiecare modul dintr-un câmp de panouri.

Am realizat simularea hardware și software, în programul Proteus 7.4. Am scris programul aferent celor două microcontrolere în limbajul de programare C [VER. 09], [BAT. 08], [CCR. 09]. Schema electrică a sistemului pe care l-am conceput este prezentată în figura 3.65 și se compune din următoarele elemente:

- Două rezistențe variabile care modelează traductorul de temperatură a modulului PV și traductorul de intensitate a radiației solare. În realitate aceste traductoare sunt mult mai complexe și presupun o calibrare corespunzătoare. Traductorul de temperatură poate fi o termorezistență sau un termistor cu adaptor (punte Weathstone), un termocuplu cu diverse scheme de compensare etc. Traductorul de intensitate a

radiației solare poate fi un piranometru, o celulă fotovoltaică etalon compensată cu temperatura etc.

- Microcontroler PIC 16F877 cu funcție de achiziție a datelor de la cei doi senzori, calcul al punctului maxim de putere cu modelul RNA studiat în subcapitolul 3, calcul al factorului de umplere α_{opt} conform relațiilor 3.7 și 3.8, generare a semnalului de comandă în impulsuri modulate în durată a convertorului DC-DC, afișarea valorilor U_{opt} și I_{opt} corespunzătoare MPP și transmiterea lor prin rețeaua RS 232.
- Transceiver și driver pentru rețeaua RS 232, MAX232 și respectiv SN75179.
- LCD alfanumeric, pentru afișarea locală a valorilor tensiunii și curentului corespunzătoare MPP.
- Osciloscoape pentru vizualizarea semnalului de comandă și a semnalelor din rețeaua RS232.

Datele de temperatură și intensitate a radiației solare analogice sunt supuse apoi conversiei în digital conform teoriei anterior prezentate cu ajutorul convertorului analogic-digital implementat în interiorul microcontrolerului PIC 16F877.

Odată digitalizate cele două valori reprezintă intrarea modelului neuronal artificial care va genera la ieșirea sa valorile optime ale tensiunii și curentului, corespunzătoare punctului de putere maximă la care panoul ar trebui să funcționeze. Pe baza lor se calculează factorul de umplere α_{opt} și se generează semnalul de comandă al convertorului DC-DC.

Datele calculate de rețeaua neuronală artificială sunt transmise în rețeaua RS-485 către o unitate centrală, simulată cu un alt microcontroler PIC 16F877. Funcționarea rețelei RS-485 poate fi vizualizată în figura 3.66, iar semnalul de comandă generat, în figura 3.67:

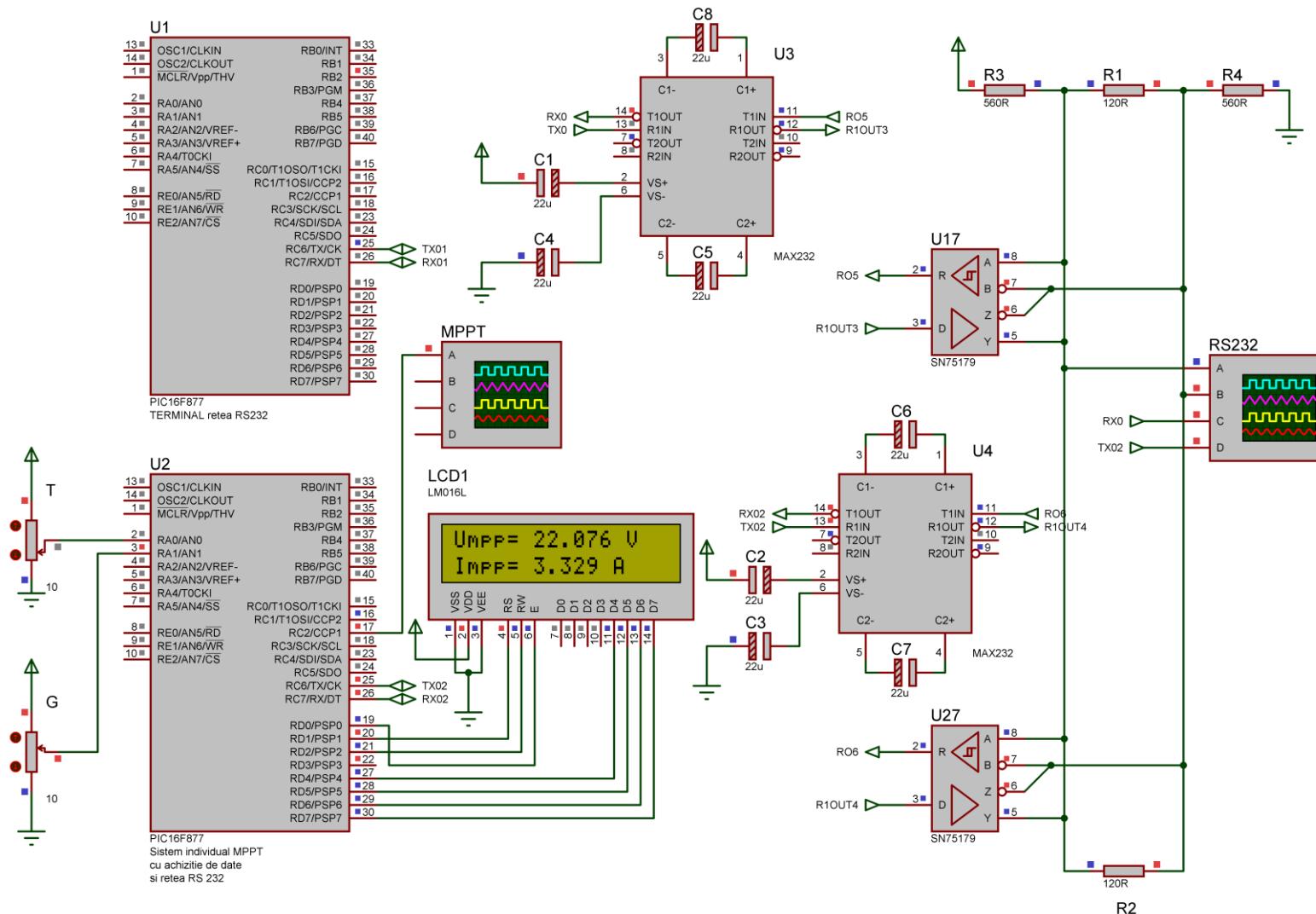


Figura 3.65 – Schema electrică a sistemului de comandă MPPT cu PIC 16F877

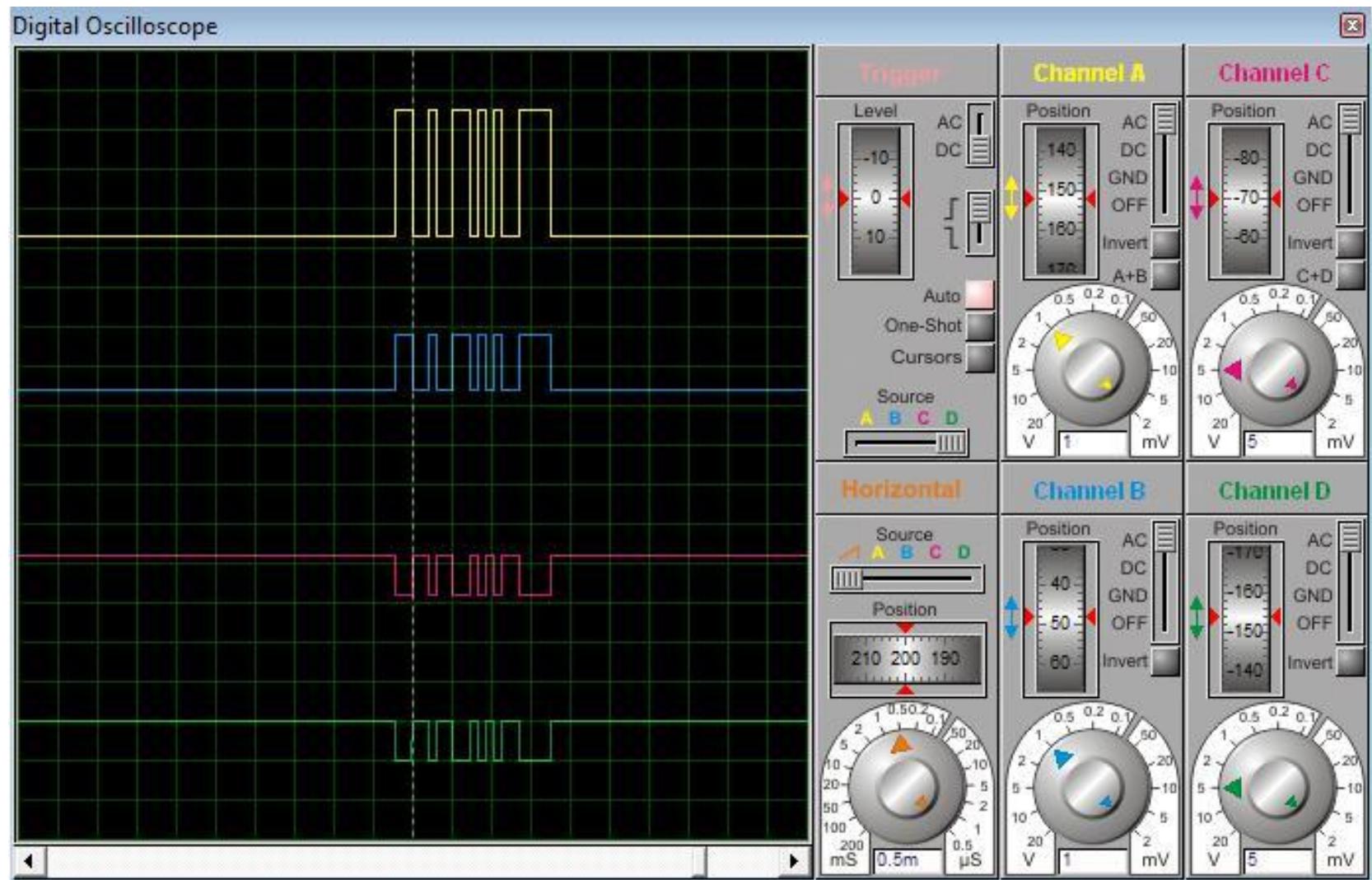


Figura 3.66 – Vizualizarea transmiterii datelor în rețeaua RS-485

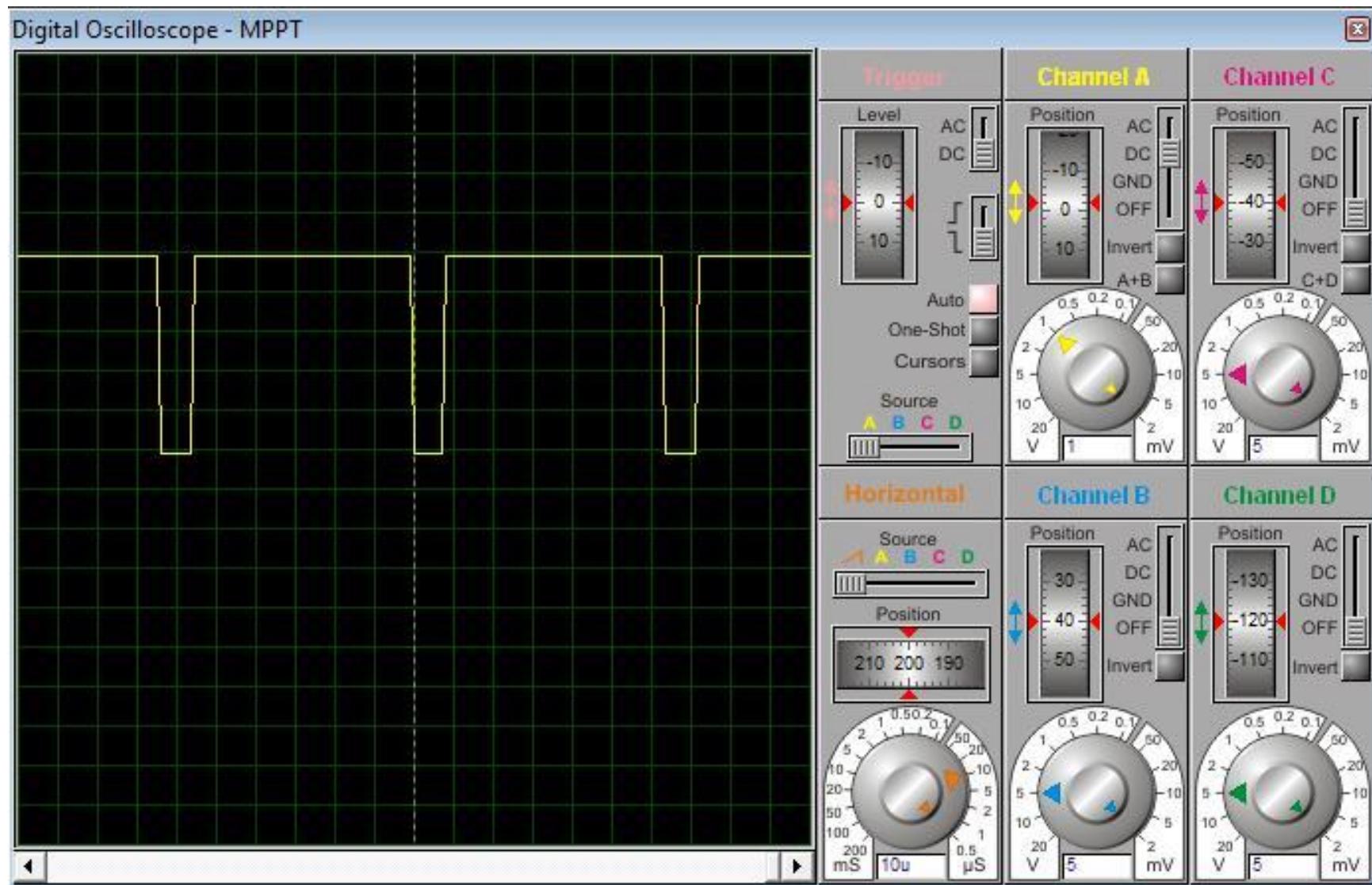


Figura 3.67 – Vizualizarea comenzi convertorului DC-DC tip „Boost”

5. Concluzii parțiale capitolul III

Rețelele neuronale artificiale au o gamă variată de aplicabilitate în domeniul energiilor regenerabile. Aplicațiile sunt dintre cele mai diverse, de la predicția potențialului solar, la modelarea parametrilor modelului simplă diodă al unei celule fotovoltaice și a semnalului de comandă al convertizoarelor DC-DC. Tipul de rețea cel mai des utilizat este cea feed-forward, antrenată cu una din metodele cu propagare inversă a erorii.

Problema panourilor fotovoltaice este randamentul conversiei energiei solare în energie electrică. De asemenea punctul de funcționare al unui panou, ce se găsește la intersecția dintre curba de funcționare a panoului și curba sarcinii sale de la borne, este în general diferit de punctul de putere maximă la care panoul poate să funcționeze. Există astfel mai multe tipuri de algoritm de urmărire a punctului de putere maximă, dar pe lângă faptul că acestea prezintă oscilații în regim staționar, ele pot chiar să funcționeze greșit în cazul unor schimbări brusă ale parametrilor meteorologici. În același timp, nu este tratat cazul umbririi care implică pierderi energetice importante.

De asemenea, modulele fotovoltaice operează în condiții exterioare reale, iar în afara informațiilor oferite de producători, se conturează necesitatea implementării sistemelor de achiziție de date. Există diverse sisteme de achiziție de date disponibile pe piață. Printre primele sisteme de achiziție de date se numără sistemele cu microcontroler, care prezintă avantajul fiabilității și robustei. Alte sisteme se bazează pe dispozitive data-logging, comune, pentru toată instalația sau independente, pentru elemente componente ale acesteia.

Am studiat diverse tipuri de arhitecturi de rețele neuronale artificiale statice, cât și două tipuri de algoritm de antrenare des utilizate, în vederea obținerii unui model optim pentru a caracteriza funcționarea în punctul maxim de putere a panoului fotovoltaic BP 585 F. Am validat modelul RNA optim obținut cu date experimentale și am comparat performanțele acestuia cu modelul analitic simplă diodă. Rezultatele arată o bună acuratețe pentru ambele modele și posibilitatea implementării modelului RNA pe PIC 16 F877.

Am achiziționat datele necesare antrenării RNA și validării modelului pentru un modul BP 585 F. După o analiză a sistemelor de achiziție de date disponibile și un studiu al aspectelor teoretice privind achiziția și prelucrarea datelor, prezentul capitol se îndreaptă către instalația de achiziție și prelucrare a datelor montată la laboratorul UMR CNRS 6134. Această instalație preia parametrii de funcționare ai panourilor fotovoltaice, mono-cristaline și amorfă, instalate pe trei fațade cu orientări diferite. Sunt achiziționate în același timp și date meteorologice, cum ar fi intensitatea radiației solare și temperatura ambientă, ce au o influență majoră în funcționarea modulelor. Am studiat arhitectura și modul de funcționare al acestei instalații, dar și a altor tipuri de sisteme de achiziție a datelor pentru module PV.

Am implementat în final modelul RNA pe microcontrolerul PIC 16F877. Aceasta preia parametrii de funcționare ai sistemului de la traductoare și generează pe baza modelului RNA semnalul în impulsuri modulate în durată necesar convertorului DC-DC. Datele privind MPP sunt apoi transmise către o unitate centrală prin protocolul RS-485.

CAPITOLUL IV

Recuperarea energiei în sistemele fotovoltaice hibride

1. Stadiul actual al utilizării sistemelor fotovoltaice hibride

O direcție importantă în domeniul sistemelor de producere a energiei cu panouri fotovoltaice este eficientizarea tehnică și economică a acestora prin recuperarea energiei. Este bine cunoscut faptul că doar o mică parte din radiația solară se transformă în energie electrică, restul contribuind la creșterea temperaturii sistemului, reducându-i totodată randamentul. În vederea minimizării consecințelor acestui fenomen și al recuperării căldurii, s-au construit și s-au studiat mai multe tipuri de sisteme numite hibride, care pe lângă energie electrică produc fie apă caldă cu temperatură joasă, fie aer cald. Recuperarea căldurii și scăderea temperaturii celulelor fotovoltaice conduce la eficientizarea producerii energiei electrice, cât și la optimizarea sistemului energetic. S-au studiat de asemenea sisteme integrate în clădiri (BIPV) și sisteme PV cu concentrator al radiației solare. În acest ultim caz temperatura celulelor este un parametru esențial pentru funcționarea eficientă a sistemului.

Încălzirea celulelor PV conduce la scăderea randamentului de producere a energiei electrice datorită existenței agitației termice și în consecință a măririi rezistenței electrice. În figura 4.1 se poate observa influența temperaturii asupra puterii electrice produsă de o celulă PV. La o variație de 1°C corespunde o variație de aproximativ 0,01 W, în condițiile în care puterea maximă pe care o poate livra o celulă se situează în jurul valorii de 3 W.

În vedea estimării eficienței energetice a unui sistem fotovoltaic este necesar, pe lângă studiul electric și studiul termic al sistemului. Există mai multe metode de a calcula temperatura celulei PV cum ar fi: bilanțul energetic al sistemului, utilizând un parametru determinat empiric [MAT. 06] sau pornind de la temperatura de pe fața posterioară a modulului PV, știind viteza vântului și alți parametri empirici [KIN. 98].

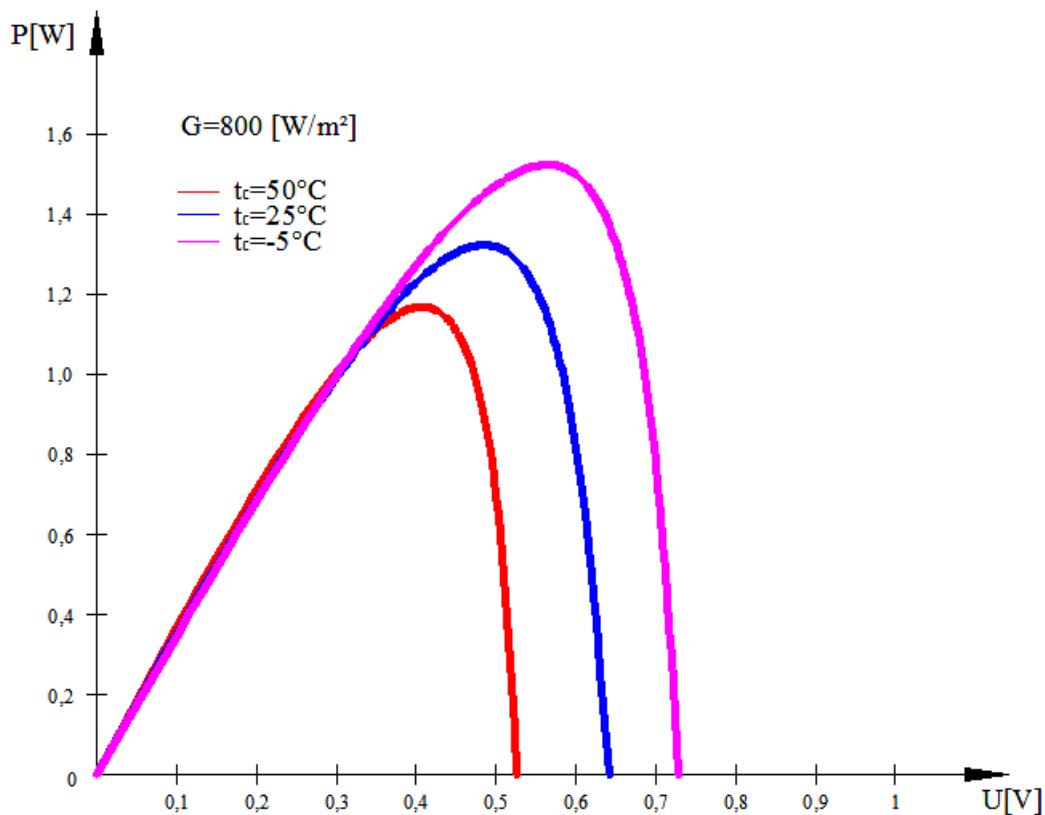


Figura 4.1 – Influența temperaturii asupra puterii electrice furnizată de o celulă PV

În lucrarea lui Tina și Scrofani [TIN. 08] este cuplat un model electric cu un model termic în vederea determinării temperaturii modului PV pe baza datelor experimentale: viteza și direcția vântului, umiditatea relativă și punctul de funcționare. Modelul electric ales este cel simplă diodă (capitolul III), iar parametrii necesari rezolvării (R_s , R_p , n) lui au fost determinați prin calarea curbei I-V modelată peste cea experimentală prin metoda celor mai mici pătrate.

