

**Ionel Laurențiu ALBOTEANU**

**SISTEME FOTOVOLTAICE AUTONOME  
PERFORMANTE**



**EDITURA UNIVERSITARIA  
Craiova, 2013**

Referenți științifici:

Prof.univ.dr. ing. Gheorghe MANOLEA  
Universitatea din Craiova

Prof. univ.dr.ing. Sergiu IVANOV  
Universitatea din Craiova

Copyright © 2013 Universitaria

Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria

---

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României**

**ALBOTEANU, IONEL LAURENȚIU**

**Sisteme fotovoltaice autonome performante / Ionel**

Laurențiu Alboteanu. - Craiova : Universitaria, 2013

Bibliogr.

ISBN 978-606-14-0618-0

621.383.51

This work was supported by the strategic grant POSDRU/89/1.5/S/61968, Project ID 61968 (2009), co-financed by the European Social Fund, within the Sectorial Operational Programme Human Resources Development 2007-2013.

Această lucrare a fost finanțată din contractul POSDRU/89/1.5/S/61968, proiect strategic ID 61968 (2009), cofinanțat din Fondul Social European, prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013.

Apărut: 2013

**TIPOGRAFIA UNIVERSITĂȚII DIN CRAIOVA**

Str. Brestei, nr. 156A, Craiova, Dolj, România

Tel.: +40 251 598054

Tipărit în România

## Prefață

Schimbările climatice din ultimii ani au arătat o tendință de creștere a temperaturii medii globale.

Este posibil ca această încălzire să se datoreze și emisiilor de gaze cu efect de seră provenite din activități umane.

Pentru a diminua acest fenomen trebuie să adoptăm o schimbare a stilului nostru de viață – substituirea surselor de energie clasice cu surse de energie regenerabile care au drept sursă directă sau indirectă soarele. Acest pas adițional va duce la reducerea impactului de mediu al consumului nostru de energie și, în același timp, va conserva resursele de combustibili fosili.

Conversia fotovoltaică a energiei solare reprezintă una dintre cele mai atractive și dinamice opțiuni de utilizare a surselor regenerabile de energie, pentru producerea de energie electrică.

În ultimii ani, piața fotovoltaică (PV) a cunoscut o continuă creștere în ciuda faptului că ponderea energiei produse de aceste instalații este încă relativ mică, datorită randamentului de conversie scăzut comparativ cu sursele clasice de energie.

Pentru a putea concura cu sursele clasice de producere a energiei electrice, trebuie găsite soluții pentru creșterea acestui randament și pentru scăderea prețului de cost al modulelor fotovoltaice.

Utilizarea sistemelor fotovoltaice autonome pentru aplicații izolate, de mică putere, reprezintă o alternativă la sursele clasice.

Rezultatele analizelor economice arată un avantaj al utilizării sistemelor fotovoltaice, dacă aplicația izolată se află la o distanță mai mare de 2 kilometri de rețeaua electrică.

Această lucrare înglobează, în principal, rezultatele obținute de autor pe parcursul activităților de cercetare desfășurate în cadrul pregătirii doctorale și postdoctorale.

Lucrarea prezintă aspectele principale cu privire la conversia energiei solare în energie electrică, echipamentele care realizează această conversie, precum și metodele și tehnicile ce pot fi utilizate pentru creșterea eficienței energetice a sistemelor fotovoltaice autonome.

Fenomenele și procesele care au loc în sistemele fotovoltaice sunt abordate într-o manieră sistematică plecând de la modelul matematic, implementarea acestuia și validarea prin simulare numerică și experimental, pe model fizic.

În primul capitol al acestei monografii sunt prezentate aspecte cu privire la soare ca sursă de energie. Se prezintă o descriere sumară a celor mai importante fenomene solare, inclusiv spectrul solar, efectele atmosferice care influențează

radiația solară pe suprafața pământului, componentele radiației solare, măsurarea parametrilor radiației solare, etc. De asemenea sunt prezentate diferite modele matematice pentru calculul radiației solare disponibile, particularizate pentru o anumită locație. În final este prezentat modelul matematic al radiației solare absorbită de un modul fotovoltaic orientat arbitrar.

