

Capitolul 6 – Energia solară

1. Aspecte generale

Conversia energiei solare reprezintă, în prezent, unul din obiectivele cele mai importante ale tuturor strategiilor energetice din lume. Această formă de energie este principala speranță pentru asigurarea necesarului de energie pe termen lung, cu efecte minime asupra mediului.

Principalele avantaje ale energiei solare, care îi conferă un astfel de statut prioritar, sunt următoarele:

- este o resursă inepuizabilă;
- este disponibilă practic tuturor zonele intens populate, fiind cea mai uniform repartizată sursă de energie;
- este accesibilă fără costuri;
- impactul utilizării acesteia asupra mediului este minim.

Cu toate acestea, există însă și o serie de dezavantaje care nu pot fi trecute cu vederea, cele mai importante fiind:

- variația periodică a potențialului, datorată mișcărilor de rotație și revoluție a planetei;
- influența condițiilor meteorologice;
- densitatea de putere redusă a radiației solare incidente, ceea ce implică necesitatea unor suprafețe mari pentru captarea acesteia;
- utilizarea, pe viitor, la scară foarte mare a radiației solare pentru consum poate conduce la perturbarea bilanțului energetic al planetei.

Conversia energiei solare este posibilă prin mai multe procedee, în prezent cel mai frecvent utilizată fiind conversia termică. Viitorul va aparține, probabil mai ales conversiei fotoelectrice, dar pentru aceasta sunt necesare însă eforturi însemnate de dezvoltare tehnologică. Alte forme de conversie, mai puțin utilizate în sectorul energetic, sunt conversia fotochimică, respectiv mecanică.

2. Potențialul energetic solar

Energia solară provine de la astrul Soare sub forma unor radiații cu lungimi de undă diferite. Din punctul de vedere al energiei emise, soarele poate fi echivalat cu un corp negru având temperatura la suprafață de 5778 K.

Distanța dintre Pământ și Soare este cunoscută sub denumirea de unitate astronomică (ua), valoarea acesteia fiind de aproximativ $1,5 \cdot 10^6$ km. Ținând cont de această distanță și de dimensiunile globului terestru, se estimează că acestuia îi revine $2 \cdot 10^{-9}$ din radiația emisă de soare.

2.1. Radiația solară extraterestră

Energia emisă de soare sub formă de radiații electromagnetice poate fi caracterizată prin *constanta solară* și prin *distribuția spectrală*.

Constanta solară reprezintă cantitatea de energie care revine, în unitatea de timp, unei unități de suprafață expusă normal razelor de soare și aflată la distanța de o unitate astronomică față de soare. Mărimea standard (medie anuală) a constantei solare este:

$$E_0 = 1367 \text{ W/m}^2 = 1,94 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min.}$$

Datorită mișcării de revoluție a planetei, distanța față de soare variază pe parcursul unui an, fapt care se răsfrânge și asupra valorii constantei solare. Astfel, constanta solară variază pe parcursul unui an între 1321 W/m^2 , respectiv 1412 W/m^2 .

Distribuția spectrală a radiației solare se exprimă prin intensitatea radiației, I_λ , în funcție de lungimea de undă. Mărimea I_λ ($\text{W/m}^2 \cdot \mu$) se poate exprima prin relația:

$$I_\lambda = c \cdot w(\lambda) \quad (6.1)$$

în care:

- c este viteza luminii,
- $w(\lambda)$ reprezintă energia înmagazinată în unitatea de volum a spațiului prin care se propagă unda electromagnetică, corespunzătoare lungimii de undă λ .

Distribuția spectrală a radiației solare este reprezentată grafic în figura 6.1. Așa cum se poate observa, intensitatea maximă a radiației se regăsește în domeniul vizibil, pentru $\lambda = 480 \text{ nm}$ (culoarea albastră). În același timp se poate observa cum intensitatea radiației solare este mai scăzută la nivelul mării (zona marcată cu verde) decât la intrarea în atmosfera terestră (suprafața marcată cu albastru), ca urmare a proceselor de absorbție și reflexie ce au loc în urma trecerii prin atmosferă.