În vederea studiului comportării energetice globale, modelul termic este construit ținând cont de straturile componente ale unui modul PV și realizând pentru fiecare strat în parte bilanțul termic. Acest model permite evaluarea temperaturii celulelor și poate fi utilizat în diverse scopuri, cum ar fi sistemele de urmărire a punctului maxim de putere sau monitorizarea eficienței energetice a sistemului. Secțiunea printr-un modul PV și modelul termic echivalent sunt prezentate în fig. 4.2.

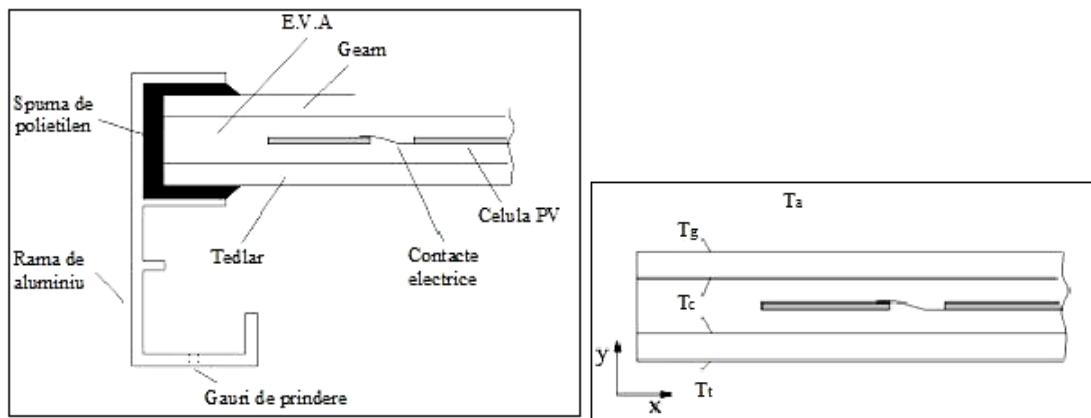


Figura 4.2 – Secțiune printr-un modul PV (stânga) și model termic (dreapta)

S-au făcut următoarele ipoteze simplificatoare:

- temperatura este considerată uniformă de-a lungul axei x în fiecare strat și variază doar în lungul axei y; din acest motiv s-a adoptat un model bidimensional;
- capacitatea termică a straturilor este considerată neglijabilă.

Considerând structura panoului PV formată din trei straturi (geam, celulă PV și Tedlar), bilanțul termic a fost realizat pe baza următoarelor ecuații (4.1), (4.2), (4.3):

$$\alpha_g G + \left(\frac{\lambda_g}{\delta_g} \right) (T_c - T_g) = h_{cga} (T_g - T_a) + h_{rgs} (T_g - T_{cer}) \quad (4.1)$$

$$\left(\frac{\tau_g \alpha_c}{(1 - (1 - \alpha_c)(1 - \tau_g))} - \eta \right) \cdot G = \left(\frac{\lambda_g}{\delta_g} \right) \cdot (T_c - T_g) + \left(\frac{\lambda_t}{\delta_t} \right) \cdot (T_c - T_t) \quad (4.2)$$

$$\left(\frac{\lambda_t}{\delta_t} \right) \cdot (T_c - T_t) = h_{cta} (T_t - T_a) \quad (4.3)$$

Rezolvarea celor trei ecuații conduce la determinarea temperaturii celulei PV T_c , parametrii considerați fiind: $\alpha_g = 0,03$, $\tau_g = 0,86$, $\alpha_{pv} = 0,86$, $\lambda_g = 1,4 \text{ W/mK}$, $\lambda_t = 0,06 \text{ W/mK}$. Valorile coeficientilor convectivi și radiativi nu sunt precizați în această lucrare.

În urma simulărilor s-au obținut următoarele rezultate:

- atât modelul electric, cât și cel termic au fost validate pe baza datelor experimentale;
- s-a concluzionat că parametrii modelelor variază cu parametrii ambienti;
- se poate utiliza media valorilor pentru fiecare parametru în parte;
- modelul obținut poate fi utilizat în vederea studiilor de optimizare a sistemelor fotovoltaice.

Deși este un model complex, studiul convecției termice la nivelul fețelor panoului a fost puțin abordat. De asemenea problema radiației și a transformării acesteia în energie electrică și termică nu este îndeajuns aprofundată. Aplicabilitatea acestui tip de model în sisteme MPPT poate pune probleme din perspectiva complexității și a dificultății de implementare algoritmica.

Modelul termic propus în lucrarea [ZAU. 06] pleacă de la bilanțul energetic al sistemului după cum urmează:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} + \dot{q}''' \quad (4.4)$$

unde \dot{q}_{in} este fluxul de căldură primit de la soare, \dot{q}_{out} este fluxul evacuat și \dot{q}''' este fluxul produs (egalat cu zero în acest caz) [BUR. 93].

Tinând seama de faptul că nu se generează căldură în interiorul panoului și că termenul \dot{q}_{out} este compus din căldura pierdută prin radiație de lungime de undă scurtă și lungă (\dot{q}_{sw} și \dot{q}_{lw}), căldura pierdută sub formă convectivă \dot{q}_{conv} și radiație convertită în electricitate P_{out} , ecuația 4.4 devine:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{lw} + \dot{q}_{sw} + \dot{q}_{conv} - P_{out} \quad (4.5)$$

Pentru termenul ρc_p s-a adoptat o valoare medie, în funcție de materialele din care este fabricat panoul [NOT 05]. Termenul ce reprezintă radiația de lungime mare de undă se poate scrie din relația Stefan-Boltzmann:

$$\dot{q}_{lw} = A \cdot \sigma \left[\frac{1 + \cos \theta}{2} \cdot \varepsilon_{cer} \cdot T_{cer}^4 + \frac{1 - \cos \theta}{2} \cdot \varepsilon_{pământ} \cdot T_{pământ}^4 - \varepsilon_{panou} \cdot T_{panou}^4 \right] \quad (4.6)$$

unde θ este unghiul dintre panou și pământ [JON 01]. Radiația de lungime mică de undă este exprimată prin relația:

$$\dot{q}_{sw} = \alpha \cdot G \cdot A \quad (4.7)$$

Cantitatea de căldură pierdută prin convecție este exprimată în funcție de diferența de temperatură dintre panou și aerul înconjurător prin expresia:

$$\dot{q}_{conv} = -A \cdot (h_{c,natural} + h_{c,fortat}) \cdot (T_{panou} - T_{aer}) \quad (4.8)$$

Acest model folosește la studiul posibilităților de reducere a temperaturii celulelor, în vederea creșterii randamentului de producere a energiei electrice. Printre primele sugestii au fost montarea conductelor de răcire pe spatele panoului și sisteme hibride PV-T cu recuperare a căldurii sub formă de agent termic de joasă temperatură. Această lucrare este doar un studiu teoretic și analitic asupra fenomenelor termice ce au loc la nivelul unui modul PV.

În lucrarea lui Armstrong și Hurley [ARM. 10] se propune un model termic al unui panou PV în vederea simulării răspunsului său în timp, datorat schimbării parametrilor atmosferici. Autorii precizează că un studiu în condiții staționare nu poate să surprindă fenomenele tranzitorii ce au loc la nivelul straturilor modulului PV. Datorită schimbărilor meteorologice rapide, un studiu în condiții staționare, privind temperatura de lucru a celulelor PV, nu se justifică deoarece timpul de răspuns devine semnificativ datorită masei panoului PV.

Se propune o abordare și o analiză a fiecărui fenomen de transfer termic în parte: conducție, convecție și radiație, având la bază relațiile (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8). Scopul modelului este de a surprinde fenomenele termice, ținând cont de condițiile atmosferice, materialele componente și condițiile de montare, aspecte care nu pot fi bine incorporate în experimente realizate în laborator. Acest model studiază în detaliu convecția și radiația la nivelul suprafețelor panoului, dar nu ține cont de înclinarea acestuia față de orizontală, aspect important pentru convecția liberă. Scopul final al modelului este de a calcula constanta de timp a panoului.

Modelul a fost aplicat pentru trei viteze diferite ale vântului, iar răspunsul panoului PV a fost calculat și măsurat pentru schimbări ale intensității radiației solare de cel puțin 600 W/m^2 . Având în vedere că schimbările intensității radiației solare se produc de obicei în intervale scurte de timp, faptul că modelul calculează constanta de timp cu o precizie de 13.98% și că eroarea medie este de 7.26% se pot considera niște valori bune. Sunt prezentate de asemenea valorile coeficienților de transfer termic prin convecție naturală și forțată, rezistențele echivalente ale panoului PV și constantele de timp ale modulului.

Moshfegh și Sandberg [MOS. 98] au studiat curgerea în spatele unui panou PV cu CFD și alte metode numerice, Brinkworth [BEN. 98] a investigat mai multe ecuații și modele de transfer de căldură pentru calculul acestei curgeri, iar eficiența panourilor PV integrate clădirilor a fost studiată în particular de Fuentes și Roaf [FUE. 97] și Emery [EME. 96]. În ciuda capacitații termice scăzute, un sistem cu aer este mult mai ieftin și mai simplu de instalat. În același timp nu se adaugă încărcări suplimentare acoperișului.

Studiind fenomenele de transfer termic și curgerea aerului la nivelul fetelor unui panou PV integrat într-un acoperiș, lucrarea lui M.D. Bazilian [BAZ. 02] își propune calculul temperaturii aerului la ieșirea formată dintr-un panou și un perete, prezintând totodată și dependența dintre unghiul de inclinare a panoului PV și viteza aerului în cazul unui scenariu cu convecție naturală ca în figura 4.3.

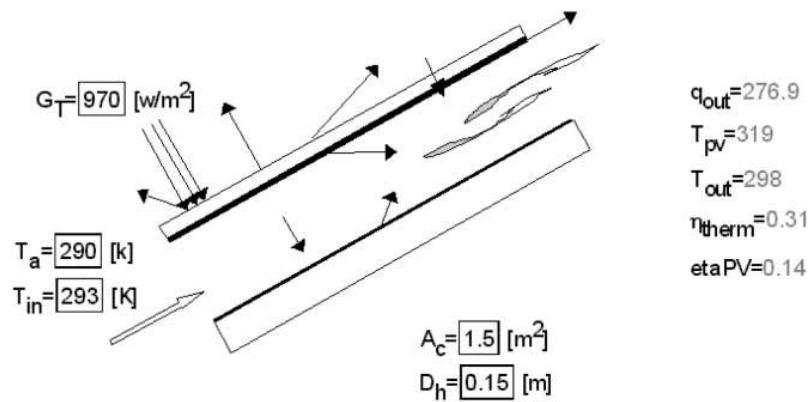


Figura 4.3 – Modelul termic al panoului PV integrat clădirii

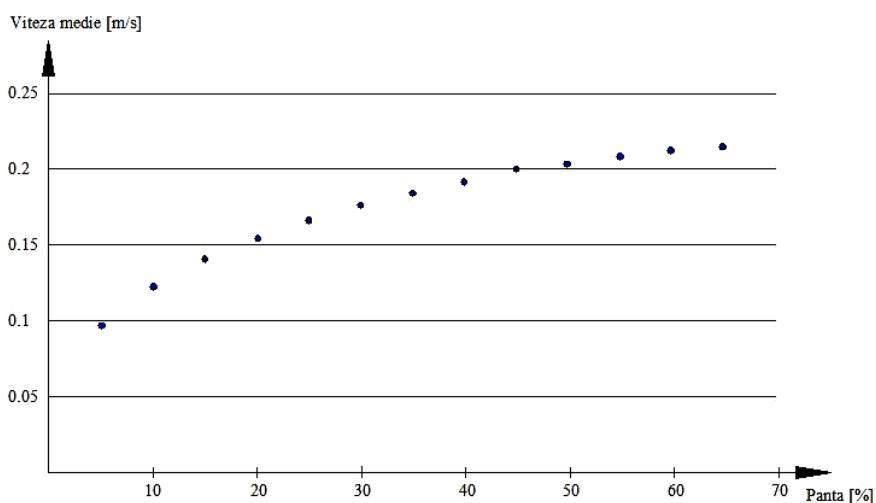


Figura 4.4 – Influența pantei panoului PV asupra vitezei aerului

Validarea modelului a fost făcută pentru date meteorologice preluate timp de 8760 ore. Rezultatele arată acuratețea modelului în ceea ce privește temperatura aerului ($R^2 = 0.9881$) și pentru temperatura celulelor ($R^2 = 0.956$).

Acste rezultate conduc către ideea necesității unui studiu amănunțit al fenomenului convecției ce are loc pe fețele panoului, dar și studiul posibilității recuperării energiei termice folosind alte mijloace, decât cele utilizate în sistemele hibride existente.

În lucrarea lui Moshfegh și Sandberg [MOS. 98] este studiat mecanismul de transfer de căldură prin convecție și prin radiație într-un canal vertical. Înălțimea canalului este de 7 m și lățimea de 0,23 m. Acest studiu servește la modelarea transferului termic dintre un perete format din panouri fotovoltaice și peretele de

montaj. Fluxul de căldură este generat de o folie de metal atașată unuia dintre pereți. Sunt considerate mai multe valori ale fluxului de căldură, cât și emisivitățile suprafețelor pereților pentru studia efectul lor asupra transferului termic la nivelul stratului de aer. Experimentele au fost făcute pentru fluxuri de 20, 30, 50, 100, 200 și 300 W/m^2 . Geometria și condițiile la limită sunt prezentate în figura 4.5

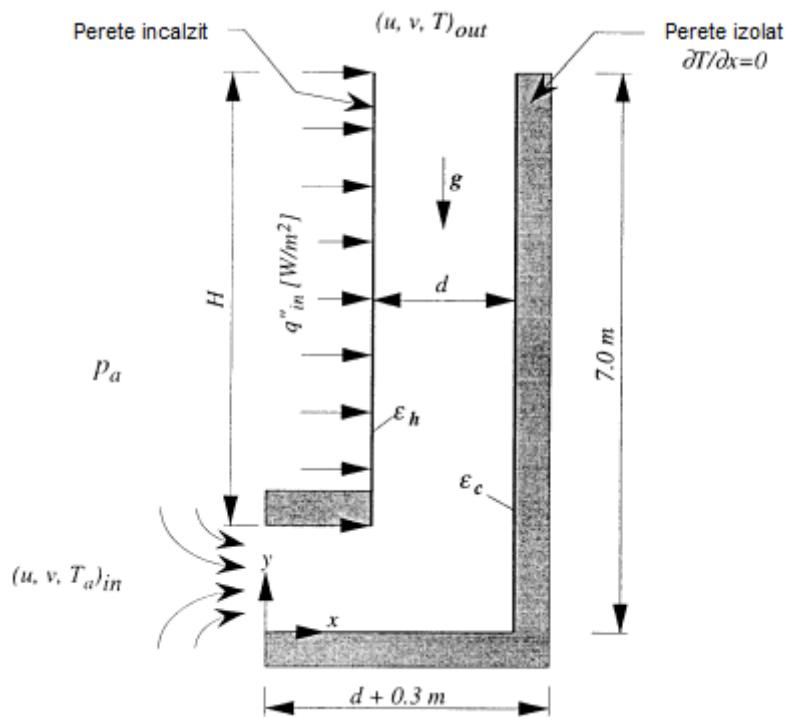


Figura 4.5 – Geometria și condițiile la limită pentru modelul numeric [MOS. 98]

Simulările au fost realizate cu CFD, iar rezultatele arată profilul vitezelor și al temperaturilor aerului la ieșirea din canal, ca în figura 4.6.

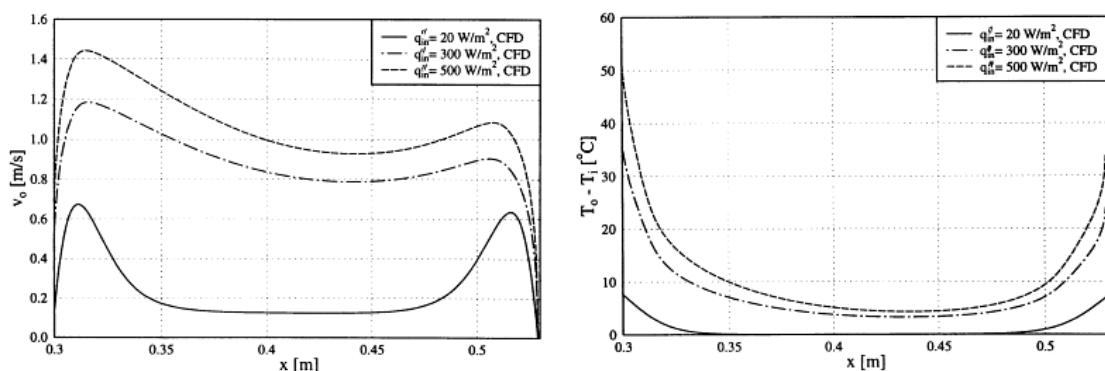


Figura 4.6 – Profilul vitezelor (stânga) și profilul temperaturilor (dreapta)

2. Studiul fenomenelor termice convective și radiative aplicate panourilor fotovoltaice

2.1 Convecția liberă

Promotorul fenomenului de convecție liberă sau naturală se datorează efectelor conjugate ale diferenței de densitate și a câmpului gravitațional. Energia necesară mișcării fluidului nu este adusă din exterior, ci își regăsește sursa în fluidul susceptibil de o astfel de mișcare. Variațiile densității sunt asociate unui gradient de temperatură, forțelor de accelerare (în centrifuge) sau Coriolis (în schimbările atmosferice). De asemenea existența unui gradient de concentrație poate juca un rol asemănător.

În studiul convecției libere se pot distinge patru mari categorii de curgeri:

1. difuzie, când nu există perete de proximitate;
2. convecție liberă externă, în prezența unui perete;
3. convecție liberă internă, în spații limitate cu o intrare și o ieșire;
4. convecție liberă în incinte închise sau parțial deschise [PAD. 97].

Fiind un fenomen natural, este evident faptul că în viața de zi cu zi suntem aproape în fiecare moment martorii unui astfel de fenomen, cu toate că nu îl sesizăm de fiecare dată. Spre exemplu, într-o încăpere, aerul se încălzește și se răcește de-a lungul pereților de diferite temperaturi, dând naștere unui fenomen de mișcare a fluidului în acea incintă. De asemenea se pot menționa și fenomenele ce au loc în atmosfera terestră, datorate în aceeași măsură diferențelor de temperatură ale diverselor straturi atmosferice și forței gravitaționale. Astfel se poate observa vastitatea domeniilor de aplicabilitate al acestui fenomen.

Datorită faptului că variațiile de densitate sunt datorate variațiilor de temperatură, există o legătură structurală între bilanțul cantitatii de mișcare și bilanțul energetic, adică între câmpul de viteze și cel de temperatură.

Un aspect important, specific convecției libere îl constituie faptul că vitezele atinse sunt destul de mici, în consecință și fluxul termic este modest. Astfel, convecția naturală poate fi privită fie ca un obstacol, când se dorește ameliorarea schimbului termic, fie ca un izolator natural, când se dorește contrariul.

Trebuie menționat și faptul că o diferență de densitate nu conduce automat la un fenomen de convecție naturală. Este exemplul bine cunoscut a două plăci orizontale, cea superioară fiind mai caldă. În acest caz schimbul termic rămâne în cea mai mare măsură conductiv.

Aspectele fizice cele mai importante sunt cele ce se petrec la proximitatea peretelui, unde se regăsesc structuri ale stratului limită [PAD. 97], [BIA. 04].

Ecuațiile generale ale convecției libere

Dat fiind faptul că din punct de vedere practic, cel mai important aspect al fenomenului de convecție în general este calculul fluxului de căldură ce tranzitează între fluide și pereții solizi, pornind de la conceptul de strat limită termic și de la condiția de viteză nulă la perete, se poate considera că în vecinătatea acestuia fenomenul dominant este conducția termică, exprimată prin legea lui Fourier:

$$\varphi_p = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (4.9)$$

$$\varphi_p = h \cdot (T_p - T_\infty) \quad (4.10)$$

Se poate considera astfel că transferul termic între fluid și perete are loc printr-un film de rezistență $1/h$. Studiul fenomenului de convecție presupune determinarea mărimilor caracteristice fluidului, în toate punctele și în orice moment:

- câmpul de viteze;
- câmpul de temperaturi;
- densitatea și presiunea.

Pentru a studia fenomenul de convecție liberă se fac următoarele ipoteze ce caracterizează comportarea fluidului:

- variațiile de densitate sunt mici și mediul poate fi considerat izocor, dar sunt suficient de mari pentru a pune în mișcare fluidul;
- gradientul de temperatură este legat mai mult de diferența de temperatură, decât de ecartul de presiune datorat mișcării fluidului (ipoteza lui Boussinesq).

Se poate considera astfel că densitatea este fie constantă, fie dependentă de temperatură și independentă de presiune. Dacă T_∞ este temperatura fluidului și β este coeficientul de dilatare a fluidului, densitatea ρ este o funcție liniară descrescătoare de temperatură:

$$\rho = \rho_\infty [1 - \beta(T - T_\infty)] \quad (4.11)$$

Bilanțul de masă se exprimă prin ecuația de continuitate:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4.12)$$

Ecuația conservării energiei:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = -(\nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau} : \mathbf{S} - \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \left[\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p \right] + \dot{q}_V \quad (4.13)$$

unde $\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \nabla T$ reprezintă fluxul de căldură pe unitatea de suprafață.

Ecuația conservării momentului:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{f}_V \quad (4.14)$$

unde $\boldsymbol{\tau} = 2\eta \mathbf{S} - \frac{2}{3}\eta(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}$ reprezintă ipoteza lui Stoke, $\mathbf{S} = \frac{1}{2}[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T]$ este rata tensorului tensiunilor și $\mathbf{f}_V = (\rho_\infty - \rho)\mathbf{g}$ este forța pe unitatea de volum [PAD. 97], [BIR 02], [BUR 05].