În capitolul al doilea sunt detaliate echipamentele ce asigură conversia energiei solare în energie electrică. Este prezentată structura unui sistem fotovoltaic autonom, principalele configurații de sisteme fotovoltaice, precum și aspectele ce trebuie avute în vedere pentru alegerea echipamentelor din cadrul sistemului fotovoltaic.

Capitolul al treilea este dedicat elaborării modelelor matematice pentru fiecare componentă individuală a sistemului fotovoltaic autonom, pornind de la modelul celulei fotovoltaice și terminând cu modelul consumatorilor. Validarea modelelor elaborate s-a realizat prin simulare numerică utilizând programul Matlab Simulink sau programe dedicate simulării sistemelor fotovoltaice.

Ultimul capitol prezintă, într-o manieră amplă, principalele metode și tehnici de îmbunătățire a eficienței energetice a sistemelor fotovoltaice autonome. Sunt evidențiați principalii factori ce influențează performanțele sistemelor fotovoltaice, apoi sunt prezentate câteva metode și tehnici de creștere a eficienței energetice a sistemelor fotovoltaice autonome.

Autorul își exprimă speranța ca această carte să fie utilă atât specialiștilor în domeniu (cercetători, proiectanți, cadre didactice), cât și studenților de la facultățile tehnice cu profil electric și energetic.

Craiova, februarie 2013

Autorul

## INTRODUCERE

Necesarul de energie pe cap de locuitor a crescut dramatic de la 2.000 kcal/zi în epoca primitivă la 230.000 kcal/zi în țările industrializate [115]. Un scenariu propus de Consiliul Mondial al Energiei prevede o creștere de 40% a consumului primar de energie până în anul 2020. Aceasta creștere va fi tot mai accentuată în țările în curs de dezvoltare (84%), în momentul de față ele consumând numai 30% din producția globală. Sursele primare de energie vor fi aproximativ tot cele din prezent, deși folosirea energiei nucleare este vehement combătută de opinia publică din țările civilizate. Consumul de gaz natural va înregistra o creștere de la 13,3% la 19,8% pe plan mondial (în Europa de la 6,4% la 17,6%).

Se estimează că rezervele mondiale de combustibili clasici vor fi epuizate într-un interval de timp dramatic de scurt: 40 de ani petrolul, 46 de ani gazul natural și 196 de ani cărbunele [116]. În această perspectivă omenirea mai are timp pentru dezvoltarea și implementarea unor soluții alternative.

Energia nucleară a necesitat aproape 30 de ani de cercetări și 20 de ani de implementare ca să asigure astăzi mai puțin de 10% din energia primară produsă la nivel mondial. Ciclul de cercetare-implementare este destul de lung în domeniul energetic, întinzându-se pe mai multe generații. Aceste previziuni dramatice trebuie să impună dezvoltarea bazei energetice folosind surse alternative, cel puțin în producerea de energie electrică.

Schimbările climatice îngrijorează ecologiștii și, ca urmare, politicienii lumii sunt preocupați de luarea de măsuri concrete, la nivel internațional, care să diminueze emisiile poluante, în condițiile în care consumul energetic va crește la nivel global.

Soarele este, fără îndoială, o vastă sursă de energie. Într-un singur an, el trimite spre pământ de 20.000 de ori energia necesară întregii populații a globului. În numai trei zile, pământul primește de la soare echivalentul energiei existente în rezervele de combustibili fosili.

În opțiunile energetice ale omului, electricitatea și-a câștigat un loc privilegiat. Chiar dacă unele surse neconvenționale sau convenționale de energie pot fi utile direct în instalații termice sau mecanice, preocuparea de a obține pe seama lor energie electrică rămâne pe primul plan. Dar, după cum se știe, conversiile intermediare produc pierderi foarte mari sau sunt limitate prin legi foarte "aspre" - ciclul Carnot - și astfel dorința de a ajunge la o conversie directă a unei energii primare în energie electrică este justificată.