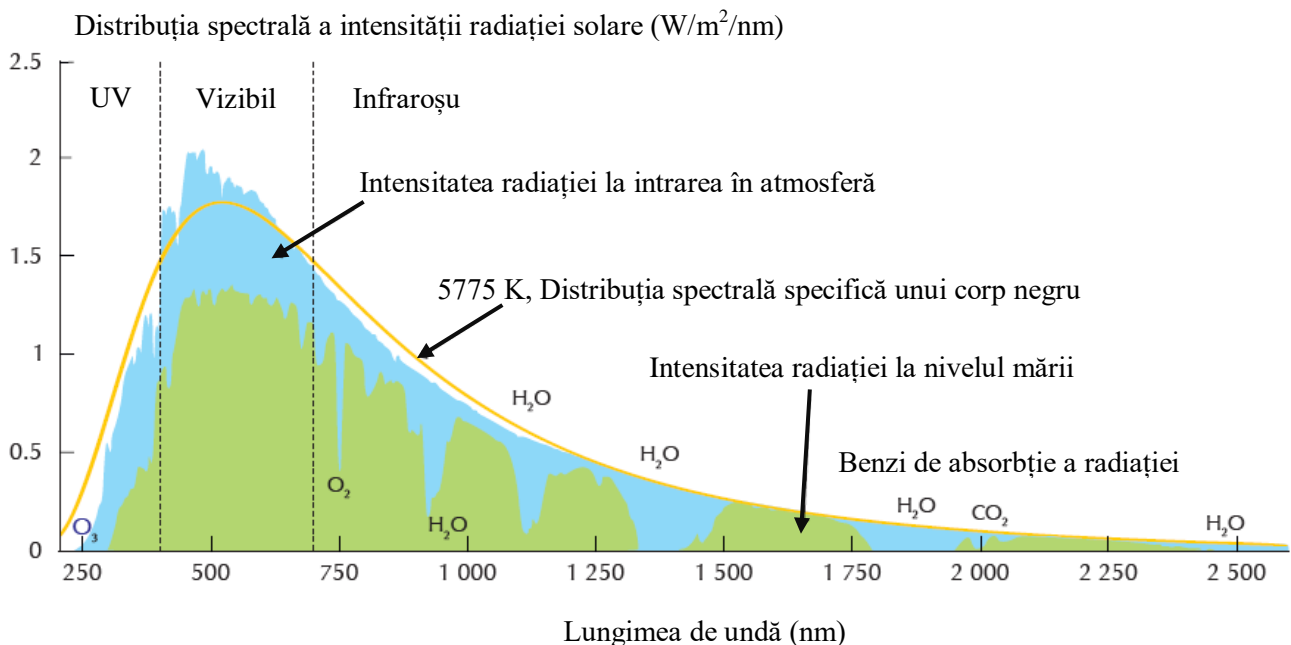


Fig.6.1. Distribuția spectrală a radiației solare.

Suprafața cuprinsă între curba distribuției spectrale și axa absciselor reprezintă, numeric, mărimea constantei solare, ce poate fi determinată cu relația:

$$E_0 = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad (6.2)$$

Ponderea domeniilor de lungimi de undă din spectrul solar în formarea constantei solare, este dată în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1. Componenta spectrală a constantei solare

Domeniul	Domeniul de lungimi de undă (nm)	Ponderea domeniului (%)	Ponderea cumulată (%)
Ultraviolet	150 – 380	3	3
Vizibil	380 – 780	42	45
Infraroșu	780 – 3.000	55	100

Semnificațiile celor două caracteristici ale radiației solare sunt importante în ceea ce privește procedeele de conversie ale acesteia. Din analiza distribuției spectrale a radiației solare (figura 6.1) se constată că intensitatea maximă a radiației se regăsește în domeniul vizibil, radiația luminoasă fiind, astfel, singurul tip de radiație ce poate fi utilizat în procesul de conversie fotoelectrică. În același timp pentru conversia termică a radiației solare este de dorit o valoare cât mai ridicată, pe o perioadă de timp cât mai îndelungată, a constantei solare.