Stratul limită în convecția liberă

Pentru a pune în evidență experimental existența stratului limită se consideră o placă plană verticală, având o temperatură constantă și uniformă la suprafața sa T_p . Fluidul ambient imobil ($U_\infty = 0$) și temperatura sa uniformă T_∞ . Pentru vizualizarea curgerii se utilizează un trisor la nivelul bordului de atac. Se poate observa astfel existența a două regimuri de curgere: curgere laminară în apropierea bordului de atac și apoi curgere turbulentă. Dacă se măsoară câmpul de viteze după direcția x , în lungul plăcii se poate evidenția fenomenul de strat limită dinamic, adică o creștere a vitezei de la valoarea zero, la limita plăcii, la o valoare maximă și apoi înapoi către zero. Acest fenomen este legat de vâscozitatea fluidului în care se găsește imersată placa. În figura 4.7 este reprezentat calitativ profilul vitezelor pentru o placă verticală.

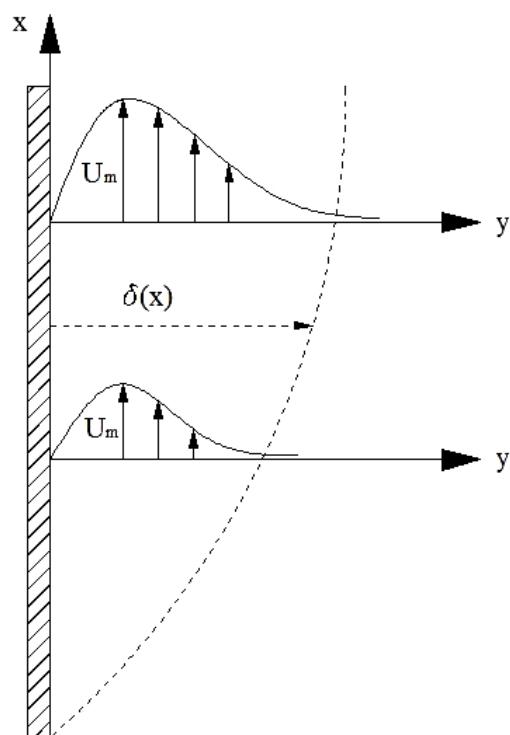


Figura 4.7 – Profilul vitezelor pentru o curgere în convecție liberă.

Din cauză că nu ne putem raporta la viteza de referință a fluidului ($U_\infty = 0$), pentru a defini noțiunea de grosime a stratului limită, ne raportăm la viteza maximă, astfel $U(\delta) = 0,01 U_m$. Nu este un caz ideal, deoarece U_m depinde de x . De

asemenea valoarea vitezelor în cazul convecției libere este mică și în consecință $0,01U_m$ este greu de apreciat corect. Grosimea stratului limită se dovedește a nu fi un concept operațional în studiul convecției libere, decât în cazul metodei semi-integrală a lui Karman-Pohlhausen. Se observă și existența stratului limită termic, unde profilul de temperaturi are același aspect ca și în cazul convecției forțate (figura 4.8). Se remarcă faptul că T variază repede spre perete și apoi tinde asymptotic spre temperatura fluidului T_∞ .

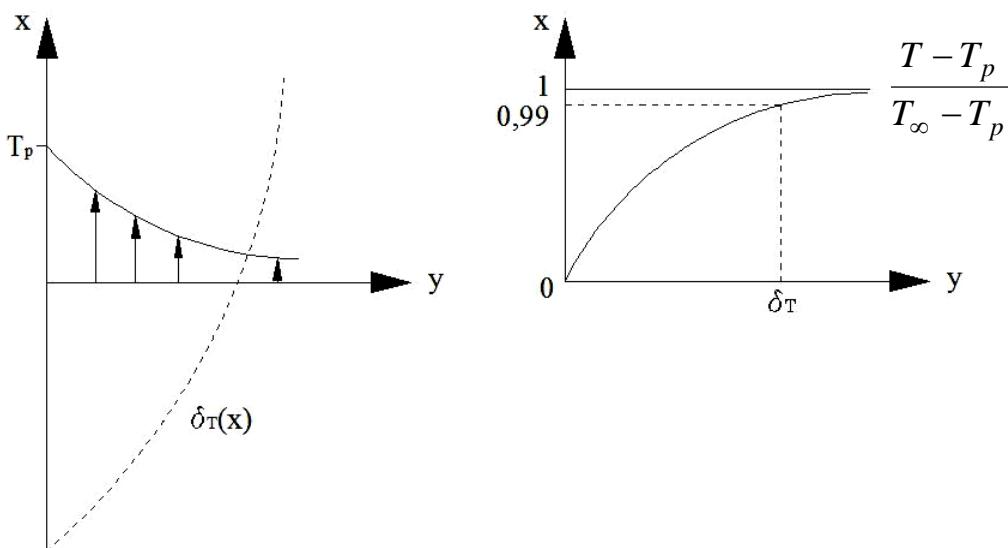


Figura 4.8 – Stratul limită termic în convecția liberă: profil de temperaturi (stânga) și profil adimensional (dreapta)

Criterii de similitudine

Adimensionalizarea se realizează în funcție de alegerea mărimilor de referință. Acestea pot fi cele de la nivelul curgerii sau cele de la nivelul peretelui. Problema constă în alegerea acestei referințe. Dacă în cazul convecției forțate, există o mișcare a fluidului independentă de temperatură, în convecția liberă nu mai este așa ușor să se găsească o viteză de referință, mișcarea fiind asociată gradientului de temperatură. Se caută un termen omogen cu viteza și pentru că promotorul mișcării îl constituie gradientul de temperatură și dilatarea fluidului este de preferat să se aleagă un element de referință pertinent din această zonă [PAD. 97], [BIA. 04].

Relativ la forțele de volum reprezentate de termenul $g\beta(T - T_\infty)$, criteriul de similitudine este numărul lui Richardson:

$$\Gamma_\beta = Ri = \frac{g\beta\Delta T^0 L^0}{(U^0)^2} \quad (4.15)$$

Deoarece în cazul convecției libere nu avem viteză de referință măsurabilă, alegem $U^0 = (g\beta\Delta T^0 L^0)^{1/2}$, ceea ce convine cu fenomenul în sine, β și ΔT^0 fiind la originea fenomenului. În acest fel $\Gamma_\beta = 1$, ceea ce satisfacă similitudinea față de forțele de origine termică la scara 1:1.

În ceea ce privește forțele de vâscozitate, criteriul de similitudine se determină pornind de la criteriul Γ_v , astfel: $\Gamma_{vl} = \frac{\nu}{U^0 L^0} \Rightarrow \Gamma_{vl} = \frac{\nu}{(g\beta\Delta T^0)^{1/2} (L^0)^{3/2}}$. În locul acestui criteriu, se scrie numărul lui Grashof:

$$Gr = \frac{l}{\Gamma_{vl}^2} = \frac{g\beta\Delta T^0 (L^0)^3}{\nu^2} \quad (4.16)$$

În ceea ce privește sursele de căldură, cu referire la curgere se folosește numărul lui Boussinesq:

$$Bo = \frac{l}{\Gamma_{al}^2} = \frac{g\beta\Delta T^0 (L^0)^3}{a^2} \quad (4.17)$$

Dacă facem referire la perete se folosește în practică numărul lui Nusselt:

$$Nu = \frac{\varphi_p \cdot L^0}{\lambda \cdot \Delta T^0} \quad (4.18)$$

Convecția naturală de-a lungul unei plăci plane verticale

Se consideră o placă plană verticală a cărei temperatură T_p este superioară temperaturii T_∞ a fluidului înconjurător. În zona plăcii, datorită transferului termic, fluidul cu o temperatură mai ridicată are o tendință ascensională de-a lungul plăcii. Se presupune că fluidul are o vâscozitate mică, cum ar fi în general aerul sau apa, și din acest motiv numărul lui Grashof are o valoare mare. În acest caz efectele de inerție sunt preponderente și curgerea datorată convecției naturale rămâne importantă în stratul limită parietal. Acest strat limită este asemănător cu un jet de-a lungul unui perete, accelerat de forțele lui Arhimede în ascensiunea sa. Tranzitia de la curgerea laminară către cea turbulentă este cuantificată de numărul lui Grashof Gr_x local sau numărul lui Rayleigh local Ra_x [17,18].

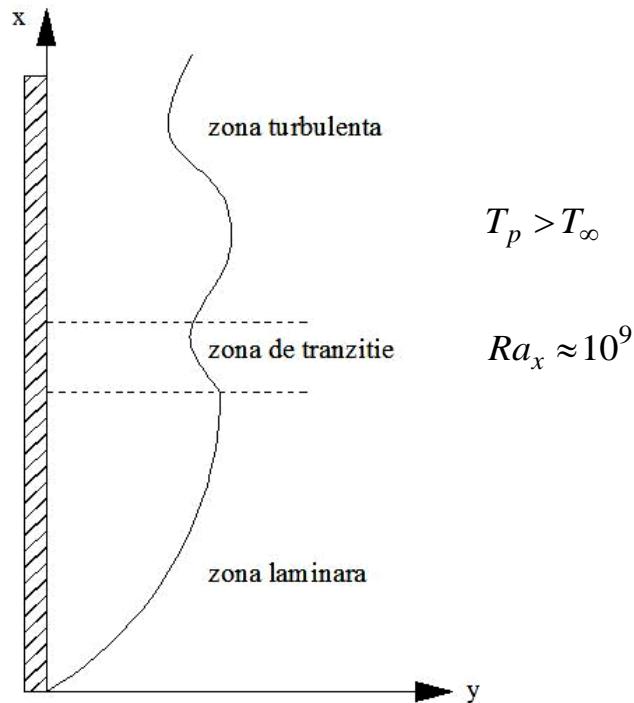


Figura 4.9 – Schema convecției libere de-a lungul unei plăci plane verticale

Expresiile numerelor lui Grashof și Rayleigh au următoarea formă:

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_p - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad \text{și} \quad Ra_x = \frac{g\beta(T_p - T_\infty)x^3}{\nu a} = Gr_x Pr \quad (4.19)$$

a) analiza părții laminare a stratului limită ($x < x_c$)

Zona laminară a curgerii se analizează în ipotezele stratului limită ale lui Prandtl. Curgerea este bidimensională, iar placa infinită în direcția Ox. În regim permanent și presupunând curgerea aproape paralelă cu peretele, ecuațiile mișcării și energiei au următoarele forme:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.20)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho g \beta (T - T_{\infty}) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4.21)$$

$$\frac{dp}{dx} + \rho g = 0 \quad (4.22)$$

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4.23)$$

Condițiile la limită sunt următoarele:

- $y = 0 : \quad T(x,0) = T_p \quad u(x,0) = v(x,0) = 0$

- $y = \infty : \quad T(x,\infty) = T_{\infty} \quad u(x,\infty) = 0$

Se definesc viteza tipică U^0 și grosimea stratului limită ca fiind:

$$U^0 = (4g\beta(T_p - T_{\infty})x)^{1/2} \quad \delta = \left(\frac{4vx}{U^0} \right)^{1/2} = x \left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{-1/4} \quad (4.24)$$

Soluția numerică a sistemului se obține prin metoda Runge-Kutta de ordinul patru, curgerea prezentându-se sub forma unui jet parietal de-a lungul plăcii. Se pun în evidență influența numărului lui Prandtl și faptul că distribuția de temperatură difuzează foarte puțin în fluid și descrește foarte repede odată cu depărtarea față de perete. Fluxul de căldură este obținut din legea lui Fourier:

$$\varphi_p = h(T_p - T_\infty) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = -\lambda \frac{(T_p - T_\infty)}{\delta} \Theta'(0) \quad (4.25)$$

Prin identificare se obține numărul lui Nusselt local și coeficientul de transfer termic h :

$$h = -\frac{\lambda}{x} \left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4} \Theta'(0) \quad \text{și} \quad Nu_x = \frac{hx}{\lambda} = -\left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4} \Theta'(0) \quad (4.26)$$

b) analiza părții turbulentă a stratului limită ($x \geq x_c$)

În ceea ce privește această parte a curgerii se poate menționa faptul că există mai multe formule empirice pentru a estima numărul lui Nusselt global. Aceste relații sunt mai mult sau mai puțin precise și sunt aplicabile pentru valori $Ra_x > 10^9$. Pentru valori mari ale numărului lui Rayleigh se demonstrează că h devine independent de scara de lungime L [PAD. 97], [BIA. 04].

2.2 Radiația termică

Agitația termică este prezentă în orice corp care se află la o temperatură absolută mai mare de 0K. Această mișcare continuă a particulelor în interiorul substanțelor dă naștere fenomenului de radiație, care se definește ca fiind emisia de energie transportată de unde electomagnetice sau de fotoni. Intensitatea fluxului de energie depinde de temperatura la care se află corpul emitor și de natura suprafeței acestuia. În consecință, radiația termică face parte din spectrul electromagnetic al emisiei de energie și are aceleași proprietăți ca lumina sau undele radio, având asociată o lungime de undă și o frecvență. Emisia de energie de către un corp sub formă de unde electomagnetice datorată temperaturii sale se numește *radiație termică*. Studiul acestui fenomen pornește de la conceptul de corp negru și de la binecunoscuta lege a lui Stefan-Boltzmann, care afirmă că energia emisă de un corp negru este proporțională cu pătratul temperaturii T acestuia:

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (4.27)$$

Corpul negru este un obiect idealizat care lasă radiația electromagnetică să pătrundă în totalitate în interiorul său (nu există radiație reflectată), absoarbe intern toată cantitatea de radiație (nu există radiație transmisă) emite radiație electromagnetică conform legii (4.27), având emisivitatea $\varepsilon = 1$. Pentru un corp real se definește emisivitatea conform ecuației (4.28), iar energia emisă de un corp real este dată de relația (4.29):

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (4.28)$$

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.29)$$

În realitate cantitatea de radiație incidentă de la suprafața unui corp real este o fracțiune absorbită, o fracțiune reflectată și o fracțiune transmisă. Legea de conservare a energiei afirmă că suma acestor trei coeficienți este egală cu unitatea (figura 4.10): $\alpha + \rho + \tau = 1$.

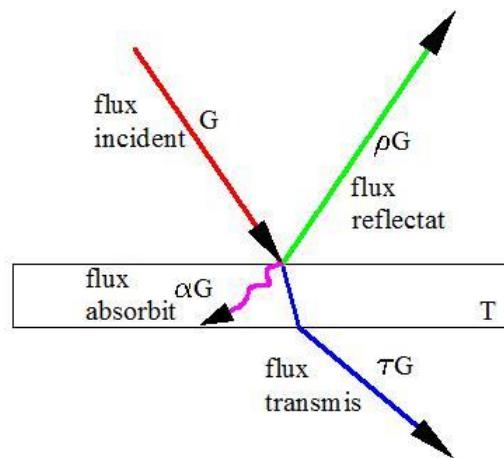


Figura 4.10 – Fragmentele Radiației incidente pe o suprafață plană reală

Se consideră două suprafete plane infinite, având temperaturile T_1 și T_2 . Întrucât ambele au temperaturi absolute pozitive, vor emite energie unul către celălalt. Corpul 2 se consideră a fi un corp negru ideal ($\varepsilon = 1$). Astfel, fluxul de căldură primit de corpul 1 va fi:

$$\dot{q}_1 = \varepsilon_I \cdot \sigma \cdot T_I^4 - \alpha_I \cdot \sigma \cdot T_2^4 \quad (4.30)$$

Se definește intensitatea radiației conform relației (4.31):

$$I = \frac{d\dot{q}}{\cos \theta \cdot dA \cdot d\Omega} \quad (4.31)$$

Tinând cont de relațiile 4.30 și 4.31 și de coordonatele spațiale (figura 4.11) se poate determina fluxul care pleacă de pe o suprafață oarecare și ajunge pe o altă (ambele corpuri negre) după cum urmează:

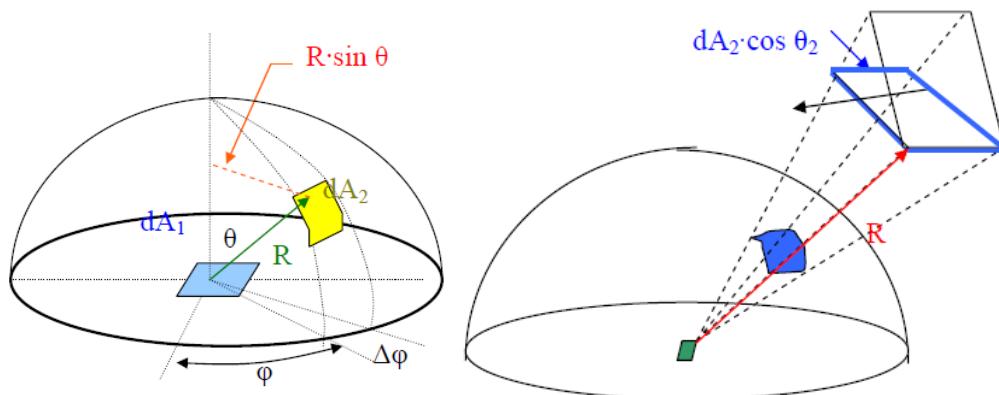


Figura 4.11 – Coordonate spațiale (stânga) și suprafețele în spațiu (dreapta)

$$\dot{q}_{I \rightarrow 2} = \int_{A_2} \int_{A_I} \frac{I \cdot \cos \theta_I \cdot dA_I \cdot \cos \theta_2 \cdot dA_2}{R^2} \quad (4.32)$$

Factorul de formă (pentru corpuri negre) de definește ca fracția de energie care pleacă de pe suprafața 1 și ajunge direct pe suprafața 2, conform relației :

$$F_{I \rightarrow 2} = \frac{1}{A_I} \int_{A_2} \int_{A_I} \frac{\cos \theta_I \cdot \cos \theta_2 \cdot dA_I \cdot dA_2}{\pi R^2} \quad (4.33)$$

În cazul în care se ține cont de proprietățile corpurilor reale și de proprietățile mediului dintre cele două se vorbește despre factorul de transfer.

3. Modelarea transferului termic pentru un panou fotovoltaic BP 585 F

3.1 Metoda elementului finit

Diferitele probleme la limită, împreună cu cerințele reduse de regularitate, conduc la metode de rezolvare aproximative, numite și metode directe. Aplicarea acestor metode transformă problema în găsirea punctelor staționare ale unei funcții de un număr finit de variabile reale. Rezolvarea aproximativă a problemelor la limită pentru ecuații diferențiale și cu derivate parțiale s-a dezvoltat pe trei direcții principale:

- a) *metoda diferențelor finite,*
- b) *metoda elementului finit,*
- c) *metoda elementului de frontieră.*

În metoda diferențelor finite, sistemul de ecuații diferențiale sau cu derivate parțiale valabil pentru orice punct al domeniului de analiză se transformă într-un sistem de ecuații valabile în punctele de pe rețea de discretizare a domeniului.

Dezavantajul principal al acestei metode îl constituie utilizarea unei rețele rectangulare de discretizare a domeniului de analiză. În acest sens folosirea ei pe domenii cu forme deosebite, curbe sau neregulate introduce o serie de dificultăți și de artificii de calcul. Totodată apar numeroase probleme de stabilitate și de convergență a soluțiilor.

În metoda elementului finit, se utilizează, ca punct de plecare un model integral al fenomenului studiat. Această metodă se bazează pe aproximarea locală pe porțiuni sau subdomenii. Datorită folosirii unui model integral ca bază de plecare și a unor seturi de funcții continue pe porțiuni, metoda elementului finit nu mai este condiționată de existența unei rețele rectangulare. Cu ajutorul ei se pot discretiza practic corpuri geometrice oarecare. Datorită performanțelor sale ridicate, metoda

elementului finit a devenit aproape o metodă standard de analiză și proiectare în ingineria construcțiilor și alte domenii.

Aproximarea funcțiilor prin elemente finite

Pe domenii mai complicate, pentru a putea aproxima orice funcție continuă, se utilizează tehnica divizării domeniului în elemente geometrice standard, de obicei triunghiuri sau patrulatere în plan, tetraedre sau paralelipipede în spațiu, și plecând de la valoarea funcției în anumite puncte ale acestor figuri se calculează valoarea aproximativă în interiorul lor prin formule simple de interpolare. Se consideră dreptunghiul următor divizat în triunghiuri.