Există o serie de astfel de generatoare, bazate pe fenomene fizice sau chimice mai mult sau mai puțin studiate, din care viitorul va reține pe cele mai eficiente sau, poate, pe cele mai ieftine și care folosesc materiale mai răspândite pe pământ.

Printre generatoarele care pot realiza conversia directă a energiei electrice și în care se pun mari speranțe, pe primul loc sunt celulele fotovoltaice, numite și celule solare, atunci când energia primară o reprezintă radiațiile soarelui.

Produsele bune nu trebuie doar să satisfacă nevoile consumatorului final, ci trebuie, de asemenea, să fie avantajoase mediului în care produsul va fi folosit. Electricitatea nu face excepție de la regulă. Electricitatea solară poate să-și aducă o importantă contribuție la păstrarea rezervelor de energie ale pământului și, în același timp poate contribui la încetinirea modificărilor climatice generale: reduce consecințele efectului de seră și ale gazelor poluante din atmosferă.

Sistemele fotovoltaice realizează conversia directă a energiei solare în energie electrică, fără o poluare sonoră și fără emisia unor gaze poluante în mediul ambiant.

Sistemele fotovoltaice au fost folosite la început pentru a echipa sateliții, după aceea pe scară mai largă la echiparea ceasurilor electronice precum și a unor calculatoare.

În ultimii 20 de ani sute de mii de sisteme fotovoltaice au fost instalate în toată lumea. Ele sunt folosite în orașe mici, precum și în sate în care implementarea unui astfel de sistem este mai rentabilă decât conectarea la rețeaua electrică sau folosirea de baterii/minigeneratoare de curent. Astfel de sisteme au funcționat perioade lungi de timp în domenii ca pomparea apei, electrificarea unor localități sau case izolate, gestionarea unor rezerve de apă, aparate de taxat pentru parcări, telecomunicații sau protecție catodică.

Totuși, în ciuda succesului acestor sisteme în toată lumea piața lor reprezintă numai un procent mic din ceea ce ar putea reprezenta piața de sisteme independente. Motivul principal nu este atât unul care ține de tehnologie cât lipsa de informație. Existența sistemelor fotovoltaice și rentabilitatea implementării lor, atât la nivel urban cât și rural nu este cunoscută de potențialii utilizatori.

De asemenea, există concepții greșite privind tehnologia fotovoltaică, ca de exemplu ideea că sistemele fotovoltaice funcționează numai în lumina solară intensă, tehnologia este prea sofisticată sau ideea ca ar fi prea scumpă comparativ cu extinderea rețelei electrice.

Principalul dezavantaj al sistemelor fotovoltaice constă în faptul că energia electrică produsă are un caracter aleator ce decurge din caracteristicile 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. De asemenea 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.

Deoarece tendința actuală este orientată spre optimizarea din punct de vedere energetic, pentru asigurarea funcționalității în condiții de maximă eficiență, s-au dezvoltat aplicații în care sistemele fotovoltaice sunt dotate cu sisteme inteligente pentru controlul funcționării, dotări care asigură personalizarea acestor aplicații.

## CAPITOLUL 1

# RADIAȚIA SOLARĂ ȘI ELEMENTE DE GEOMETRIE CEREASCĂ

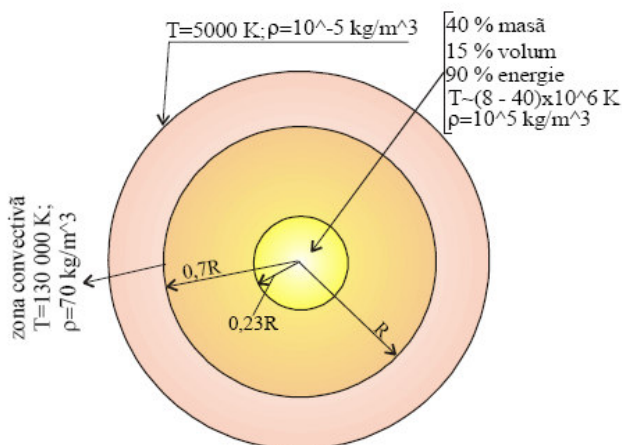
### 1.1. Noțiuni fundamentale privind radiația solară