2.2. Radiația solară la nivelul solului

La nivelul solului radiația solară incidentă este mai redusă cantitativ, variația în timp a acesteia fiind determinată de următorii factori:

- factori geofizici: latitudine, longitudine, altitudine, sezon, zi, oră;
- factori meteorologici: nebulozitatea și umiditatea atmosferei, prezența vântului;
- poluarea atmosferei: prezența suspensiilor solide și a unor gaze de proveniență artificială.

La trecerea prin atmosfera terestră radiația solară suferă o serie de procese de reflecție, absorbție și transmisie, astfel încât la nivelul solului există mai multe componente ale radiației solare, după cum urmează:

- **radiația directă (B)** – reprezintă componenta primită direct de la Soare, fără a suferi procese de împrăștiere, constând în fascicule de raze paralele, măsurate după direcția normalei la suprafață (se notează cu B);
- **radiația difuză (D)** – reprezintă radiația care ajunge la suprafața Pământului, din toate direcțiile în urma proceselor de împrăștiere. Aceasta reprezintă, chiar și în condiții de cer senin, 5-15% din valoarea radiației directe;
- **radiația reflectată (R)** – reprezintă componenta radiației solare reflectată de către sol sau diverse suprafețe, valoarea acesteia fiind dependentă de valoarea indicelui albedo, specific fiecărei suprafețe. De regulă această componentă este neglijată;
- **radiația globală (G)** – reprezintă suma componentelor directe și difuze a radiației solare.

Ca urmare a tuturor acestor procese, la nivelul solului se constată scăderea intensității radiației solare, cu aproximativ 30%, ceea ce înseamnă că valoarea maximă a densității de putere a radiației solare este de aproximativ 1000 W/m^2 , înregistrată în cele mai favorabile condiții (la amiază, în condiții de cer senin).

Determinarea intensității radiației solare la nivelul solului se poate realiza prin mai multe procedee și anume:

a. Metoda analitică – constă în determinarea constantei solare prin modelarea matematică a proceselor din atmosfera la trecerea radiației solare. Sunt vizate în principal procesele de absorbție, difuzie și reflexie ce apar la interacțiunea radiației solare cu moleculele componente ale atmosferei terestre (azot, oxigen, aerosoli, etc.)

Toate aceste procese conduc la atenuarea radiației solare incidente, mărimea atenuării depinzând de lungimea traseului parcurs și de lungimea de undă a radiației, conform relației:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-c_{\lambda} m} \quad (6.3)$$

în care: c_{λ} este un coeficient de atenuare, iar m este masa relativă a aerului prin care exprimă astfel influența lungimii traseului parcurs de radiația solară.

Expresia (6.3) este valabilă în condițiile în care se consideră că procesele de absorbție, difuzie și reflexie se desfășoară uniform pe întreaga grosime a atmosferei. Aplicarea metodei analitice presupune cunoașterea, în detaliu, a compoziției atmosferei ca și mărimea factorilor de atenuare în funcție de lungimea de undă a radiației. Din acest motiv, metoda analitică poate fi utilizată numai pentru anumite condiții standard ale atmosferei.

b. Măsurarea directă – se poate realiza prin conversia radiației solare, utilizând aparate speciale de măsură în acest scop. Cele mai utilizate aparate sunt cele cunoscute sub denumirea de piranometre și pot asigura măsurarea intensității radiației solare atât prin conversia termică a acesteia, cât și prin conversie fotovoltaică.