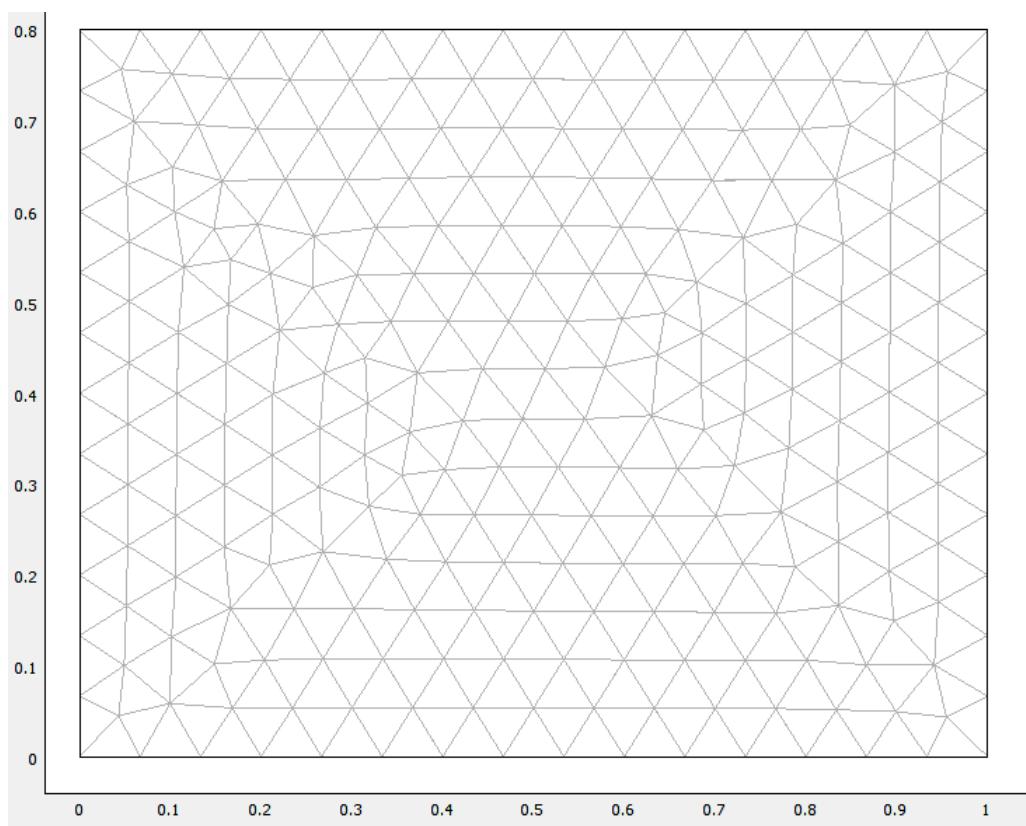


Figura 4.12 – Exemplu de discretizare a domeniului studiat

Se cere să se construiască o funcție f pe domeniu astfel ca:

- în vârfurile triunghiurilor să aibă valori date;
- în toate triunghiurile f să fie dată de formule asemănătoare;

c) pe latura comună formulele definite pentru cele două triunghiuri alăturate să aibă aceleași valori. O metodă mai simplă este să se definească forma funcției în interiorul triunghiului standard: $\{(\xi, \eta) \mid 0 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \eta \leq 1, \xi + \eta \leq 1\}$

Pentru un triunghi oarecare cu vârfurile $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ următoarea aplicație realizează o bijecție cu triunghiul standard astfel ca:

$$(0,0) \rightarrow (x_1, y_1)$$

$$(0,1) \rightarrow (x_2, y_2) \quad (4.36)$$

$$(0,1) \rightarrow (x_3, y_3)$$

$$\varphi(\zeta, \eta) = (x = x_1(-\zeta - \eta) + x_2\zeta + x_3\eta, y = y_1(-\zeta - \eta) + y_2\zeta + y_3\eta) \quad (4.37)$$

După ce funcția $F(\zeta, \eta)$ este definită pe triunghiul standard, definim funcția f pe triunghiul real prin $f(x, y) = F(\varphi^{-1}(x, y))$. Este de remarcat, dat fiind faptul că funcția φ este liniară, aceasta este ușor inversabilă. De asemenea restricția la o latură a triunghiului standard este liniară în raport cu elementul de arc pe acea latură.

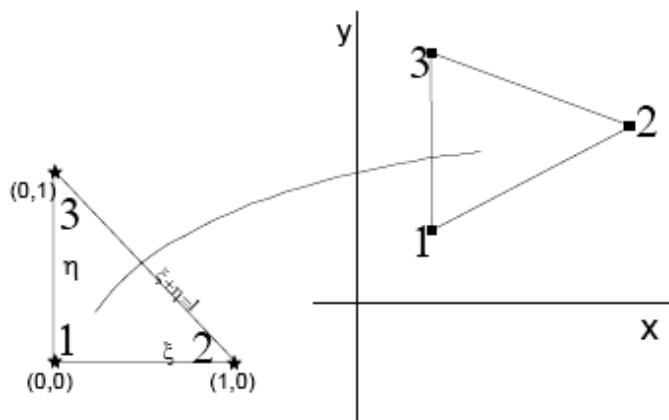


Figura 4.13 – Corespondenta dintre triunghiul standard și cel real

Fie P_1, P_2, \dots, P_n puncte pe elementul standard (inclusiv vâfurile) în care se impun valori predefinite pentru funcție; acestea se numesc în continuare noduri de interpolare.

Construcția funcției pe element depinde de determinarea unor funcții simple $N_1(n, \xi), N_2(n, \xi), \dots, N_n(n, \xi)$ astfel ca:

$$N_i(P_j) = \begin{cases} 1 & \text{daca } i = j \\ 0 & \text{daca } i \neq j \end{cases}$$

Mulțimea acestor funcții se va numi baza de funcții de interpolare. Dacă se cere o funcție pe elementul standard care să ia valorile f_i în nodurile P_i , ca o combinație liniară de funcții din bază, atunci avem $f(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n f_i N_i(\xi, \eta)$.

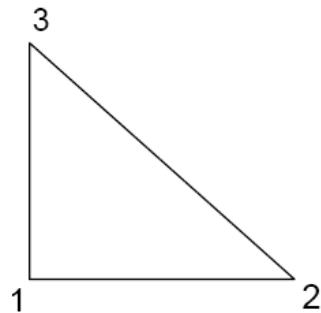


Figura 4.14 – Exemplu element liniar

În exemplul de element liniar nodurile de interpolare sunt vârfurile triunghiului, numerotate cu 1,2 respectiv 3 și coordonatele pe elementul standard (ξ, η) . Se mai utilizează și notația $\lambda = 1 - \xi - \eta$.

Punctul	$N_i(\xi, \eta)$	$\frac{\partial N_i(\xi, \eta)}{\partial \xi}$	$\frac{\partial N_i(\xi, \eta)}{\partial \eta}$
1	$1 - \xi - \eta$	-1	-1
2	ξ	1	0
3	η	0	1

Tabelul 4.1 – Funcții de interpolare și derivatele lor

Definirea bazei de funcții de interpolare, precum și derivatele acestor funcții după ξ și după η , sunt prezentate în tabelul 4.1.

În continuare se studiază felul în care se poate controla construcția unei funcții pe un domeniu divizat în triunghiuri, ca în figura următoare.

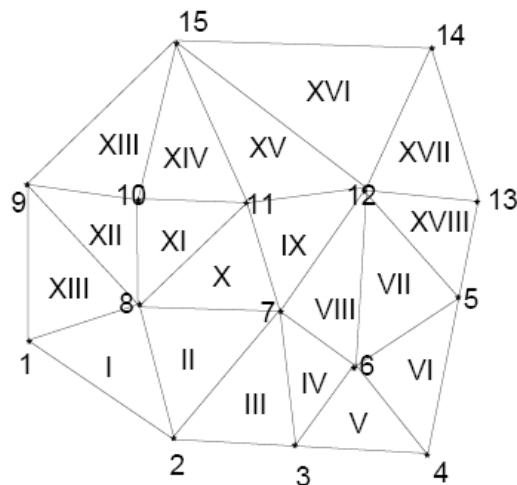


Figura 4.15 – Domeniu divizat în triunghiuri

Nodurile domeniului sunt notate cu cifre arabe de la 1 la $nrnoduri=15$, iar elementele triunghiulare sunt numerotate cu cifre romane de la 1 la $ne=18$. Pe elementul standard se folosește un număr de $npie=3$ puncte de interpolare, care coincid în cazul elementului liniar cu vârfurile triunghiului.

Fiind date valorile $u[i]$, $i=1..nrnoduri$, se construiește o funcție pe domeniul dat care să aibă în nodul i valoarea u_i , pentru orice i , după următoarea procedură:

- i. Se determină triunghiul e în care se găseste punctul (x,y) ;
- ii. Se calculează punctul (ξ, η) de pe triunghiul standard care corespunde punctului (x,y) prin funcția $\varphi(e, \xi, \eta)$, inversând această funcție. Deoarece x și y sunt funcții liniare de ξ și η inversarea se reduce la rezolvarea unui sistem de două ecuații liniare cu două necunoscute.

iii. Valoarea funcției în (x,y) este valoarea interpolată în triunghiul standard care în punctul P_i ia valoarea $u(ig(e, i))$, deoarece punctul P_i corespunde cu nodul din domeniu care are indicele $ig(e, i)$. Valoarea este $\sum_{i=1}^{npie} u(ig(e, i))N_i(\xi, \eta)$.

Funcția construită în acest fel este de gradul întâi în (x,y) pe fiecare triunghi, iar în fiecare nod $k = ig(e, i)$, ia valoarea $u(k) = u(ig(e, i))$. Pe latura comună a două triunghiuri adiacente, atât formula de calcul de pe un triunghi cât și de pe celălalt dau valori egale în vîrfuri și dau funcții de gradul întâi în raport cu parametrul x sau y de pe latură, deci dau aceleasi valori în fiecare punct laturii. Prin urmare nu contează ce triunghiuri se utilizează pentru a determina valorile pe laturi, iar funcția $f(x,y)$ este continuă.

Este utilă o altă prezentare a funcției de interpolare. Pentru aceasta se introduc câteva notații. Se notează cu $N_i^e(x, y)$, funcția definită pe triunghiul e , care în punctul (x,y) din acest triunghi ia valoarea $N_i(\xi, \eta)$. Aici punctul (ξ, η) corespunde cu (x,y) prin transformarea ϕ_e dintre triunghiul standard și triunghiul cu numărul e din domeniu, după cum se poate observa în figura 4.16:

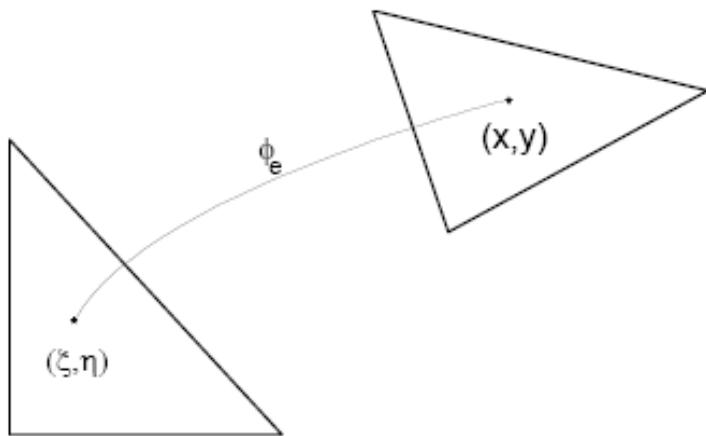


Figura 4.16 – Transformarea ϕ_e

Funcția $N_i^e(x, y)$ ia valoarea 1 în nodul $ig(e, i)$ și valoarea 0 în celelalte noduri ale triunghiului e . Se prelungește funcția $N_i^e(x, y)$ cu 0 în afara triunghiului e . Fie acum k un nod oarecare din domeniu. Se definește funcția:

$$N_i(\zeta, \eta) = N_i^e(x, y) \quad (4.38)$$

$$N_k(x, y) = \sum_{ig(e,i)=k} N_i^e(x, y) \quad (4.39)$$

unde suma este făcută după toate triunghiurile reale e și după acele noduri de pe triunghiul standard i , care corespund cu nodul k din triunghiul e . De asemenea suma trebuie înteleasă ca sumă obișnuită pentru punctele din interiorul triunghiurilor și ca valoarea comună pentru punctele de pe latura a două triunghiuri adiacente. Funcția $N_k(x, y)$ este egală cu 1 în nodul k din domeniu și este zero în celelalte noduri ale domeniului. Ea este diferită de zero doar pe triunghiurile care conțin nodul k . Funcția obținută prin interpolare se scrie sub forma:

$$f(x, y) = \sum_{k=1}^{nrnoduri} u_k N_k(x, y) \quad (4.40)$$

3.2 Modelarea 2D în COMSOL

Studiul termic al unui panou BP 585 F a fost necesar în vederea propunerii de soluții de recuperare a căldurii. Studiul s-a desfășurat după cum urmează:

- modelarea fenomenelor termice pentru un panou PV BP 585 F;
- validarea modelului utilizând date experimentale, preluate la UMR CNRS 6134, Ajaccio, Franța;
- simularea transferului termic prin convecție liberă pentru înclinări diferite ale modulului PV;
- studiul influenței distanței asupra vitezei și asupra temperaturii aerului dintre panou și peretele unde acesta se montează;
- studiul posibilității recuperării căldurii utilizând module Seebeck;
- studiul posibilității de intensificare a schimbului termic dintre modul și aer.

O primă abordare s-a concretizat în modelarea și studiul fenomenelor termice pentru un panou BP 585 F utilizând COMSOL Multiphysics 3.5. Am studiat fenomenele conductive, convective și radiative, ținând seama de construcția panoului BP 585 F. Primul obiectiv a fost de a valida modelul utilizând date experimentale. Odata validat, am folosit acest model pentru simularea diverselor situații de funcționare posibile. Rezultatele arată o bună acuratețe a modelului și o bună concordanță cu rezultatele obținute de Moshfegh și Sandberg [MOS. 98] și de M.D. Bazilian [BAZ. 02].

Scopul principal este determinarea câmpului de temperaturi și a câmpului de viteze și evoluția acestora în interiorul canalului format dintr-un panou PV și peretele de montaj.

Concluziile acestui studiu reflectă posibilitatea implementării modulelor termoelectrice pe spatele panourilor PV, cât și locația unde acestea se pot instala.

Definirea geometriei panoului BP 585 F în COMSOL

COMSOL Multiphysics este un mediu de simulare ce facilitează toți pașii care trebuie urmați în modelarea unui fenomen fizic complex:

- definirea geometriei modelului;
- discretizarea spațiului;
- specificarea fenomenelor fizice care au loc;
- rezolvarea ecuațiilor diferențiale ce guvernează fenomenele fizice studiate;
- vizualizarea și interpretarea rezultatelor.

Modelarea comportării termice a unui panou PV m-Si BP 585 F pornește de la definirea caracteristicilor geometrice ale acestuia. În figura 4.17 sunt prezentate caracteristicile geometrice ale unui panou PV BP 585 F, așa cum sunt ele furnizate de către producător:

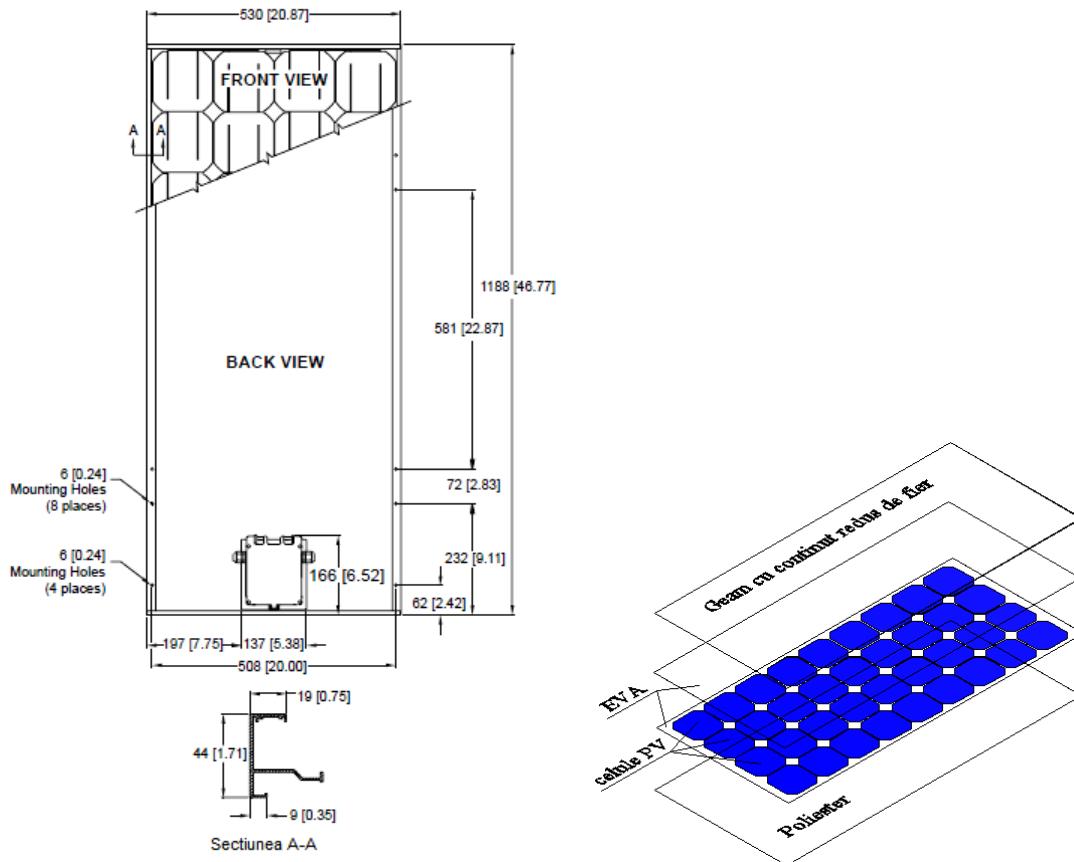


Figura 4.17 – Caracteristicile geometrice ale panoului BP 585 F [WWW. 2]

Straturile componente și proprietățile lor sunt prezentate în tabelul 4.2:

Material	Grosime [mm]	Conductivitate termică k [W/mK]	Densitate [kg/m ³]	Caldură specifică masică c_p [J/kgK]
1. Geam cu conținut mic de fier	3	1,8	3000	500
2. EVA film	1	0,35	960	2090
3. Celula PV	0,15	148	2330	677
4. Poliester alb	1	0.15	1200	1250

Tabelul 4.2 – Proprietățile fizice ale materialelor componente pentru un panou PV BP 585 F

Un astfel de panou este compus din 36 de celule PV m-Si legate în două serii a către 18 celule, fiecare serie având în paralel câte o diodă by-pass de protecție.

Am realizat geometria și construcția modelului panoului în COMSOL conform datelor de catalog ale modulului BP 585 F după cum urmează:

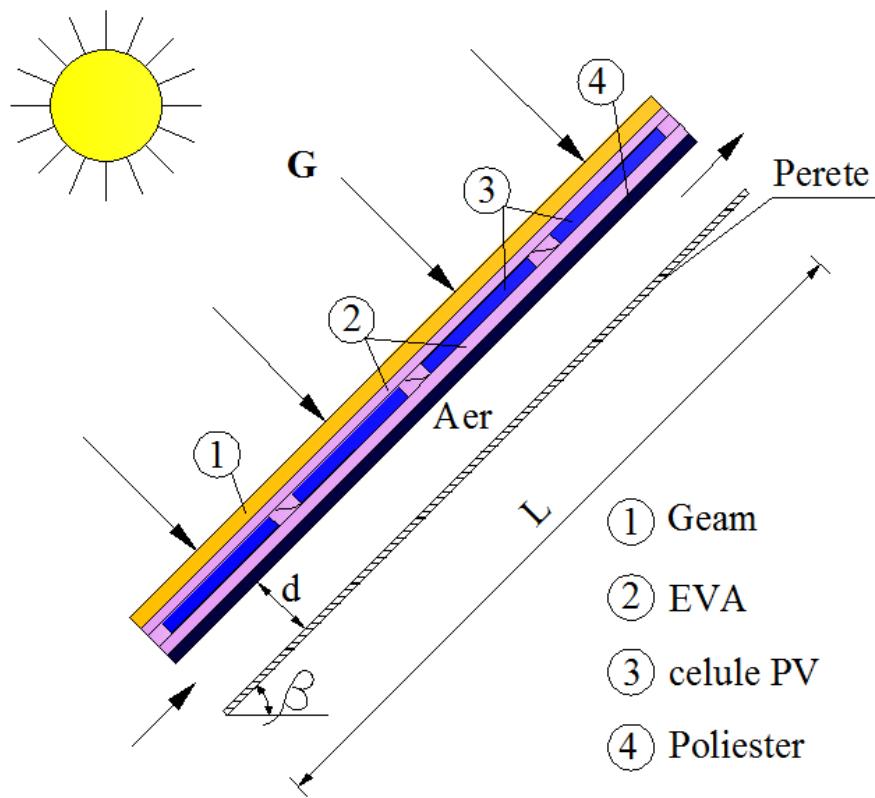


Figura 4.18 – Caracteristicile modelului COMSOL ale panoului BP 585 F

În faza de validare a modelului am folosit în spatele panoului un volum de aer de control pentru a reprezenta aerul înconjurător conform metodei experimentale de măsură a parametrilor de funcționare (conform capitolului 3.1.4 – Sistemul PV-KLA). Alegerea dimensiunilor corecte ale acestui volum pentru convecția naturală este dificilă. Acest volum influențează modelul, rețeaua de discretizare, convergența și în mod special curgerea în sine. În realitate, aerul înconjurător este reprezentat de atmosfera terestră, în cazul panourilor PV. Pentru a realiza un domeniu asemănător, care să nu influențeze soluția finală, a fost necesară prevederea direcției curgerii, comportarea și condițiile termice. În cazul unui panou PV încălzirea aerului la contactul cu modulul PV produce o deplasare ascendentă a acestuia, datorită diferenței de densitate concomitent cu o răcire a suprafeței datorată convecției naturale. Acest lucru presupune că aerul intră pe la baza inferioară a panoului, între acesta având temperatură ambiantă și presiunea atmosferică. La suprafața expusă la soare au loc concomitent fenomenul de convecție și cel de radiație. Am ales

volumul de control prin încercări repetate, astfel încât să se respecte condițiile impuse curgerii.

Sistemul de ecuații

Rezolvarea modelului presupune atât bilanțul energetic la nivelul panoului în contact cu mediul său exterior, cât și ecuațiile de curgere a aerului de-a lungul panoului.

Ipoteze simplificatoare

- Panoul este considerat foarte subțire și schimbul termic pe fețele laterale este considerat neglijabil;
- Proprietățile materialelor sunt independente de temperatură;
- Multiplele reflexii între componente (în particular între celulele PV și geam) și radiația dintre celule și geam sunt considerate neglijabile;

Ecuațiile ce guvernează fenomenele termice sunt următoarele [BIR 02], [BUR 05]:

- Ecuația de conservare a masei (4.12)
- Conservarea energiei (4.13)
- Ecuația de conservare a momentului (4.14)
- Ecuația de stare pentru gaze ideale

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (4.41)$$

Condiții la limită

- Pe suprafața modulului, expusă la soare, condiția la limită convectiv-radiativă este [HOW. 10]:

$$-n(-k\nabla T) = G + h(T_a - T) + \alpha\sigma(T_a^4 - T^4) \quad (4.42)$$

- Pe suprafața inferioară a modulului deoarece am considerat fenomenul de convecție liberă, tensiunea totală pe granițele de intrare și de ieșire a aerului din zona panoului este zero (granițe deschise):

$$\left[-p\mathbf{I} + \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) - \frac{2\eta}{3} (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] \mathbf{n} = 0 \quad (4.43)$$

ceea ce implică $p \equiv 0$.

- Fluxul convectiv către granița superioară este calculat conform ecuației:

$$-\mathbf{n}(-k\nabla T) = 0 \quad (4.44)$$

- Conversia de energie la nivelul celulei PV este modelată ca o sursă de absorbție de căldură:

$$\dot{q}_V = -(\tau G) \cdot \eta_{EC} \cdot \frac{A_C}{V_C} \quad (4.45)$$

- Randamentul de conversie a fluxului radiativ în energie electrică este de 0,13.