Analiza unui sistem de conversie a energiei solare în energie electrică se bazează pe evaluarea corectă a radiației solare în amplasamentul dat. Astfel, trebuie cunoscute aspectele privind proprietățile radiației solare respectiv aspectele referitoare la elementele de geometrie cerească.

În acest capitol se prezintă o descriere sumară a celor mai importante fenomene solare, inclusiv spectrul solar, efectele atmosferice care influențează radiația solară pe suprafața pământului, componentele radiației solare, măsurarea parametrilor radiației solare, etc. De asemenea sunt prezentate diferite modele pentru calculul radiației solare disponibile pentru o anumită locație.

Sunt puse în evidență datele primare despre radiația solară pe teritoriul României, interpretarea corectă a acestora. În final, se prezintă procedura de calcul a radiației solare incidente pe planul înclinat al unui modul (panou) fotovoltaic având ca date inițiale radiația solară pe o suprafață orizontală.

**Soarele** este cea mai apropiată stea de Pământ și se află la distanța medie de  $1,4 \times 10^{11}$  m. Structura schematică a Soarelui este prezentată în figura 1.1, [91].



**Fig. 1.1.** Structura simplificată a Soarelui

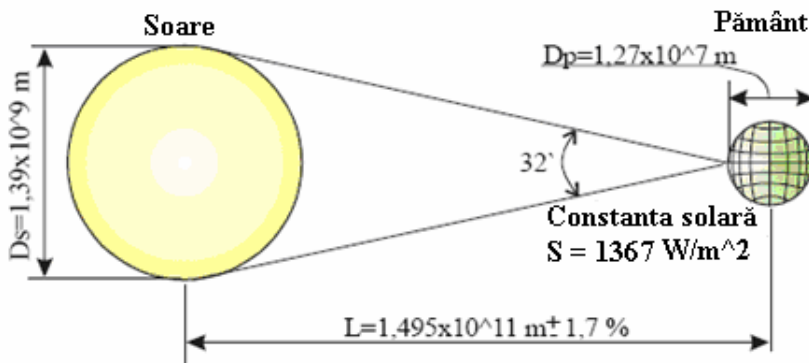
Energia Soarelui este rezultatul a mai multor reacții de fuziune nucleară, principala fiind procesul în care hidrogenul (3 protoni) fuzionează și se formează heliu.

Masa nucleului de heliu este mai mică decât masa a 3 protoni, diferența de masă se transformă în energie în conformitate cu formula a lui Einstein:

$$E=mc^2 \quad (1.1)$$

Diametrul soarelui este de aproximativ 110 ori mai mare decât diametrul pământului: respectiv  $1,39 \times 10^9$  m și  $1,27 \times 10^7$  m. Nucleul solar cu raza de aproximativ  $0,23R$  ( $R$  – raza discului solar) și un volum ce constituie 14 % din total prezintă reactorul natural termonuclear. Aici temperatura se estimează la  $(8-30) \times 10^6$  K și se degajă 90 % din energie. Nucleul are o densitate de 100 de ori mai mare decât a apei și masa lui constituie 30 % din masă totală. La o distanță de  $0,7 R$  de la centrul temperatura scade până la 130 000 K și densitatea scade până la  $70 \text{ kg/m}^3$ . Zona cuprinsă între  $0,7$  și  $1,0R$  se numește zona convectivă (se consideră că procesele termice convective sunt principale). Temperatura scade până la 4000 K, iar densitatea este foarte mică – de circa  $10^{-4} \text{ kg/m}^3$ , [91].