Fiecare dintre procedeele amintite prezintă o serie de avantaje și dezavantaje, după cum urmează:

- piranometrele ce utilizează conversia termică absorb integral radiația solară incidentă, asigurând astfel o precizie foarte bună de măsurare, dar au o inerție termică ce nu le permite urmărirea variațiilor rapide ale radiației incidente;
- piranometrele bazate pe conversia fotoelectrică utilizează numai o parte a spectrului radiației solare (domeniul vizibil), având însă o viteză foarte bună de răspuns.

Cele mai folosite sunt aparatele bazate pe conversia fotoelectrică, acestea fiind însă etalonate în raport cu aparatele de conversie termică.

Un alt tip de aparat utilizat pentru măsurarea radiației solare îl reprezintă pirheliometru, acesta permițând, însă, doar măsurarea componentei directe a radiației solare. Principiul de măsurare are la bază tot conversia termică a radiației solare.

c. Metoda de corelare – presupune prelucrarea măsurărilor efectuate asupra radiației solare la nivelul solului, respectiv asupra altor parametri meteorologici, în vederea deducerii unor corelații între densitatea de putere a radiației solare și factorii meteorologici, respectiv alți parametri fizico-

geografici (durata de strălucire a soarelui, temperatura aerului, umiditatea atmosferică, etc.). Astfel de corelații pot fi utile pentru aprecierea oportunității utilizării energiei solare, mai ales în absența altor măsurători.

Dintre cele trei metode de măsurare prezentate, cea mai folosită este metoda măsurării directe.

2.3. Indicatori ai potențialul energetic solar

Potențialul energetic solar este caracterizat printr-o serie de parametrii, cei mai importanți fiind următorii:

- densitatea de putere a radiației solare (constanta solară – W/m^2);
- densitatea de energie a radiației solare (insolația – kWh/m^2);
- durata zilnică de strălucire a soarelui (ore);
- numărul de zile însorite pe o anumită perioadă (lunar, anual).

În afară de cei menționați anterior, evaluarea potențialului energetic solar al unui amplasament se poate face folosind doi indicatori sintetici numiți amplitudinea radiației, respectiv fluctuația radiației.

Pentru definirea acestora este necesară însă cunoașterea valorilor lunare, minime și maxime, a densității medii a energiei solare pentru un anumit amplasament (Q_{min} , Q_{max}). Pentru referință se folosește densitatea medie maximă a energiei solare în cel mai favorabil loc de pe suprafața planetei ($Q_{MAX} = 23 \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{lună}$).

Astfel, amplitudinea și fluctuația radiației se definesc conform expresiilor următoare:

$$A = Q_{max} / Q_{MAX} \quad (6.4)$$

$$F = 1 - Q_{min} / Q_{max}. \quad (6.5)$$

Folosind datele cunoscute cu privire la disponibilul de energie solara pe teritoriul României, rezultă:

- amplitudinea radiației are valori între 70% și 80%, ceea ce corespunde grupei a III-a;
- fluctuația radiației are valori între 70% și 80%, corespunzător grupei a III-a.

Aceste valori caracterizează potențialul energetic solar al țării ca fiind considerabil, putând fi utilizat cu precădere în sezonul estival, aprilie - octombrie.

3. Conversia fotoelectrică a energiei solare

Transformarea directă a energiei radiante solare în energie electrică are loc prin intermediul unor fenomene care se produc în structura cristalină a unor corpuri solide, ca urmare a absorbției fotonilor care compun radiația incidentă. Aceste fenomene constituie efectul fotoelectric, care poate fi clasificat astfel:

- **efectul fotoelectric extern** - se manifestă la unele metale și constă în extragerea de electroni de conducție din metalul expus radiației solare;
- **efectul fotoelectric intern** – constă în generarea de purtători de sarcină liberi (electroni și goluri) în interiorul unor materiale semiconductoare.