Pentru validarea modelului în concordanță cu sistemul de achiziție a datelor experimentale, am realizat simulările, neglijând fenomenul de radiație dintre panoul PV și peretele de montaj, iar volumul de aer considerat între panou și perete este suficient de mare pentru a nu influența curgerea convectivă și suficient de mic pentru a rămâne în domeniul laminar. Pentru a putea caracteriza curgerea și pentru construcția modelului am evaluat numărul lui Grashof. Acesta se situează în jurul valorii de $7.6 \cdot 10^6$.

Pentru simulările ulterioare, am considerat panoul montat la diferite distanțe față de un perete, iar în acest caz am modelat schimbul termic prin radiație, între panou și perete, considerând următoarele ecuații:

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon_{B-W} \sigma (T_B^4 - T_W^4) \quad (4.46)$$

unde

$$\varepsilon_{B-W} = \frac{I}{\frac{I-\varepsilon_B}{\varepsilon_B} + \frac{I}{F_{B-W}} + \frac{I-\varepsilon_W}{\varepsilon_W}} \quad (4.47)$$

Factorul de vedere F_{B-W} dintre suprafața inferioară a panoului PV și peretele de montaj corespunde cazului a două dreptunghiuri identice, paralele, având expresia analitică [HOW. 10] în funcție de raportul dintre lungimea dreptunghiului și grosimea canalului ($X = L_1/\delta_{B-W}$, $Y = L_2/\delta_{B-W}$):

$$F_{B-W}(X, Y) = \frac{2}{\pi XY} \left\{ \ln \left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right]^{1/2} + X \sqrt{1+Y^2} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right. \\ \left. + Y \sqrt{1+X^2} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} - X \tan^{-1} X - Y \tan^{-1} Y \right\} \quad (4.48)$$

Modelul calculează câmpul de temperaturi și de viteze dintre spatele panoului fotovoltaic și peretele unde acesta este montat. Am considerat următoarele proprietăți ale aerului înconjurător (tabelul 4.3):

Proprietate	Valoare
Vâscozitatea dinamică	$1.77 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Densitatea	1.178 kg/m^3

Tabelul 4.3 – Proprietățile aerului la 293K și 1 atm

3.3 Simulări și rezultate în COMSOL Multiphysics

Datele experimentale au fost preluate pe 21 februarie 2010, de la ora 10:00 la ora 17:00. Modulul BP 585 F a fost orientat către Sud, la o înclinare de $\beta = 45^\circ$, sprijinit astfel încât pe suprafața inferioară să aibă loc numai fenomenul de transfer

termic convectiv. Temperatura aerului ambiant, temperatura modulului și intensitatea radiației solare sunt prezentate în figura 4.19. În figura 4.20 sunt reprezentate valorile simulate și valorile experimentale ale temperaturii modulului PV.

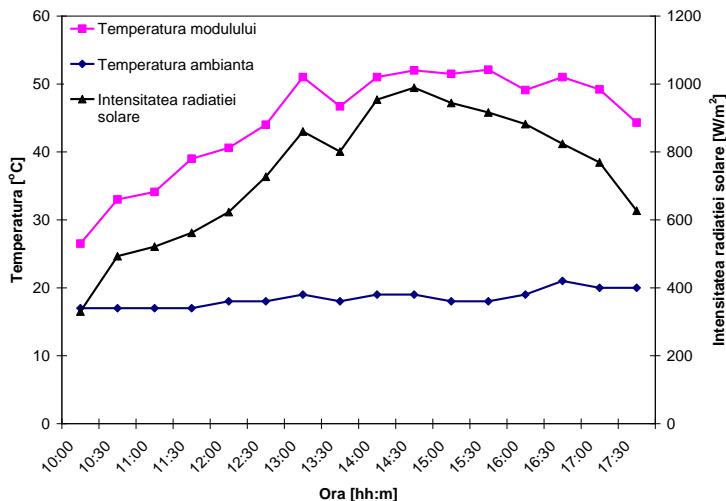


Figura 4.19 – Date experimentale

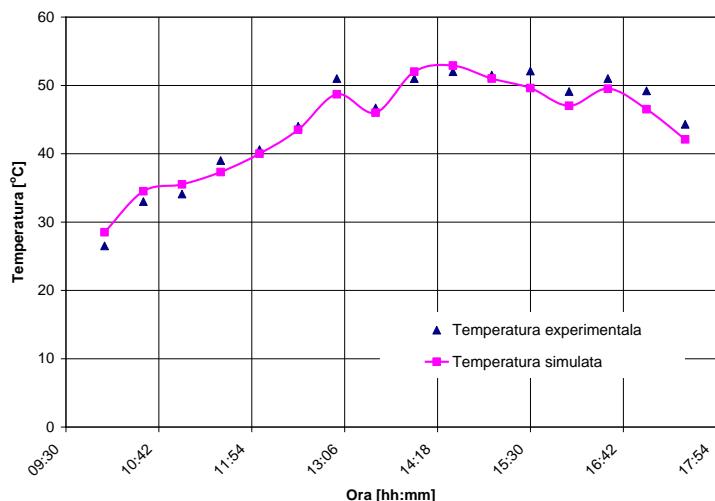


Figura 4.20 – Valorile experimentale și simulate ale temperaturii modulului

Se observă din figura 4.20 că punctele experimentale și cele simulate au aproximativ aceleași valori, dar pentru a estima acuratețea modelului, am folosit testele statistice (eroarea pătratică medie și coeficientul de corelație – capitolul 3.3)

Valoarea de 0,983, a coeficientului de corelație, arată o bună acuratețe a modelului, între datele experimentale și cele simulate. Valoarea erorii pătratice medii

de $1,66^{\circ}\text{C}$ este acceptabilă, în condițiile în care intervalul de variație a temperaturii este de $25,6^{\circ}\text{C}$.

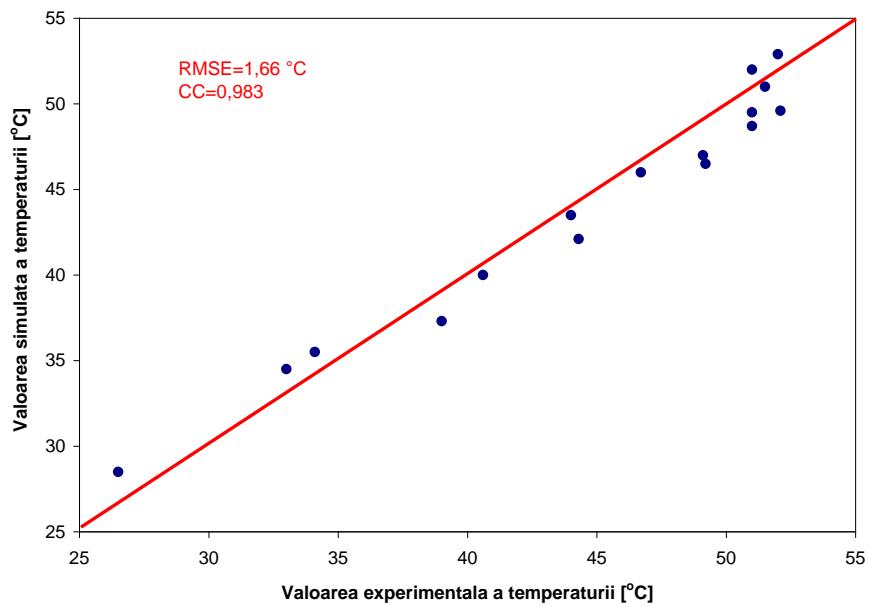


Figura 4.21 – Validarea modelului pentru temperaturi

După faza de validare, am considerat pentru simulări datele de la ora 15:00. Pentru a studia potențialul termic și influența distanței de montaj a panoului PV față de un perete înclinat la $\beta = 45^{\circ}$, am rezolvat sistemul de ecuații considerat pentru distanțe de 10 mm, 20 mm și 30 mm. Rezultatele sunt prezentate în figurile 4.22, 4.23 și 4.24, în grafice adimensionale de temperatură și viteză, pentru trei secțiuni prin canalul dintre panou și perete (la început $L = 3,5\text{cm}$, în zona de mijloc $L = 28\text{cm}$ și la ieșirea din canal $L = 53\text{cm}$).

Vitezele și temperaturile sunt reprezentate de la panou la perete. Profilul vitezelor și al temperaturilor aerului se datorează celor două straturi limită formate, unul la panou și unul la perete. Se poate observa că atât distanța măsurată de la intrarea aerului în canal, cât și grosimea acestuia influențează câmpurile de viteză și temperatură. Profilul de viteză și temperatură este cu atât mai uniform cu cât suntem mai aproape de secțiunea de intrare a aerului. Către ieșire variația celor doi parametri este mai importantă.

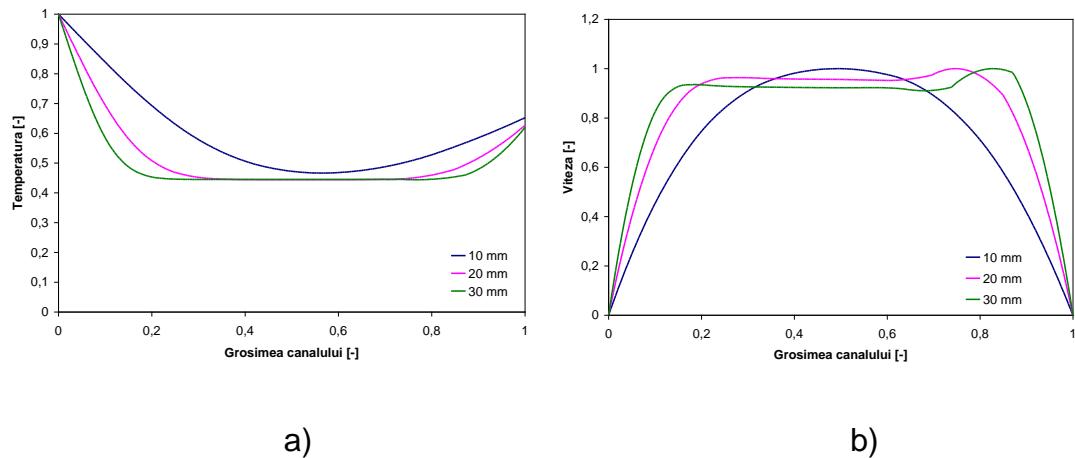


Figura 4.22 – Câmpurile de temperatură (a) și de viteză (b) adimensionale
la $L = 3,5\text{cm}$

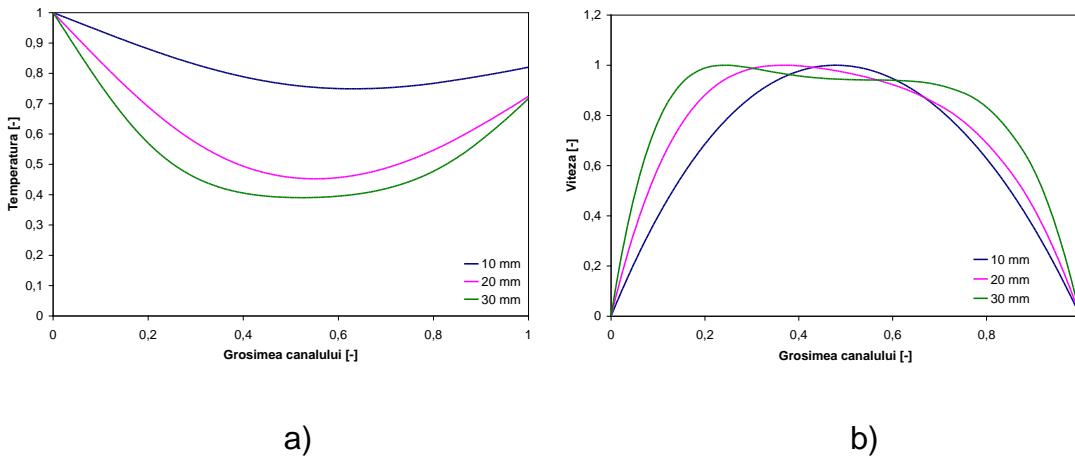


Figura 4.22 – Câmpurile de temperatură (a) și de viteză (b) adimensionale
la $L = 28\text{cm}$

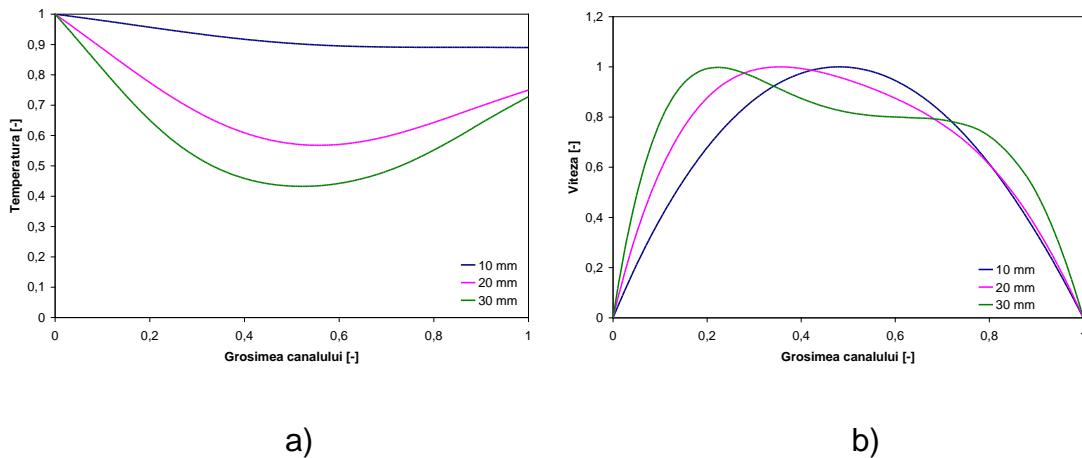


Figura 4.22 – Câmpurile de temperatură (a) și de viteză (b) adimensionale
la $L = 53\text{cm}$

În cazul creșterii grosimii canalului (a distanței de montaj față de perete) temperatura medie a aerului în secțiunea de ieșire variază de la 50°C la 30°C și respectiv viteza medie de la $0,21 \text{ m/s}$ la $0,29 \text{ m/s}$.

Corespunzător celor trei distanțe de montaj, în figurile 4.23, 4.24 și 4.25 sunt reprezentate straturile limită, așa cum se formează ele datorită diferenței de temperatură și a forțelor ascensionale.

În figura 4.26 se poate observa influența pantei de înclinare a panoului asupra vitezei medii și a temperaturii medii în secțiunea de ieșire. După cum era de așteptat cu cât unghiul de înclinare este mai mare cu atât viteza medie a aerului este mai mare, iar temperatura sa mai mică, datorită fenomenului de transfer termic convectiv.

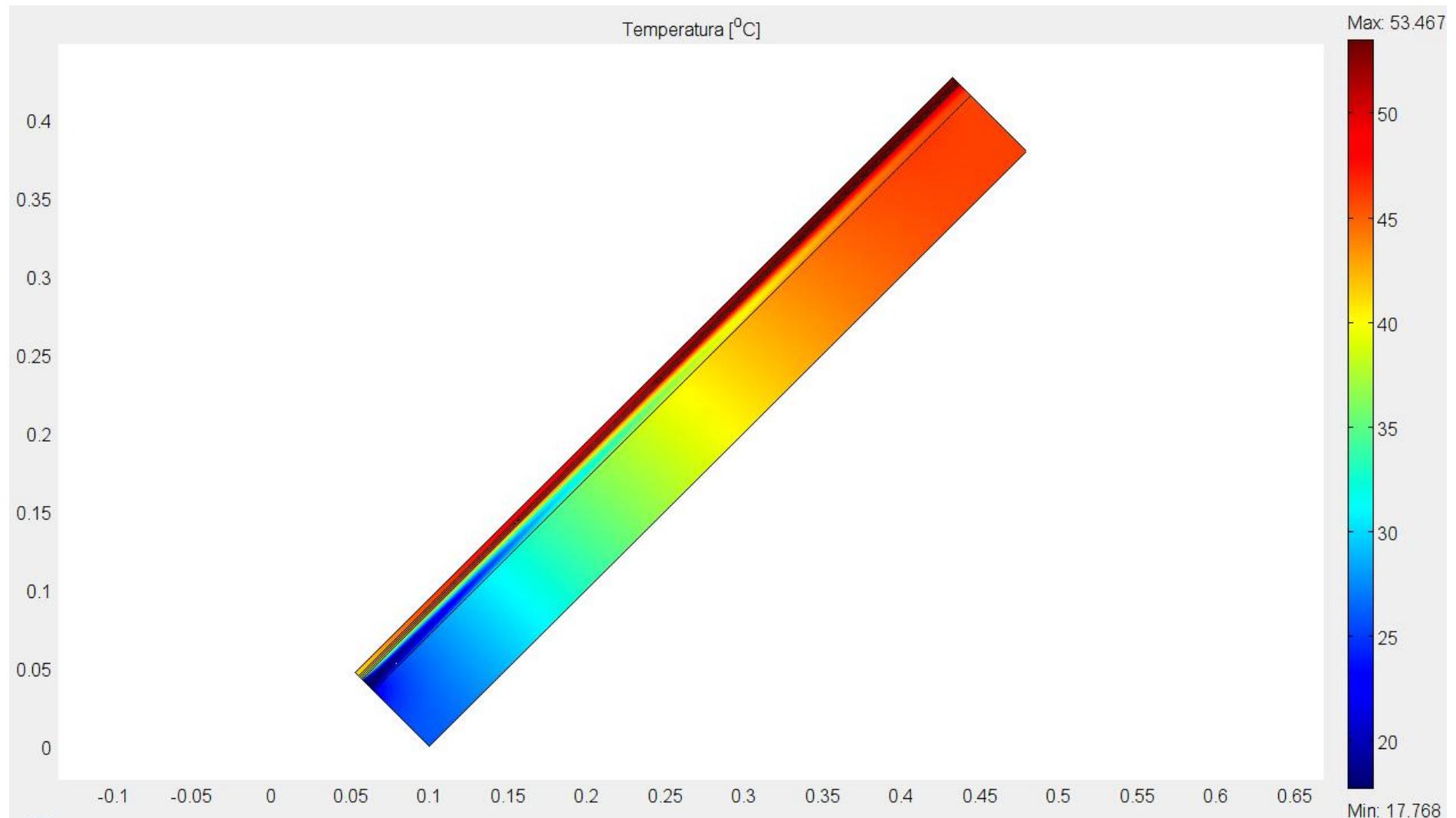


Figura 4.23 – Formarea straturilor limită pentru o grosime a canalului de $\delta = 10mm$

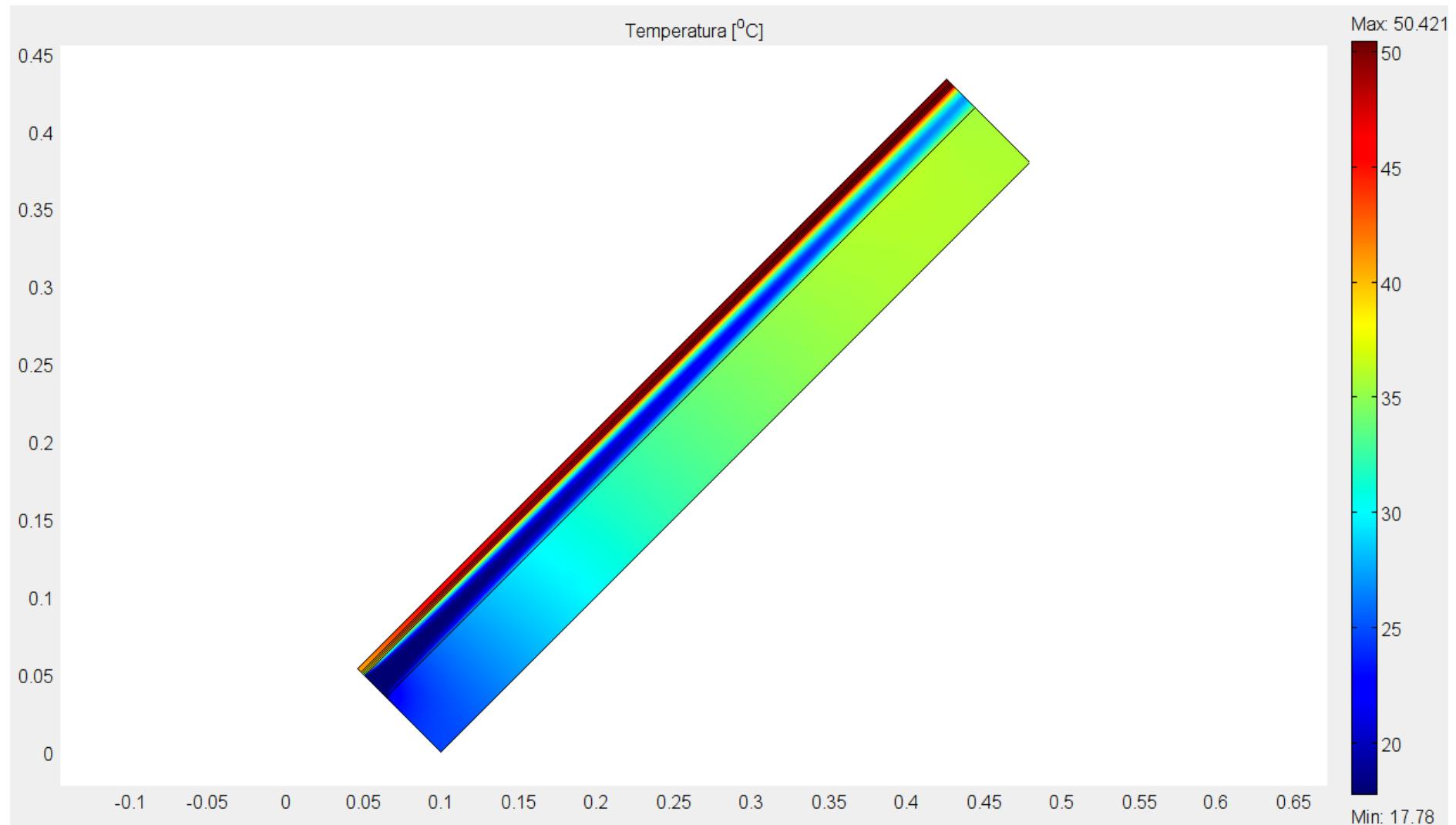


Figura 4.24 – Formarea straturilor limită pentru o grosime a canalului de $\delta = 20mm$