Pământul se rotește în jurul Soarelui pe o orbită aproximativ circulară (abaterea de la circumferință nu depășește 1.7 %). Distanța medie dintre Soare și Pământ (fig. 1.2), numită unitate astronomică, este egală cu  $1,394 \times 10^{11}$  m [89]. Soarele, fiind privit de pe suprafața pământului, prezintă un disc cu diametrul unghiular de  $32'$ . Radiația solară poate fi modelată cu cea a unui corp absolut negru cu temperatura efectivă de circa 4777 K, [91].



**Fig. 1.2. Geometria sistemului Soare-Pământ**

Calcululele radiației corpului absolut negru și rezultatele măsurărilor demonstrează că 6,3% de energie este transportată de banda ultravioletă de unde electromagnetice ( $\lambda = 0-0,38 \mu\text{m}$ ), 48 % - de banda vizibilă ( $\lambda = 038- 0,78 \mu\text{m}$ ) și 34,6 % - de bandă infraroșie ( $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$ ).

Este important să cunoaștem spectrul energetic al radiației solare pentru a înțelege efectele atmosferei asupra radiației solare și pentru a face o alegere corectă a materialelor pentru celule fotovoltaice.

Din punct de vedere energetic se cunoaște faptul că radiația solară este o emisie de unde electromagnetice cu lungimea de undă cuprinsă în gama  $(0,2-2,4) \mu\text{m}$ . Energia undelor cu lungimea mai mare de  $2,4 \mu\text{m}$  poate fi neglijată. Câteva



definiții, prezentate în continuare, vor fi utile pentru a înțelege corect acest subcapitol.

**Iradiație (iluminare)**, se măsoară în  $W/m^2$  și prezintă densitatea de putere instantanee a radiației solare. De exemplu, iradiația egală de  $1000 W/m^2$  înseamnă că în fiecare secundă pe un metru pătrat de suprafață cade un flux de energie egal cu  $1000 J$ .

**Iradieră (expunere)**, se măsoară în  $MJ/m^2$  sau  $kWh/m^2$  și prezintă densitatea de energie a radiației solare. Deci iradierea este integrala iradiației pe o perioadă de timp, oră, zi sau lună.

În cele mai multe cazuri, în literatura de specialitate, prima definiție este înlocuită cu densitatea de putere a radiației solare, iar a doua - cu radiația solară orară, diurnă, lunară sau anuală.

Parcurgând distanța de circa 140 milioane km (fig. 1.3), valoarea totală a densității de putere extraterestre (la granița dintre atmosfera terestră și spațiul cosmic) scade până la valoarea numită constanta solară. Constanta solară,  $S$ , este energia primită de la soare într-o unitate de timp de o suprafață perpendiculară pe direcția razelor solare, amplasată la distanța medie dintre soare și pământ, în afara atmosferei. În realitate, din cauza excentricității orbitei pământului, radiația extraterestră variază. În baza măsurărilor efectuate la sfârșitul anilor '90 ai secolului XX, WRC (World Radiation Center) a acceptat valoarea medie a constantei solare egală la  $1367 W/m^2$ , cu incertitudinea de 1,0 % [91].

**Masa de aer,  $m$** , caracterizează drumul parcurs de raza solară prin atmosferă până la nivelul mării. Pentru spațiul extraterestru sau dacă pământul nu ar avea atmosferă,  $m=0$ . În zona ecuatorului, când soarele se află în zenit, raza solară parcurge cea mai mică distanță,  $m = 1$ . Pentru unghiuri zenitale,  $\theta_z$  (unghi zenital – unghiul dintre verticala locului și direcția spre soare) cuprinse între 0 și 700 masa de aer  $m$  poate fi calculată cu expresia:

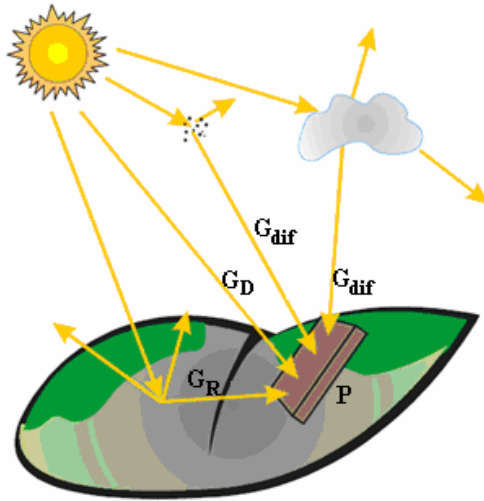
$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1.4)$$

Dacă  $\theta_z$  este egal cu  $60^\circ$ , masa de aer  $m = 2$ , altfel spus, raza solară va parcurge un drum prin atmosferă de 2 ori mai mare decât în cazul când  $\theta_z = 0^\circ$ . În cazul al doilea raza solară va fi atenuată mai mult și ea va transporta mai puțină energie. Prin aceasta se explică micșorarea intensității radiației solare în emisfera de nord, respectiv de sud în comparație cu zona ecuatorială.

**Radiația directă**, reprezintă radiația primită de la soare fără a fi împrăștiată (fig. 1.4) de atmosferă. Umbra unui obiect apare numai atunci când este radiație directă. În continuare, radiația directă va fi notată cu  $G_D$ .

**Radiația difuză**, notată cu  $G_{dif}$ . Raza solară trecând prin atmosferă este împrăștiată, altfel spus, difuzată în toate direcțiile (fig. 1.3). Radiația difuză este prezentă întotdeauna, chiar și într-o zi senină această componentă constituie circa 10%. În acest caz razele solare sunt împrăștiate de moleculele de oxigen, bioxid de carbon, particule de praf, etc. și cerul capătă culoarea albastră.

Dacă cerul este acoperit cu nori, atunci radiația directă este egală cu zero, este prezentă numai radiația difuză.



**Fig. 1.3.** Componentele radiației solare pe suprafața panoului fotovoltaic,  $P$ :  $G_D$ -directă;  $G_{dif}$ - difuză;  $G_R$ - reflectată

**Radiația solară totală sau globală.** Suma celor două componente reprezintă radiația,  $G_g$ , globală pe o suprafață oarecare. În cele mai multe cazuri se măsoară și se operează cu noțiunea de radiație globală pe o suprafață orizontală. Din definiție rezultă:

$$G_g = G_D + G_{dif} \quad (1.6)$$

**Albedo sau radiația reflectată**, notată cu  $G_R$ . De obicei, se operează cu radiația reflectată de suprafața pământului și care cade pe panoul fotovoltaic. În cele mai multe cazuri, această componentă nu se ia în calcul, cu excepția colectoarelor sau panourilor fotovoltaice bifaciale. Astfel, radiația totală incidentă pe suprafața unui corp va fi egală cu suma radiației directe, difuze și reflectate (fig. 1.3):

$$G_g = G_D + G_{dif} + G_R \quad (1.7)$$

Mai sus s-a menționat că densitatea de putere radiantă,  $S$ , în spațiul extraterestru este constantă și egală cu  $1367 \text{ W/m}^2$ . În fiecare interval de timp Pământul primește aceeași cantitate de energie calculată prin înmulțirea  $S$  la suprafața expusă iradierii și la intervalul de timp care ne interesează fie o secundă, un minut, o oră, etc. Suprafața expusă iradierii este egală cu  $\pi R^2$ , unde  $R$  este raza pământului, iar suprafața totală a globului pământesc este  $4\pi R^2$ . Astfel, densitatea medie de putere radiantă,  $S_{med}$ , captată de pământ va fi:

$$S_{med} = \frac{S}{4} = \frac{1367}{4} = 342 \text{ W/m}^2 \quad (1.8)$$

În continuare se analizează particularitățile radiației solare pe suprafața pământului în ipoteza că densitatea medie de putere radiantă la granița dintre atmosfera pământului și spațiul cosmic este constantă. Razele solare trecând prin