Pentru producerea unor cantități semnificative de energie electrică prezintă interes numai efectul fotoelectric intern. Dispozitivele realizate pentru utilizarea acestui fenomen se numesc celule

solare (fotovoltaice, fotoelectrice). Din punct de vedere structural, celulele fotoelectrice sunt formate din două zone, realizând o joncțiune, care poate fi de mai multe tipuri:

- homojoncțiune, în care cele două zone sunt formate din același material semiconductor, având tipuri de conducție diferite;
- heterojoncțiune, în care cele două zone sunt formate din materiale semiconductoare diferite, având, de asemenea, tipuri de conducție diferite;
- joncțiune metal-semiconductor (celula Schottky);
- joncțiune electrolit-semiconductor.

Așa cum se poate observa enumerarea anterioară, toate tipurile de joncțiuni ce permit producerea efectului fotovoltaic conțin cel puțin un element semiconductor, întrucât doar în cazul acestor materiale energia fotonilor radiației luminoase incidente este suficient de mare pentru a permite electronilor să treacă din banda de valență în cea de conducție.

În mod normal, electronii ocupă diferite nivele energetice, numite benzi energetice, în jurul nucleelor atomilor materialului respectiv. Aceste benzi energetice sunt despărțite de benzi energetice interzise, inaccesibile pentru electroni, așa cum se poate observa și din figura 6.2.

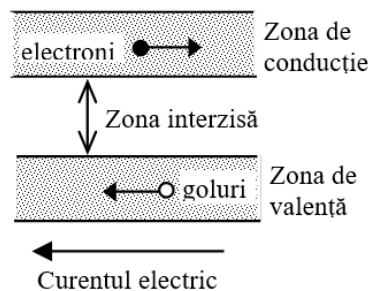


Fig.6.2. Reprezentarea benzilor de valență și conducție, respectiv a benzii interzise în cazul unor izolatoare.

Nivelul acestor benzi energetice diferă la fiecare material, astfel diferența de potențial energetic ΔE , dintre banda de conducție și banda de valență, este diferența dintre nivelurile energetice al benzii de conducție și cel al benzii de valență, și reprezintă valoarea benzii interzise. În cazul siliciului monocristalin, valoarea benzii interzise este $\Delta E \approx 1,1$ eV (electron-volt), iar în cazul siliciului amorf $\Delta E \approx 1,7$ eV. Aceste valori reprezintă energia ce trebuie transmisă electronilor aflați în banda de valență pentru ca aceștia să devină liberi, adică să poată trece în banda de conducție.

Principalele fenomene prin care are loc conversia fotoelectrică se pot explica cel mai simplu în cazul homojoncțiunii semiconductoare.

3.1. Efectul fotoelectric în homojoncțiunea P-N

a. Formarea joncțiunii P-N

O homojoncțiune este alcătuită din două zone realizate din același material semiconductor, ce diferă însă prin tipul purtătorilor de sarcină majoritari. Aceste zone sunt realizate prin doparea materialului semiconductor (ex: siliciu) cu atomi ai unor alte elemente.

Atomul de siliciu are un număr de patru electroni în stratul de valență, prin intermediul cărora se realizează legăturile covalente cu atomii învecinați. Prin introducerea în cristalul de siliciu a unor atomi de bor, cu doar trei electroni pe stratul de valență, legăturile covalente ce se formează între atom vor fi incomplete. Spațiile libere neocupate de către electroni sunt asimilate unor sarcini electrice pozitive, fiind cunoscute sub denumirea de *goluri*. În acest mod, în zona *P* a homojoncțiunii purtătorii majoritari de sarcină vor fi golurile.

Zona *N* se obține prin doparea cristalului de siliciu cu atomi de fosfor, care deține cinci electroni pe stratul de valență. În acest caz legăturile covalente ce se formează sunt complete, existând și un exces de electroni, care va determina tipul de conducție specific acestei zone.