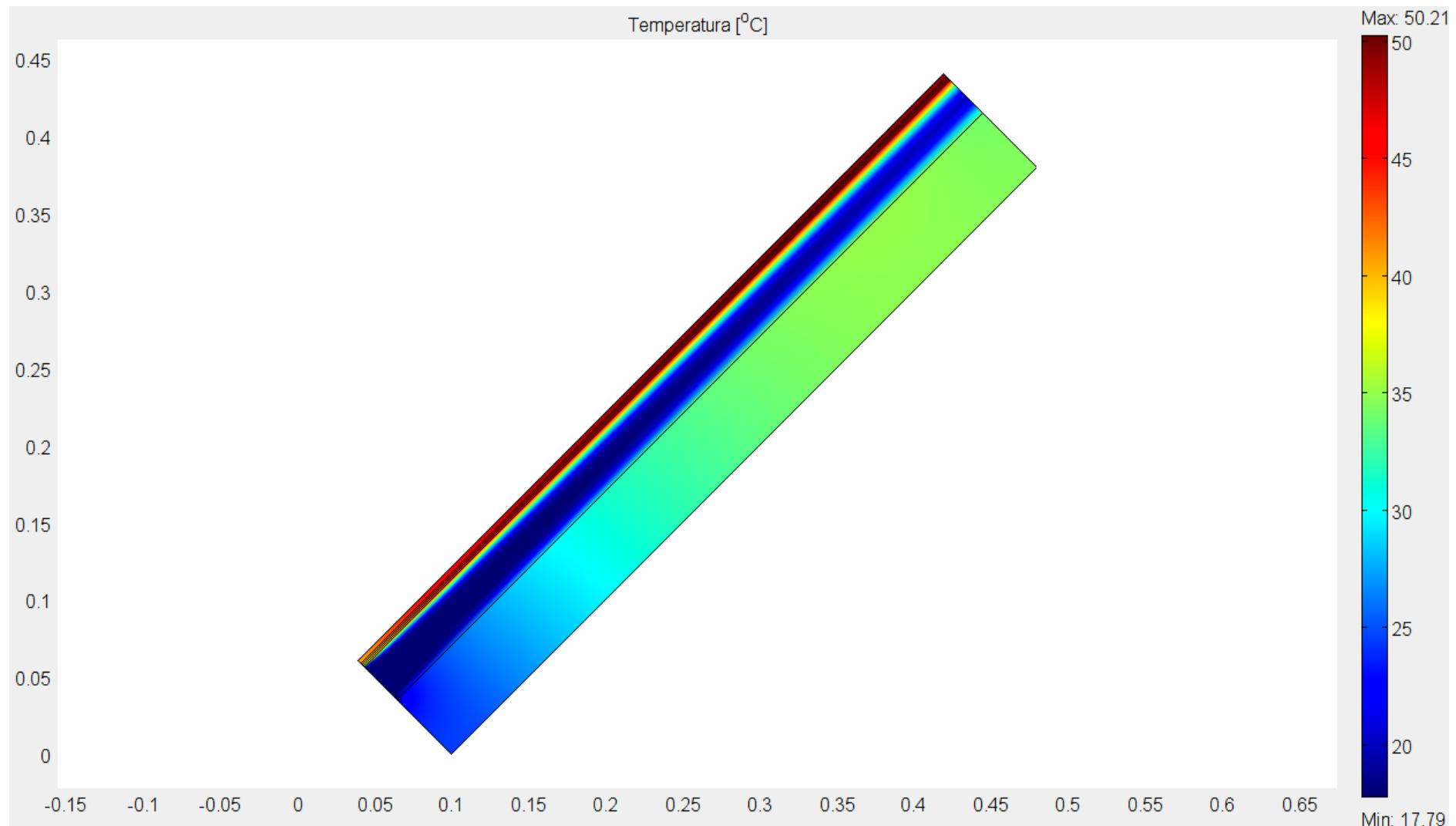


Figura 4.25 – Formarea straturilor limită pentru o grosime a canalului de $\delta = 30mm$

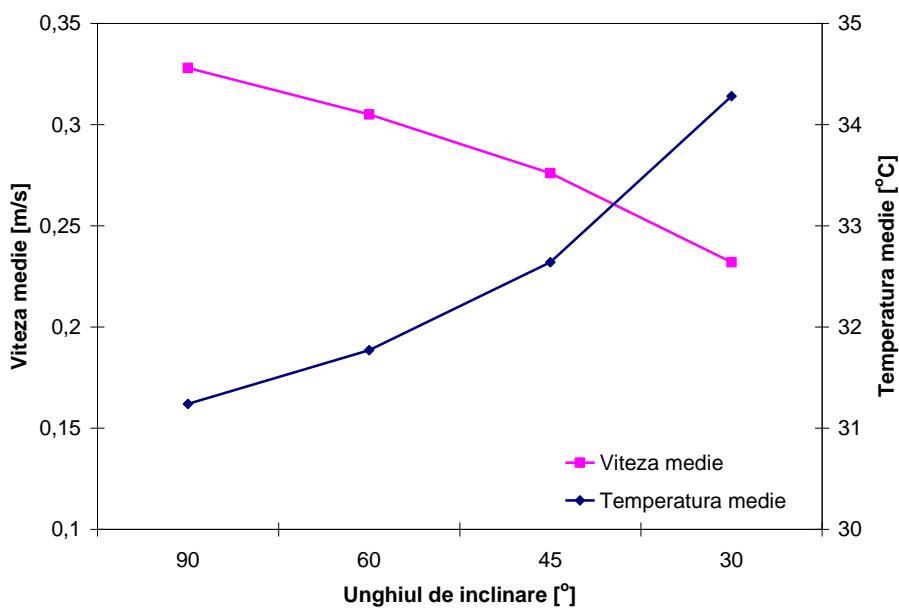


Figura 4.26 – Variația vitezei medii și a temperaturii medii în secțiunea de ieșire a aerului pentru o grosime a canalului de $\delta = 20\text{mm}$

3.4 Recuperarea căldurii cu termoelemente

În domeniul panourilor PV există numeroase studii în ceea ce privește recuperarea energiei termice. Aceasta este preluată folosind un agent termic, în general aer sau apă. În prezentul studiu, am propus recuperarea căldurii utilizând termoelemente, lipite pe spatele modulului PV.

Fenomenele termoelectrice au fost descoperite în anii 1800 și constau în generarea unei tensiuni termoelectromotoare când jonctiunea a două materiale diferite este menținută la o diferență de temperatură. La mijlocul anilor 1900, datorită răspândirii semiconductoarelor, materialele termoelectrice au început să fie fabricate cu structuri de tip *n* și cu structuri de tip *p*. [TSA. 09]

Acest fenomen este reversibil și în consecință în teorie el nu dă naștere pierderilor termodinamice. Totuși există efecte ireversibile, cauzate de existența unei rezistențe electrice și a fenomenului de conductie termică [GOL. 09]. Reversibilitatea constă în generarea unui gradient de temperatură între cele două fețe ale jonctiunii, când la bornele acesteia este aplicată o tensiune electromotoare.

Termocouplele sunt în general conectate în serie pentru a mări tensiunea electrică și în paralel pentru a mări conductivitatea termică. În acest fel sunt create modulele termoelectrice (TEM). Acestea pot fi clasificate în generatoare termoelectrice (TEG) și în sisteme de răcire termoelectrică (TEC). TEM pot produce electricitate când un gradient de temperatură este aplicat jonctiunii p-n (efectul Seebeck), în timp ce TEC convertesc energia electrică într-un gradient de temperatură (efectul Peltier) [TSA. 09].

În acest studiu, m-am oprit asupra fenomenului de producere a energiei electrice din sursă termică. Acest efect poate fi folosit la recuperarea energiei termice în sisteme cu panouri fotovoltaice. Dispozitivele termoelectrice au avantajul de a converti energia termică în energie electrică fără implicarea de piese în mișcare. În consecință nu produc zgomot, sunt compacte, stabile și fiabile. Totuși, dezavantajul decurge din randamentul destul de scăzut de conversie al acestora. În general TEG sunt considerate pentru aplicații de nișe datorită avantajelor unice.

Fie că este vorba despre TEG sau TEC, circuitul electric echivalent este același, iar simularea funcționării lor se face în aceeași manieră (figura 4.27). Trebuie avute în vedere ambele fenomene, electrice și termice. În același timp au loc patru fenomene energetice de bază în interiorul TEM: conduction termică, efectul Joule, efectul Peltier și efectul Seebeck. Efectul Thomson poate fi neglijat [TSA. 09].

Conducția termică este un proces ce poate fi descris prin legea lui Fourier (relațiile 4.9 și 4.10, unde $\Delta T = T_{cald} - T_{rece}$)

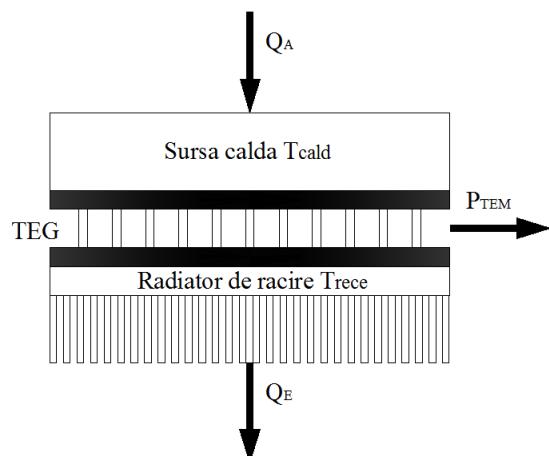


Figura 4.27 – Schema principală a unui modul termoelectric

Efectul Joule are loc datorită trecerii curentului electric prin rezistență modulului. Legea după care se calculează fluxul de căldură degajat datorită încălzirii prin efect Joule se poate calcula după legea:

$$\dot{q}_J = I^2 R \quad (4.49)$$

Fluxul termic total degajat de termocopluri poate fi considerat împărțit în mod egal între partea caldă și partea rece, după cum urmează:

$$\dot{q} = S_{\alpha,\beta} \cdot I \cdot T \quad (4.50)$$

Proportional cu gradientul de temperatură impus termoelementului, tensiunea la borne apare odata cu efectul Seebeck:

$$U_s = S_{\alpha,\beta} \cdot \Delta T \quad (4.51)$$

În condiții staționare, realizând bilanțul termic, se poate exprima căldura absorbită de sarcina termică, Q_A și căldura disipată de radiator Q_E , după cum urmează:

$$Q_A = SIT_A - 0.5I^2R - k\Delta T \quad (4.52)$$

$$Q_E = SIT_E + 0.5I^2R - k\Delta T \quad (4.53)$$

După analiza de mai sus se poate observa că un bun termoelement combină o valoare mare a coeficientului Seebeck cu o rezistență electrică mică și un coeficient de transfer termic mic. Se definește coeficientul FOM (figure-of-merit) ca fiind [TSA. 09]:

$$Z = S^2 / R \cdot k_{th} \quad (4.54)$$

Cu toate că termoelementele au un randament scăzut, ele reprezintă o atracție, din perspectiva unor surse regenerabile și flexibile [ROW. 99]. Ele pot fi folosite pentru o gamă largă de necesități: generare de mică putere, generare de mare putere, generator solar termoelectric, senzori termici etc. [RIF. 03].

Eficiența unui generator solar termoelectric este dată de:

$$\eta = \frac{1}{4} \cdot Z \cdot \Delta T \quad (4.55)$$

În cazul generării de mică putere, modulul termoelectric înlocuiește în general sistemele de alimentare pe bază de baterii. Printre sistemele alimentate cu baterii se numără și sistemele independente, fără fir cu senzori, sisteme de telecontrol, sisteme de securitate sau de măsură. O altă soluție constă în implementarea unei celule solare, dar asta numai în cazul în care se dispune de o sursă de lumină. Oricum, există limitări în ceea ce privește tehnologia de fabricație și utilizarea termoelementelor miniaturizate. Pentru a depăși aceste inconveniente s-au studiat tehnologiile cu film subțire [KIM. 00].

Printre aplicațiile atractive din domeniul termoelectricității sunt cele care utilizează sursa solară. În general se combină un colector solar cu un generator termoelectric. Cercetările se concentrează în direcția găsirii unor metode eficiente de conversie a energiei solare în energie electrică. S-au dezvoltat sisteme care combină conversia termoionică cu generarea termoelectrică în vederea obținerii unei eficiențe în jurul valorii de 40 % [NAT. 96].

Pe baza datelor preluate experimental la laboratorul UMR CNRS 6134, Ajaccio, Franța, am studiat posibilitatea recuperării energiei termice utilizând elemente termoelectrice lipite pe spatele unui panou PV.

La achiziția datelor experimentale am utilizat un panou BP 585 F și un element termoelectric fabricat de Melcor și având caracteristicile prezentate în tabelul 4.4:

ΔT_{max}	67 °C
Dimensiuni $L \times l \times H$	40 × 40 × 3,8 mm
I_{max}	6 A
Număr de termocopluri	127
P_{max}	51,4 W
t_{max}	85 °C
U_{max}	15,4 V

Tabelul 4.4 – Proprietățile modulului termoelectric Melcor CP1.4-127-06L

Modulul termoelectric a fost lipit pe spatele unui modul fotovoltaic BP 585 F cu un adeziv termoconductor. Au fost măsurate în același timp intensitatea radiației solare, temperatura ambientă, temperatura modulului PV, temperatura termoelementului, tensiunea livrată de acesta și curentul de scurt-circuit. Datele experimentale sunt prezentate în figura 4.28.

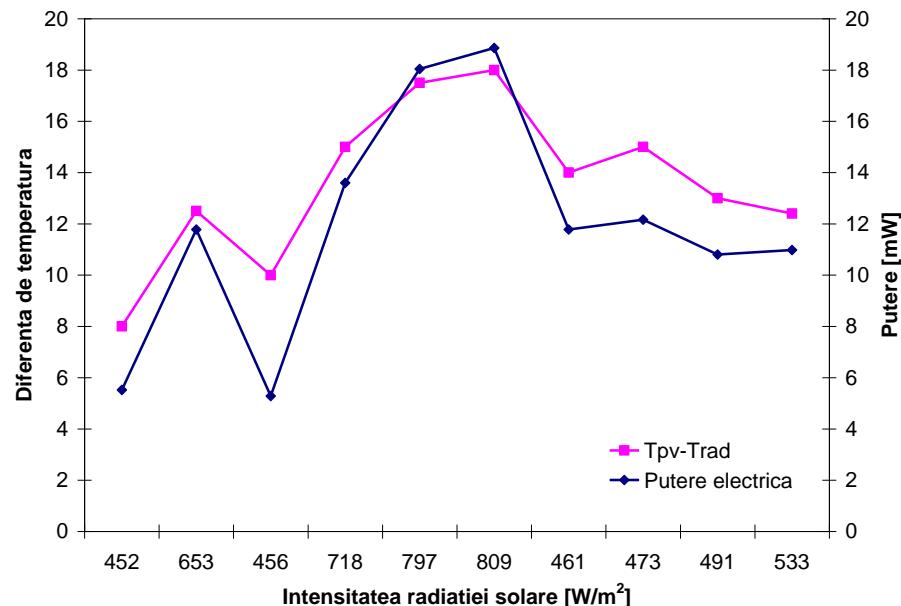


Figura 4.28 – Date experimentale privind funcționarea modulului termoelectric
Melcor CP1.4-127-06L

Pe baza datelor experimentale am calculat coeficientul Seebeck al modulului termoelectric utilizând relația 4.51. Aceasta se situează în jurul valorii $S_{\alpha,\beta} = 0,014$.

Neglijând celelalte efecte ce au loc la nivelul termoelementului am simulat funcționarea sa folosind modelul termic de la punctul 3.2. Am considerat că pe spatele panoului PV nu este poliester alb, ci un nanomaterial, obținut la laboratorul ICPE-CA, având conductivitatea termică $\lambda \equiv 100 \frac{W}{m \cdot K}$ și căldura specifică masică, la

presiune constantă $c_p = 0,1 \frac{J}{kg \cdot K}$. Panoul este orientat către Sud și înclinat la $\beta = 45^\circ$. Rezultatele simulărilor și datele experimentale sunt prezentate în figura 4.29.

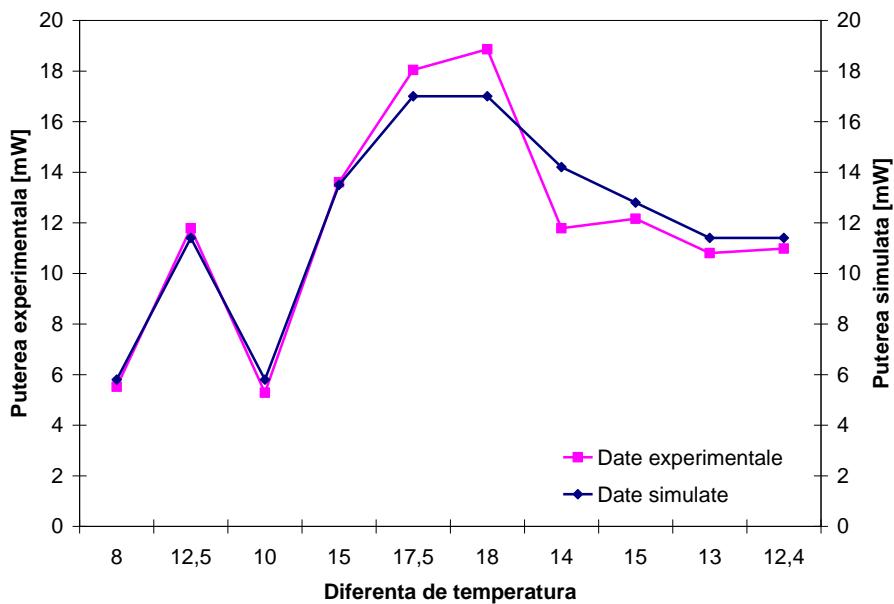


Figura 4.29 – Puterea electrică maximă livrată de modulului termoelectric
Melcor CP1.4-127-06L

Se poate observa că folosirea unui astfel de material nu are o influență importantă asupra producției de energie electrică cu termoelemente. În perspectivă se poate studia creșterea randamentului de conversie a termoelementelor sau chiar fabricarea lor utilizând nanomateriale.

4. Concluzii parțiale capitolul IV

Din totalul fluxului energetic incident primit de la soare la suprafața unui panou PV, numai aproximativ 15% este convertit în energie electrică, restul fiind transformat în căldură. Încălzirea celulelor PV conduce la scăderea randamentului lor de conversie. Din aceste motive s-au studiat și s-au construit diverse sisteme de recuperare a căldurii degajate. Pe de-o parte se realizează răcirea celulelor PV și pe de altă parte se recuperează o bună parte din energia primită de la soare.

Într-o primă parte a lucrării am studiat diversele modele și sisteme deja realizate. Am studiat atât modele teoretice, cât și modele validate experimental.

M-am oprit apoi asupra fenomenelor de transfer termic prin convecție liberă și prin radiație ce au loc la nivelul suprafețelor unui panou PV. Am realizat modelul fizic

al unui panou PV BP 585 F în COMSOL Multiphysics, ținând cont de straturile componente, de caracteristicile sale geometrice și de modalitatea de montaj. Am validat modelul cu date experimentale obținute la laboratorul UMR CNRS 6134 Ajaccio, Franța.

Utilizând modelul am studiat influența distanței de montaj a panoului PV față de un perete, cât și influența unghiului făcut cu orizontală, asupra câmpurilor de viteză și de temperatură în secțiunea de intrare, de mijloc și de ieșire a aerului. Datorită fenomenelor de transfer termic prin radiație și prin convecție, în canalul format din panou și perete are loc formarea a două straturi limită de conduc în diversele cazuri studiate la deformarea câmpurilor de viteză și de temperatură. Se poate conchide asupra unei distanțe optime de montaj, dacă se dorește recuperarea aerului cald, dar și o bună răcire a celulelor PV.

În ultima parte am realizat simulări de recuperare a căldurii cu elemente termoelectrice lipite pe spatele panoului și am comparat rezultatele cu date experimentale obținute la același laborator. Am arătat de asemenea că montarea unor materiale cu o conductivitate termică mai mare decât a poliesterului nu are o influență importantă asupra producerii energiei electrice cu termoelemente.

CAPITOLUL V

Concluzii generale. Contribuții originale și perspective.

Deși sunt mult studiate și implementate, panourile fotovoltaice prezintă încă aspecte ce merită să fie luate în considerare. În această lucrare am încercat să aduc contribuții la creșterea productivității lor energetice. Pentru a realiza acest lucru le-am studiat funcționarea din punct de vedere electric și transferul termic prin radiație, conducție și convecție ce are loc la nivelul lor, în vederea recuperării energiei termice.

Am abordat funcționarea unui modul PV ca generator electric din mai multe perspective. Posibile modelări, cele analitice, utilizează modelele simplă și dublă diodă, bazate pe proprietățile semiconductoarelor. Aceste modele sunt larg studiate în literatură, au o foarte bună acuratețe, dar necesită metode numerice de rezolvare, întrucât se prezintă sub formă de ecuații implice. Acest fapt îngreunează utilizarea lor, la momentul actual, în sisteme cu microcontrolere. Totuși, pentru a realiza transferul maxim de putere dintre generatorul PV și utilizatorul de sarcină este nevoie de cunoașterea poziției punctului maxim de putere. Acest lucru s-a realizat cu algoritmi analitici, ce prezintă importante dezavantaje practice. Am realizat un studiu bibliografic privind posibilitatea adaptării modulelor PV la receptorul de la borne, algoritmi existenți pentru obținerea punctului maxim de putere precum și diverse aplicații ale rețelelor neuronale în domeniul panourilor PV.

Din această perspectivă derivă posibilitatea modelării funcționării modulelor PV utilizând tehnici de inteligență artificială. Astfel am modelat poziția punctului maxim de putere al unui panou BP 585 F cu ajutorul rețelelor neuronale artificiale. Pentru acesta a fost necesară studierea teoretică a RNA precum și sistemele de achiziție a datelor. Regrupând concluziile parțiale prezentate la sfârșitul capitolelor III și IV, în continuare voi prezenta suma tuturor contribuțiilor mele originale, rezultat al cercetărilor fundamentale avansate efectuate în laboratoare din Franța (UMR CNRS 6134, Ajaccio) și în România (UTCB și laboratorul de nanotehnologii al ICPE-CA). Contribuțiile originale ale acestor cercetări sunt:

- găsirea și validarea cu date experimentale a unui model de rețea neuronală artificială pe baza studiilor mai multor arhitecturi și stiluri de învățare pentru predicția punctului maxim de putere al unui modul BP 585 F care să poate fi implementat pe microcontrolerul PIC 16F877;

- compararea performanțelor modelului de rețea neuronală realizat cu modelul clasic simplă diodă;
- implementarea modelului neuronal validat cu date experimentale pe un microcontroler PIC 16F877;
- programarea microcontrolerului PIC 16F877 ca modul de achiziție de date și ca modul de comandă pentru un adaptor DC-DC, pe baza modelului neuronal.
- realizarea schemei electrice a modulului de comandă a sistemului de urmărire a punctului maxim de putere.

La ora actuală sistemele MPPT se instalează la bornele câmpurilor PV. Sistemul de urmărire a punctului maxim de putere realizat pe baza modelului neuronal artificial poate fi implementat pe fiecare modul al unui câmp PV, reducând astfel pierderile energetice, ameliorând implicit randamentul global al instalației și conferind autonomie fiecărui modul în parte.

O altă posibilitate de a crește productivitatea energetică a modulelor PV este recuperarea energiei termice. După un studiu amănunțit al sistemelor hibride actuale, PV-T și studii teoretice ale fenomenelor termice de radiație și convecție naturală, am construit modelul unui modul BP 585 F, în COMSOL Multiphysics, și am studiat funcționarea acestuia din perspectiva transferului termic. Contribuțiiile originale, în această parte, sunt:

- modelarea transferului termic la nivelul panoului BP 585 F prin conductie, radiație și convecție naturală;
- evidențierea influenței distanței de montaj a panoului față de un perete, în ceea ce privește distribuția de temperatură și de viteze în diferite secțiuni ale canalului astfel format;
- evidențierea influenței unghiului de montaj al panoului, asupra transferului termic;

- studiu experimental în vederea recuperării căldurii sub formă de energie electrică cu ajutorul modulelor termoelectrice;
- studiul influenței utilizării nanomaterialelor în componența modulelor PV, din perspectiva transferului termic.

Cercetările efectuate arată că performanțele modelului neuronal artificial propus sunt asemănătoare cu cele ale modelului analitic simplă diodă. Implementarea rețelei neuronale pe microcontrolerul PIC 16F877 este facilă și permite realizarea unui sistem de urmărire a punctului maxim de putere mai performant decât cele existente. De asemenea microcontrolerul permite preluarea datelor experimentale și transmiterea prin intermediul protocolului RS-485. În perspectivă se poate studia posibilitatea implementării unui sistem MPPT cu PIC 16F877 pe fiecare modul al unui câmp fotovoltaic și studiul impactului pe care acest lucru îl are asupra funcționării sistemului.

Pentru modelările din cadrul tezei mele de doctorat am utilizat softuri de înaltă tehnologie cum ar fi MATLAB, COMSOL Multiphysics și Proteus, fără de care modelele concepute de mine nu ar fi putut fi validate corespunzător.

O altă perspectivă este cea a extinderii modelului RNA pentru fenomenul de umbrire și posibilitatea reducerii pierderilor energetice pe care acesta îl presupune.

În ceea ce privește aspectul termic, perspectivele se conturează în jurul realizării unor module termoelectrice cu randamente ridicate. De asemenea este oportun studiul unui sistem hibrid care să înglobeze pe lângă recuperarea energiei termice cu ajutorul unui agent termic și elemente termoelectrice.

Bibliografie

- [ADE. 00] Adel A. H., "Comparative study of performances of photovoltaic/thermal solar air collectors", Energy Conversion & Management 41 (2000), p. 861-881.
- [AGU. 92] Aguiar R., Collares-Pereira M., "TAG: A time dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation", Solar Energy 49 (1992), p. 167-174.
- [ALA. 98] Alawi S.M., Hinai H.A., "An ANN-based approach of predicting global radiation in locations with no direct measurement instrumentation", Renewable Energy 14 (1998), p.199-204.
- [AMR. 07] Amrouche B., Belhamel M., Guessoum A., „Artificial Intelligence based P&O MPPT method for photovoltaic systems”, Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007), p. 11-16.
- [AND. 93] Andonie R., Cațaron A., *Curs de rețele neurale*, Universitatea „Transilvania”, 1992/1993.
- [ARM. 10] Armstrong S., Hurley W.G., „A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions”, Applied Thermal Engineering 30 (2010), p. 1488–1495.
- [AZI. 07] Aziz A., *Proprietés électriques des composantes électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire*, Teza de doctorat, 2007, conducător științific: Francois Olivie, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- [BAH. 05] Bahgat A.B.G, Helwa N.H., Ahmad G.E., Shenawy E.T.El, "Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks", Renewable Energy 30 (2005), p. 1257-1268.
- [BAL. 95] Baldi P., "Gradient descent learning algorithms: general dynamical systems perspective", IEEE Trans on Neural Networks 6 (1995).
- [BAT. 08] Bates P.M., *Programming 8-bit PIC Microcontrollers in C*, Ed. Newnes, USA, 2008, ISBN: 978-0-7506-8960-1
- [BAZ. 02] Bazilian Morgan D., Deo Prasad, „Modeling of a photovoltaic heat recovery system and its role in a design decision support tool for building professionals”, Renewable Energy 27 (2002), p. 57–68.
- [BEL. 10] Belmili H., Cheikh S. M. A., Haddadi M., Larbes C., „Design and development of a data acquisition system for photovoltaic modules characterization”, Renewable Energy 35 (2010), p.1484–1492.
- [BEN. 99] Benghanem M., Arab A.H., Mukadam K., „Data acquisition system for photovoltaic water pumps”, Renewable Energy 17 (1999), p.385–396.
- [BEN. 98] Benghanem M., Maafi A., “Data acquisition system for photovoltaic systems performance monitoring”, IEEE Trans. Instrument. Meas. 47 (1998), p.30–33.
- [BEN. 10] Benghanem M., “A low cost wireless data acquisition system for weather station monitoring”, Renewable Energy 35 (2010), p.862–872.

- [BIA. 04] Bianchi A.M., Fautrelle Y., Etay J., *Transferts thermiques*, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2004, ISBN: 2-88074-496-2.
- [BIR. 02] Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., *Transport Phenomena*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [BLA. 97] Blaesser G., „PV system measurements and monitoring: the European experience”, Solar Energy Mater. Solar Cells 47 (1997), p.167–176.
- [BRI. 00] Brinkworth BJ, Marshall RH, Ibarahim Z, „A validated model of naturally ventilated PV cladding”, Solar Energy 69 (2000), p. 67–81.
- [BRU. 05] Brugnoni G., Gagliarducci M., Lampasi D.A., Podesta` L., “Modular architecture for remote management of power generation plants”, Proceedings of the 22nd IEEE Instrum. Meas. Tech. Conf. IMTC 2 (2005), p. 1075–1079.
- [BUR. 93] Burmeister, *Convective Heat Transfer*, Wiley, 2nd edition, 1993.
- [CCR. 09] C Compiler Reference Manual March 2009, Custom Computer Services, Inc, 2009.
- [CAL. 08] Caluianu I., "Etude théorique et experimental des phénomènes d'ombrage sur les modules photovoltaïques, Raport de stagiu profesional, UMR CNRS 6134, Ajaccio, 2008.
- [CAL. 09-1] Caluianu I., "Modelarea funcționării panourilor fotovoltaice utilizând tehnici de inteligență artificială", Raport de cercetare 1, 2009.
- [CAL. 09-2] Caluianu I., Notton G., Colda I., Caluianu S., Damian A., "Photovoltaic Energy Generation Under Partially Shading Conditions", Proc. Electromotion 2009, 1-3 Juillet 2009, Lille.
- [CAL. 09-3] Caluianu I., "Producerea energiei electrice cu ajutorul panourilor fotoelectrice", a 44-a Conferinta nationala de instalatii, Vol. Instalatii electrice si automatizari, Sinaia, 2009, ISBN: 978-973-755-528-1
- [CAL. 10-1] Caluianu I., "Cercetări experimentale utilizând o instalație de panouri fotovoltaice precum și tehnici avansate de achiziție și prelucrare datelor", Raport de cercetare 2, 2010.
- [CAL. 10-2] Caluianu I., "Studiu și propunerile de soluții pentru intensificarea schimbului de căldură, în vederea creșterii eficienței de producere a energiei electrice", Raport de cercetare 3, 2010.
- [CAL. 10-3] Caluianu I., Notton G., Colda I., Paoli C., „Maximum power point prediction of a pv module using artificial neural networks”, Sesiunea de comunicări științifice a Școlii doctorale din Universitatea Tehnică de Construcții București 2010, Bucuresti.
- [CAL. 11] Caluianu I., Notton G., Colda I., Paoli C., „Photovoltaic module maximum power point determination using one diode model and an artificial neural network model”, Mathematical Modelling in Civil Engineering 7 (2011), p.33-38.
- [CAS. 02] Castaner L., Silvestre, S., *Modelling photovoltaic systems - using Pspice*, Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2002, ISBN 0-470-845279.
- [CRY. 04] Curry B, Morgan PH., Model selection in neural networks: some difficulties. Eur J Operat Res, 2004.

- [DEL. 02] Del Cueto J.A., "Comparison of energy production and performance from flat plate photovoltaic module technologies deployed at fixed tilt", Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002, p. 1523–1526.
- [DEM. 10] Demuth H., Beale M., Hagan M. - *Matlab Neural Network Toolbox 6*, The MathWorks, Inc.
- [DIA. 06] Diaconescu E., *Achiziții de Date și Instrumentație*, Ed. MatrixRom, București, 2006, ISBN 10:973-755-100-1; ISBN 13:978-973-755-100-9.
- [DRE. 08] Dreyfus G., Martinez J.-M., Samuelides M., Gordon M.B., Badran F., Thiria S., *Apprentissage statistique*, 3rd edition, Editions Eyrolles, Paris, 2008.
- [DUC. 99] Dumbs C., „Développement d'outils pour l'analyse des systèmes hybrides photovoltaïque-diesel”, Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 20/12/1999.
- [DUM. 99] Dumitache I., Constantin N., Drăgoicea M., *Rețele neurale. Identificarea și conducerea proceselor*, Ed. Matrix Rom, București, 1999.
- [EIC. 03] Eicker Ursula, *Solar technologies for buildings*, Wiley, Janvier 2003.
- [EME. 96] Emery K, et al., „Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems”, 25th IEEE PVSC (1996), p. 1275–1278.
- [FAD. 09] Fadare D.A., Modelling of solar energy potential in Nigeria using an artificial neural network model. *Applied Energy* (2009), doi:10, 1016/j.apenergy.2008.12.005.
- [FAU. 94] Fausett L., *Fundamentals of neural networks. Architectures, algorithms and applications*, Prentice Hall, 1994.
- [FEM. 04] Femia N., Petrone G., Spagnolo G., Vitelli M., "Optimizing Duty-Cycle Perturbation of P&O MPPT Technique", 35th Annual IEEE Power Specialists Conference (2004), Germania.
- [FEM. 05] Femia N., Petrone G., Spagnolo G., Vitelli M., "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method", IEEE Transactions on Power Electronics 4 (2005), p. 963-973.
- [FIL. 02] Filip I., *Structuri și algoritmi de conducere adaptivă*, Orizonturi Universitare, Timișoara, 2002.
- [FUE. 97] Fuentes M, Roaf S., „Optimising the thermal and electrical performance of roof integrated photovoltaics: case study”, 14th European PVSEC, Barcelona, 1997.
- [FUL. 00] Fuller R., *Introduction to Neuro- Fuzzy Systems*, New York, Physica-Verlag, Heidelberg, 2000.
- [GAG. 07] Gagliarducci M., Lampasi D.A., Podesta L., "GSM-based monitoring and control of photovoltaic power generation", Measurement 40 (2007), p. 314–321.
- [GHO. 95] Ghosh A.K., Lubkeman D.L., "The classification of power system disturbance waveforms using a neural network approach", IEEE Trans Power Delivery 10 (1995), p. 109–115.
- [GOL. 09] Goldsmid H. J., *Introduction to ThermoElectricity*, Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [GRA. 90] Graham V.A., Hollands K.G.T., "A method to generate synthetic hourly solar radiation globally", Solar Energy 44 (1990), p. 333-341.
- [GRA. 88] Graham V.A., Hollands K.G.T., "A time series model for K_t with application to global synthetic weather generation", Solar Energy 40 (1988), p. 269-279.

- [HAG. 94] Hagan M.T., Menhaj M., "Training feed-forward networks with the Marquardt algorithm", *IEEE Transactions on Neural Networks* 5 (1994), p. 989–993.
- [HAY. 99] Hayman S., "The McCulloch-Pitts model", *International Joint Conference on Neural Networks* 6 (1999), p. 4438-4439.
- [HEN. 09] Henry Mathieu, Hervé Fanet., *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*, Ed. Dunod, Paris, 2009, ISBN 10: 2100516434.
- [HER. 00] Herrmann W., Wiesner W., "Modelling of PV modules - the effects on non-uniform irradiance on performance measurements with solar simulators", 16th European photovoltaic solar energy conference, 2000.
- [HON. 06] Hontoria L., Aguilera J., Almonacid F., Nofuentes G., Zufiria P., *Artificial neural networks applied in PV systems and solar radiation*, Nova Science Publisher, 2006.
- [HOW. 10] Howell J.R., Siegel R., Pinar Menguc M., *Thermal Radiation Heat Transfer*, 5th Edition, Taylor and Francis/CRC, New York, 2010.
- [HUA. 03] Hua C., Lin J., „An on-line MPPT algorithm for rapidly changing illuminations of solar arrays”, *Renewable energy* 28 (2003), p. 1129-1142.
- [IAT. 09] Iatan I., *Îndrumător de laborator în Matlab 7.0*, Ed. Conpress, Bucureşti, 2009.
- [IAT. 03] Iatan I., "Sisteme neuro-fuzzy pentru recunoaşterea formelor", prima teză de doctorat, 2003, conducător ştiinţific: Prof. dr. ing. Victor Neagoe, Universitatea Politehnică Bucureşti, Facultatea de Electronică, Telecomunicaţii şi Tehnologia Informaţiei.
- [IOR. 03] Iorga V., *Programare în C/C++. Culegere de probleme*, Ed. Niculescu, Bucureşti, 2003.
- [JON. 01] Jones A.D., Underwood C.P., „A thermal model for photovoltaic systems”, *Solar Energy* 4 (2001), p. 349–359.
- [KAL. 03] Kalaitzakis K., Koutroulis E., Vlachos V., „Development of a data acquisition system for remote monitoring of renewable energy systems”, *Measurement* 34 (2003), p. 75–83.
- [KAL. 00] Kalogirou S. A., "Applications of artificial neural-networks for energy systems", *Applied Energy* 67 (2000), p. 17-35.
- [KAR. 06] Karatepe E., Boztepe M., Colak M., "Neural network based cell model", *Energy Conversion & Management* 47 (2006), p. 1159-1178.
- [KIM. 97] Kim M., Hwang E., „Monitoring the battery status for photovoltaic systems”, *J. Power Sources* 64 (1997), p. 193–196.
- [KIM. 00] Kim I. H., "(Bi,Sb)2(Te,Se)3-based thin film thermoelectric generators", *Materials Letters* 43 (2000), p 221-224.
- [KIN. 98] King D.L., Kratochvil J.A., Boyson W.E., Bower W.I., "Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays", 2nd World conference and exhibition on photovoltaic solar energy conversion, Austria, 1998.
- [KOU. 03] Koutroulis E., Kalaitzakis K., „Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring”, *Renewable Energy* 28 (2003), p.139–152.
- [KUN. 86] Kunt M. – *Traitement numérique des signaux*, Ed. Dunod, Paris, 1986.

- [LEO. 98] Leondes C. T., *Fuzzy Logic and Expert Systems Applications*, Academic Press, San Diego, 1998.
- [LIP. 87] Lippman R., "An introduction to computing with neural nets", IEEE ASSP Magazine (1987), p. 4-22.
- [LIU. 04] Liu, C., Cheung, W., Cheung, R., "Advanced Algorithm for MPPT Control of Photovoltaic Systems", Canadian Solar Buildings Conference, 20-24 August 2004, Montreal.
- [LOR. 94] Lorenzo, E., *Solar electricity -engineering of photovoltaic systems, Ed. Progensa, 1994, ISBN 84-86505-55-0*
- [MAR. 03] Markvart T., Castafier L., *Practical handbook of photovoltaic: fundamentals and applications*, Elsevier 2003, ISBN-10: 1-85617-390-9.
- [MAT. 06] Mattei M., Nottou G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P., "Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance", Renewable Energy 31 (2006), p. 553–567.
- [MEY. 00] Meyer E.L., van Dyk E.E., „Degradation analysis of silicon photovoltaic modules”, Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2000, p. 2272–2275.
- [MOS. 98] Moshfegh B., Sandberg M, „Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels” Renewable and Sustainable Energy Reviews 2 (1998), p. 287–301.
- [NAT. 96] Natito H. et al., "Development of a solar receiver for a high-efficiency thermionic/thermoelectric conversion system", Solar Energy 58 (1996), p. 191–195.
- [NEA. 02] Neagoe V., Iatan I., "Face Recognition Using a Fuzzy-Gaussian Neural Network", Proceedings of First IEEE International Conference on Cognitive Informatics, ICCI 2002, 19-20 August 2002, Calgary, Alberta, Canada, ISBN 0-7695-1726-9, p. 361-368.
- [NEG. 95] Negnevitsky M., Lee T.L., "Artificial neural networks application for current rating of overhead lines", IEEE Transactions on Neural Networks (1995), p.418-222.
- [NOT. 05] Nottou G., Cristofari C., Mattei M., Poggi P., "Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences", Applied Thermal Engineering 25 (2005), p. 2854–2877.
- [PAD. 97] Padet J., *Principes des transferts convectifs*, Ed. Polytechnica, Paris, 1997, ISBN: 2-84054-050-9.
- [PAR. 86] Paratte P.-A., Robert P. – *Systèmes de mesure*, Ed. Dunod, Paris, 1986.
- [REE. 93] Reed R., "Pruning algorithms - a survey", IEEE Trans Neural Networks 4 (1993), p. 740–747.
- [RIF. 03] Riffat S.B., Xiaoli Ma, "Thermoelectrics: a review of present and potential applications", Elsevier Science, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00012-7, 2003.
- [ROW. 99] Rowe D.M, *Thermoelectrics, an environmentally-friendly source of electrical power*, Renewable Energy 16 (1999), p. 1251-1256.
- [RUM. 86] Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ., *Learning internal representation by error propagation in parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*, Vol.1, Cambridge (MA): MIT Press, 1986.