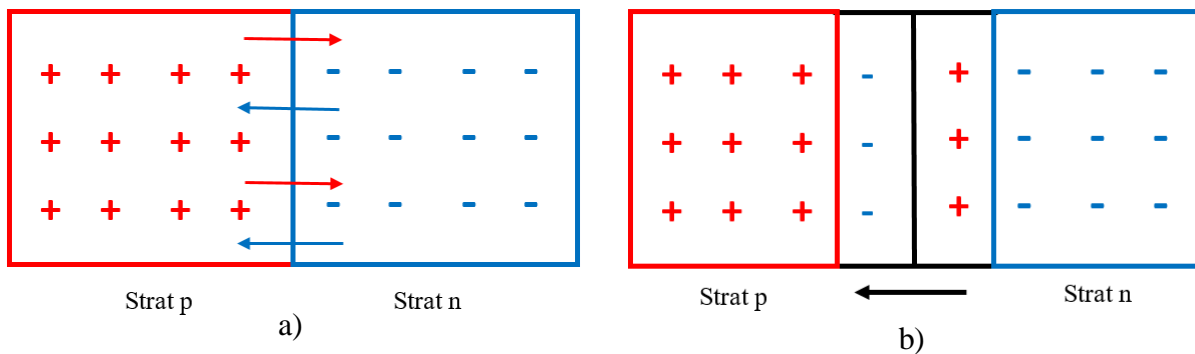


Fig.6.3. Homojoncțiune semiconductoare

Prin punerea în contact a celor două zone impurificate diferit, într-o primă fază apare tendința de migrare a sarcinilor electrice, reprezentată simbolic în figura 6.3.a. Astfel, datorită diferenței de potențial electric ce se manifestă în zona de contact, surplusul de sarcini electrice negative din stratul *N* are tendința de a migra în stratul *P*, care prezintă deficit de sarcini electrice negative. În mod analog, surplusul de sarcini electrice pozitive din stratul *P* are tendința de migrare în stratul *N*, cu deficit de sarcini electrice pozitive.

Se creează astfel câte un strat de sarcini electrice de același semn (- în zona *P* și + în zona *N*), numit strat de baraj, figura 6.3.b. Câmpul electric creat de stratul de baraj (cu intensitatea E_i) acționează ca o barieră de potențial, și se opune difuziei purtătorilor de sarcină majoritari și favorizează circulația purtătorilor minoritari, până la stabilirea unui echilibru. În acest moment curentul prin joncțiune este nul.

b. Polarizarea joncțiunii P-N

O joncțiune va fi polarizată direct prin aplicarea unei tensiune exterioară, U , în sens direct (borna + la *P*, borna - la *N*). Aceasta are ca efect reducerea barierei de potențial a joncțiunii, corespunzător cu tensiunea aplicată. În consecință prin joncțiune se reia circulația purtătorilor majoritari de sarcină din zona *N* către zona *P*, și invers. Curentul stabilizat poartă denumirea de curent de diodă, sau curent direct, valoarea acestuia fiind dată de expresia:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (6.6)$$

în care:

- q – sarcina electrică elementară ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C);
- U – tensiunea aplicată la bornele joncțiunii;
- k – constanta lui Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K);
- T – temperatura absolută;
- I_0 – curentul care circulă prin joncțiune în cazul polarizării inverse a acesteia.

c. Iluminarea joncțiunii P-N

Dacă o joncțiune nepolarizată este expusă radiației solare, atunci fotonii incidenți sunt absorbiți de către materialul semiconductor și vor genera perechi de purtători de sarcina liberi, electron-gol. Dacă acestea sunt generate în zona de influență a câmpului electric intern sau la o distanță de aceasta cel mult egal cu lungimea de difuzie a purtătorilor de sarcină în semiconductor, ei vor putea fi dirijați de către câmpul electric intern. Astfel, golurile vor migra către regiunea P , iar electronii către regiunea N .