- [SAA. 03] Saadi A., Moussi A., " Neural Network Use in MPPT of Photovoltaic Pumping System", Revue des Energies Renouvelables, ICPWE (2003), p. 39-45
- [SFE. 01] Sfetsos A., Coonick H., "Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques", Solar Energy 68 (2001), p. 169-178.
- [SHA. 91] Sharma AK, Dwivedi R, Srivastava SK., "Performance analysis of a solar array under shadow condition", IEE Proc-G 138 (1991), p.301–306.
- [SOR. 04] Sorensen Bent, *Renewable Energy, Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects*, Third Edition, Elsevier Academic Press, 2004.
- [SOZ. 05] Sozen A., Arcaklioglu E., Ozalp M., Caglar N., "Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey", Renewable Energy 30 (2005), p. 1075-1090.
- [TAF. 08] Tafticht T., Agbossou K., Dounbia M.L., Chériti A., „An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems”, Renewable Energy 33 (2008), p. 1508-1516.
- [TIN. 08] Tina G.M., Scrofani S., „Electrical and Thermal Model for PV Module Temperature Evaluation”, IEEE 978-1-4244-1633-2/08/00, 2008.
- [TSA. 09] Tsai H. L., "Lin J. M., Model Building and Simulation of Thermoelectric Module Using Matlab/Simulink", Journal of Electronic Materials, doi: 10.1007/s11664-009-0994-x, 2009.
- [VAN. 97] Van Dyk E.E., Meyer E.L., Scott B.J., O'Connor D.A., Wessels J.B., „Analysis of photovoltaic module energy output under operating conditions in South Africa”, Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1997, pp. 1197–1200.
- [VER. 09] Verle M., *PIC Microcontrollers – Programming in C*, microElektronika, 2009, ISBN-13: 978-86-84417-17-8.
- [VIN. 07] Vintan L. N., *Prediction Techniques in Advanced Computing Architectures*, Matrix Rom, Bucureşti, 2007.
- [WEB.] WEB'log Monitoring System, User Manual, mc meteocontrol.
- [WIC. 01] Wichert B., Dymond M., Lawrance W., Friese T., “Development of a test facility for photovoltaic–diesel hybrid energy systems”, Renewable Energy 22 (2001), p. 311–319.
- [WIL. 97] Wilshaw A., Pearsall N., Hill R., „Installation and operation of the first city center PV monitoring station in the United Kingdom”, Solar Energy 59 (1997), p.19–26.
- [ZAU. 06] Zauscher Melanie D., „Solar Photovoltaic Panels From a Heat Transfer Perspective”, this paper is to fulfill an MAE 221A class requirement, decembrie 2006, courses.ucsd.edu/rherz/mae221a/reports/Zauscher_221A_F06.pdf
- [ZUR. 92] Zurada JM., *Introduction to artificial neural systems*, West Publishing Company, 1992.
- [WWW. 1] <http://org.ntnu.no/>
- [WWW. 2] www.bpsolar.com
- [WWW. 3] www.wikipedia.org
- [WWW .4] <http://ines.solaire.free.fr/solpv/page1.html>

Anexa 1

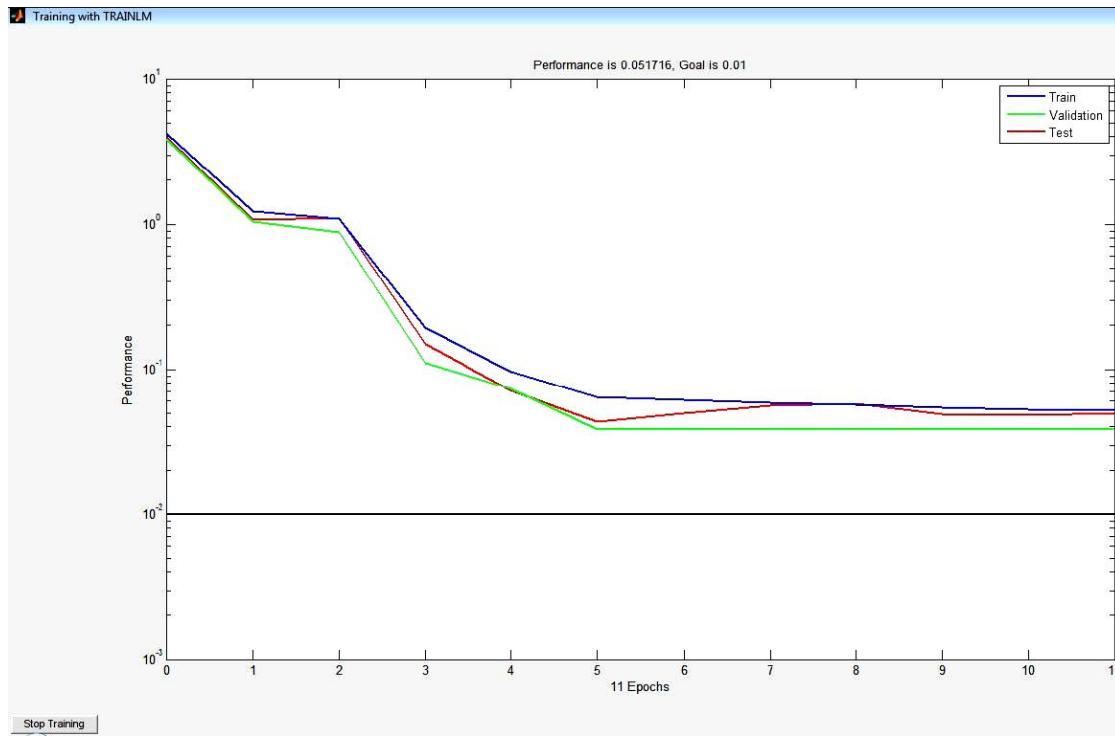
Data	Ora	T _p [°C]	T _a [°C]	G [W/mp]	I _{mpp} [A]	U _{mpp} [V]
1_04_2010	11:15	28,5	14	196	1,092	16,1
	11:30	25,8	14	616	2,906	16,69
	14:30	44,3	15	352	1,697	15,07
	15:25	45,9	15	1171	5,399	13,84
	15:35	44,3	15	1177	5,162	14,28
	16:05	35,8	14	471	2,239	15,55
	16:45	28	14	402	1,23	17,64
2_04_2010	09:10	18,4	12	90	0,4	16,98
	10:00	25,8	13	271	1,176	16,7
	11:00	34,7	13	497	2,322	15,79
	12:45	52,2	15	881	4,115	14,39
	14:25	51,5	15	1051	4,791	13,63
	15:00	50,9	15	1075	4,932	14,03
	16:00	35,7	14	346	1,614	16,15
6_04_2010	10:30	23	13	293	1,355	16,87
	10:45	28	13	350	1,634	16,38
	11:10	40,2	14	535	2,477	15,46
	12:10	45,4	14	773	3,536	14,8
	14:10	50,7	16	958	4,495	13,31
	15:15	53	16	963	4,49	13,51
	16:00	41,4	17	346	1,605	15,75
7_04_2010	10:30	33,2	16	378	1,993	15,73
	11:15	48,4	17	589	2,956	14,75
	12:00	51,1	18	749	3,627	14,28
	14:30	54,1	21	849	3,965	13,75
	15:00	50,8	19	1017	4,586	13,97
	16:00	48,6	18	981	4,39	14,14
	16:10	43,9	18	891	4,061	14,42
9_04_2010	16:20	44,4	18	493	2,268	15,02
	11:00	27	16	322	1,547	16,13
	14:45	51	18	412	1,943	15,18
	15:35	37,8	18	333	1,559	15,49
14_04_2010	16:35	49,2	19	883	3,944	13,87
	12:15	41,7	15	750	3,415	15,19
	12:45	31,1	14	476	2,318	15,58
	13:15	33,1	14	746	3,602	14,89
	14:30	41,5	14	821	3,898	14,39
21_04_2010	15:00	47	14	1189	5,545	13,7
	16:15	31,5	14	473	2,197	16,06
	10:00	38,1	17	330	1,547	16,07
	10:05	34,3	17	347	1,664	15,52
	10:15	34	17	402	1,868	15,99
	10:25	33,5	17	402	1,901	15,8
	10:35	33	17	493	2,335	15,76
	10:45	34,5	17	530	2,485	15,57

	10:55	36	17	493	2,381	15,35
	11:05	34,1	17	521	2,468	15,51
	11:15	38,1	17	633	3,019	14,95
	11:25	40,3	17	598	2,931	14,46
	11:35	39	17	562	2,689	15,15
	11:45	38,5	17	716	3,431	14,59
	13:35	51	19	860	3,903	14,35
	14:15	56,3	19	852	3,948	13,79
	14:25	52	19	992	4,486	13,94
	14:35	60,3	19	989	4,607	13,17
	14:55	48	18	962	4,386	13,56
	15:05	51,5	18	944	4,345	13,74
	15:15	52,5	18	946	4,32	13,7
	15:25	53,5	18	922	4,128	14,14
	15:35	52,1	18	916	4,136	14
	15:50	48,1	19	920	4,153	14,05
	16:00	59,1	19	882	3,853	14,11
	16:10	53,7	20	880	3,965	13,96
	16:20	51,6	20	859	3,882	14
22_04_2010	10:30	32	18	403	2,01	16,01
	11:30	48	21	598	2,802	14,98
	12:00	55,5	22	700	3,281	14,17
	12:45	43,4	20	808	3,777	14,78
	13:30	54,1	20	974	4,503	13,68
	14:30	33,3	20	552	2,71	15,2
26_04_2010	11:00	39,1	17	550	2,422	15,64
	12:30	48,7	18	798	3,506	14,73
	14:30	60,7	22	955	4,378	13,4
	15:15	60	22	937	4,257	13,54
	16:25	51	21	824	3,757	14,34
	16:45	50,5	21	798	3,657	14,44
	17:00	50,3	20	769	3,523	14,56
27_04_2010	12:50	48,5	18	841	3,673	14,69
	13:30	55,1	18	906	4,136	13,62
	14:30	61,3	19	983	4,57	12,95
	14:40	58,8	19	996	4,62	13,08
	15:35	54,5	19	973	4,44	13,93
28_04_2010	11:15	41	19	559	2,631	15,39
	12:30	49,8	19	784	3,682	14,34
	13:00	49,3	19	859	4,049	14,01
	14:25	57,4	20	930	4,232	13,88
	15:00	57,6	20	929	4,144	14,02
	15:15	59	21	881	4,169	13,22
	16:00	53	21	830	3,773	14,22
	16:45	46,5	20	788	3,627	14,43
	17:25	44,3	20	627	3,048	15,24
29_04_2010	13:00	45,6	18	826	3,715	14,33
	14:05	50	18	937	4,219	13,97
	14:07	50	18	916	4,086	13,72
	14:10	48,7	18	849	3,99	13,9
	15:22	51,2	19	964	4,382	13,8
	15:25	53,6	19	939	4,274	13,99

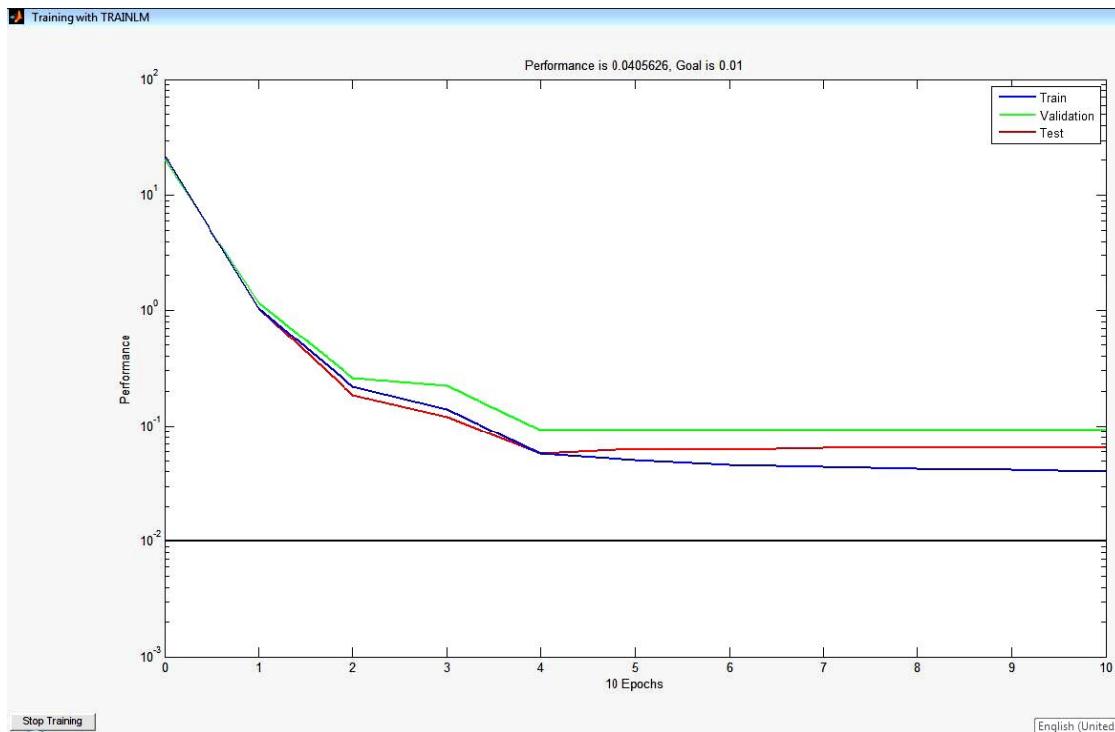
	15:27	53,5	19	911	4,249	13,62
	16:15	51	19	900	4,074	14,14
	16:17	51	19	902	4,119	14,03
	16:20	50,3	19	877	4,049	14,08
	16:30	50,3	19	890	3,886	14,46
	16:32	48,8	19	868	4,082	13,99
	16:35	48,8	19	861	3,919	14,44
	16:45	48	19	839	3,832	14,33
	16:47	47,5	19	849	3,84	14,28
	16:50	46	19	828	3,698	14,74
	17:00	48,5	19	805	3,673	14,4
	17:02	48	19	802	3,715	14,3
30_04_2010	10:25	26	16	217	1,113	16,26
	10:27	28,5	16	172	0,867	16,21
	10:53	33,5	16	344	1,689	15,98
	10:55	34	16	248	1,247	15,84
	11:05	35,4	17	334	1,58	16,47
	11:07	35	17	245	1,209	16,22
	11:35	37,5	18	451	2,176	15,64
	11:40	38,8	18	344	1,651	15,76
	12:20	40,7	20	394	1,91	15,11
	12:23	41,1	20	560	2,702	15,06
	13:35	51	21	849	3,798	14
	13:37	52,3	21	719	3,306	14,2
	14:30	50,2	21	1021	4,445	13,42
	14:35	53,7	21	932	4,082	13,82
	14:45	52,5	21	948	4,119	13,98
	15:27	54,3	21	972	4,311	13,74
	15:30	58	21	910	4,219	13,64
	16:10	52,5	21	900	4,265	13,62
	16:11	57,2	21	931	4,286	13,59
3_05_2010	11:05	35	17	529	2,297	15,48
	11:10	35	17	342	1,484	16,26
	11:50	42,3	17	626	2,785	15,32
	11:54	42,3	17	491	2,164	15,33
	13:15	48,2	18	736	3,427	14,3
	13:17	48,2	18	831	3,861	14,22
	14:32	47,1	18	853	3,89	14,5
	14:35	47,1	18	805	3,765	14,33
	15:30	39,7	19	654	3,106	15,01
	15:35	39,7	19	611	2,923	15,19
	16:30	36,1	19	681	3,185	15,3
	16:32	36,1	19	691	3,244	15,34

Anexa 2

Algoritmul Levenberg-Marquardt (LM)

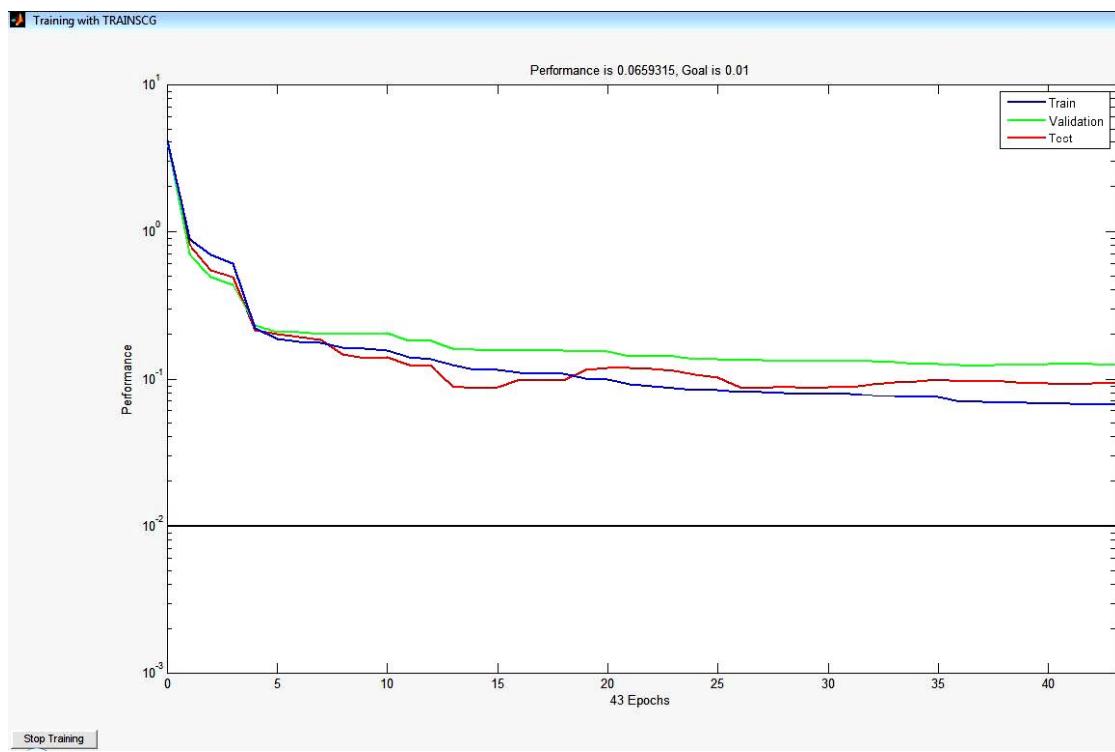


Variația erorii pătratice medii la antrenare pentru o rețea cu 1 strat ascuns cu 5 neuroni

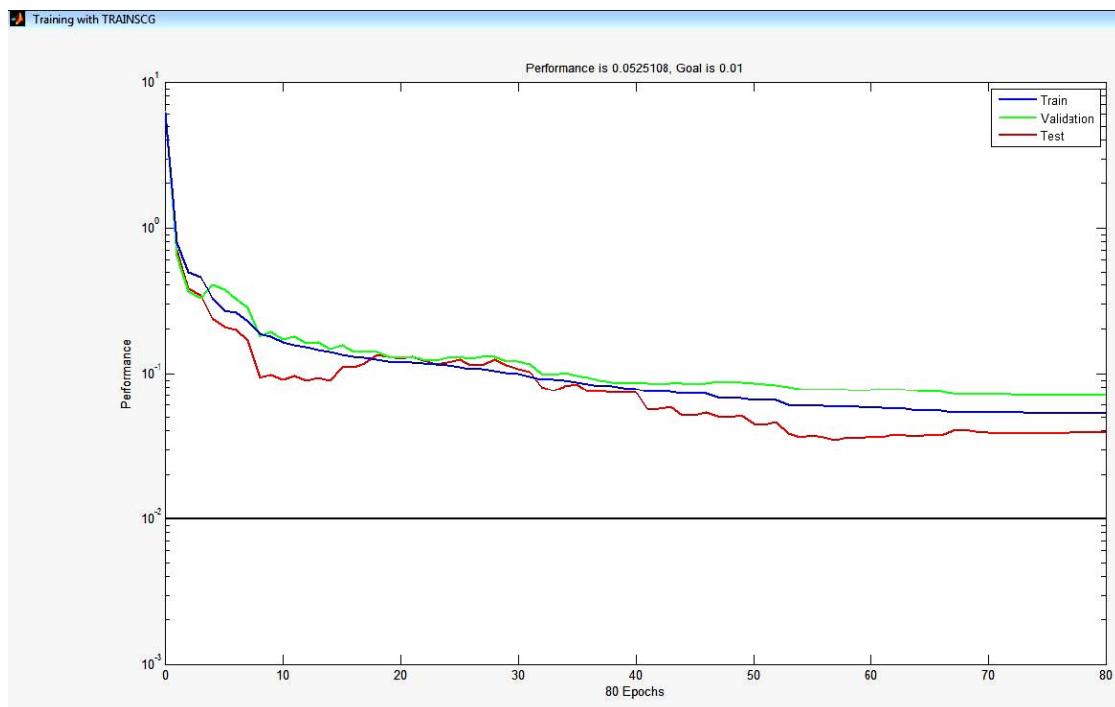


Variația erorii pătratice medii la antrenare pentru o rețea cu 2 straturi ascunse a câte 5 neuroni

Algoritmul Scaled Conjugate Gradient (SCG)



Variatia erorii pătratice medii la antrenare pentru o rețea cu 1 strat ascuns cu 5 neuroni



Variatia erorii pătratice medii la antrenare pentru o rețea cu 2 straturi ascunse a câte 5 neuroni

Anexa 3

Matricele ponderilor sinaptice ale modelului neuronal implementat pe PIC 16F877

$$IW\{1,1\} = \begin{pmatrix} 7,165959 & -2,96736 \\ -7,72097 & 2,511454 \\ -0,03271 & -1,42184 \\ -6,87699 & 5,554355 \\ -10,3008 & 6,270935 \end{pmatrix}$$

$$LW\{2,1\} = \begin{pmatrix} -0,704773703 & -0,4278 & 2,992942 & 0,384511 & 0,167443 \\ 0,027671773 & 0,033297 & -2,81877 & 0,064593 & -6,3E-05 \end{pmatrix}$$

$$B\{1\} = \begin{pmatrix} -4,35369 \\ 2,714558 \\ 0,264957 \\ -6,72572 \\ -1,96185 \end{pmatrix} \quad B\{2\} = \begin{pmatrix} -1,33217 \\ 1,541765 \end{pmatrix}$$

Legenda

I – Input
L - Layer
W- Weight
B - Bias
{To layer , From layer}
{Of layer}

Listă de notații, abrevieri și indici

a	Difuzivitate termică, $\left[\frac{m^2}{s} \right]$
A	Aria, $\left[m^2 \right]$
c	Constanta de învățare a unei rețele neuronale statice
	Viteza luminii în vid, $3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$
c_p	Căldură specifică masică, $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$
D	Matricea valorilor dorite, folosită la antrenarea rețelelor neuronale statice Domeniul analogic de măsură
e	Sarcina electronului, $1,6 \cdot 10^{-19} [C]$
E	Energia, $[J]$
g	Accelerația gravitațională, $\left[\frac{m}{s^2} \right]$
G	Intensitatea radiației solare, $\left[\frac{W}{m^2} \right]$
h	Coeficient de transfer termic convectiv, $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ constanta lui Planck, $6,626 \cdot 10^{-34} [W \cdot s^2]$
I	Curentul electric, $[A]$
k	Constanta lui Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]$
n	Coeficient de idealitate ai diodei

- \dot{q} Flux termic, $\left[\frac{W}{m^2} \right]$
- r Funcție de învățare al unei rețele neuronale statice
- P Puterea, $[W]$
- R Rezistență electrică, $[\Omega]$
- $S_{\alpha,\beta}$ Coeficientul Seebeck, $[-]$
- T Temperatura, $[K]$
- U Tensiunea electrică, $[V]$
- u Vectorul viteză, $\left[\frac{m}{s} \right]$
- W Matricea ponderilor sinaptice a unei rețele neuronale statice
- X Matricea valorilor de intrare a unei rețele neuronale statice
- Y Matricea ieșirilor unei rețele neuronale statice

Simboluri grecești

- α Coeficientul de absorbție, $[-]$
Factor de umplere sau raport ciclic folosit la convertizoarele MPPT, $[-]$
- β Coeficient de dilatare termică, $\left[\frac{1}{K} \right]$
- ε Emisivitatea materialului, $[-]$
- λ Conductivitatea termică, $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
- η Randamentul unui modul termoelectric, $[-]$
- ρ Densitatea, $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$
- ∇ Nabla vector (operator), $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \boldsymbol{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \boldsymbol{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \boldsymbol{e}_z$

ν Frecvență, [H_z]

σ Constanta Stefan-Boltzmann, $5,6704 \cdot 10^{-8} \left[\frac{J}{s \cdot m^2 \cdot K^4} \right]$

τ Transmitanță, [-]

Abrevieri

FOM Figure-of-merit

PV Fotovoltaic

STC Codii Standard de Test: $G = 1000 \frac{W}{m^2}$, $T_c = 25^\circ C$, $AM = 1,5$ (airmass)

TEM Modul termoelectric

Indici

A absorbit

a analogic
ambiant

b corp negru (black body)

B suprafața inferioară a panoului fotovoltaic

c celulă fotovoltaică

d în sens direct

E extras

e electric

gap bandă

i incident

J provenit din efect Joule

lw lungime mare de undă (long wave)

<i>oc</i>	circuit deschis (open circuit)
<i>p</i>	paralel panou
<i>ref</i>	referință
<i>ph</i>	fotovoltaic
<i>s</i>	saturație serie provenit din efect Seebeck
<i>sc</i>	scurt circuit
<i>sw</i>	lungime mică de undă (short wave)
∞	fluid
<i>W</i>	suprafața peretelui de montaj al panoului fotovoltaic