Rezultă astfel aglomerări de sarcini libere în fiecare zonă a joncțiunii, ce conduc la apariția unei diferențe de potențial la bornele acesteia. Această situație este echivalentă celei în care joncțiunea este polarizată direct. Prin conectarea la bornele fotocelulei a unui consumator, curentul total debitat de aceasta este dat de expresia:

$$I_i = I_L - I_d = I_L - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (6.7)$$

în această expresie, U fiind tensiunea fotoelectrică ce polarizează joncțiunea în sens direct, iar cu I_L s-a notat curentul electric rezultat prin circulația purtătorilor de sarcini eliberați prin absorbția fotonilor. Acest curent este denumit curent de iluminare și are un sens invers de circulație față de curentul I_d , rezultat în urma polarizării directe a celulei.

Valoarea tensiunii fotoelectrice poate fi cel mult egală cu lățimea benzii interzise a materialului semiconductor, aceasta fiind cu atât mai mare cu cât doparea semiconductorului este mai mare. În realitate tensiunea fotoelectrică nu depășește 2/3 din lățimea benzii interzise, deoarece la dopări prea mari curentul invers crește pe seama efectului tunel.

Schema electrică echivalentă a unei fotocelule cuprinde o sursă de curent constant I_L (pentru o iluminare constantă), care debitează pe rezistența neliniară a joncțiunii $P-N$, polarizată direct și pe rezistența de sarcină R . Aceasta este redată în figura următoare:

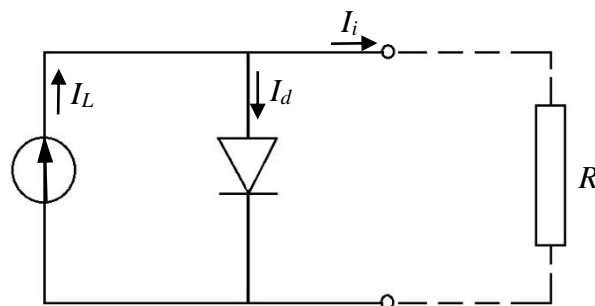


Fig.6.4. Schema electrică echivalentă a unei celule fotovoltaice

3.2. Particularitățile heteron joncțiunilor și joncțiunilor metal-semiconductor

Heteron joncțiunile sunt alcătuite din materiale semiconductoare diferite ca natură, dar ca și tip de conducție. În consecință lățimea benzilor interzise în cele două zone este diferită, astfel încât în regiunea de contact apar discontinuități ale benzilor energetice de conducție și de valență.

Din acest motiv, înălțimea barierei de potențial pentru sarcinile electrice pozitive este diferită față de înălțimea barierei de potențial a sarcinilor electrice negative. În consecință tensiunea electromotoare a heteron joncțiunii este mai mare decât în cazul homo joncțiunii, ceea ce asigură un randament mai ridicat al fotocelulei. Teoretic randamentul acestor celule poate ajunge până la 30%, dar în practică valoarea maximă atinsă este de 20%, în funcție de tipul materialelor semiconductoare utilizate.

Joncțiunile metal-semiconductor se obțin prin dispunerea unui film metalic subțire pe suprafața semiconductorului de bază. Lipsa benzii interzise în metal se transpune printr-un curent de scurtcircuit mult mai mare decât în cazul celorlalte fotocelule, dar și a unei tensiuni electromotoare mult mai mici. Din aceste considerente randamentul fotocelulelor metal-semiconductor este mult mai redus (6 ÷ 8 %).

Dispunerea peste filmul metalic al joncțiunii a unui strat de material electroizolant constituie o soluție pentru creșterea randamentului acestui tip de fotocelule. Grosimea stratului electroizolant nu trebuie să fie însă prea mare, pentru a nu introduce în circuit o rezistență electrică suplimentare prea mare.

3.3. Parametrii energetici ai celulelor fotovoltaice

a. Intensitatea curentului de scurtcircuit

Dacă bornele fotocelulei sunt conectate printr-un conductor cu rezistență electrică neglijabilă, tensiunea la borne devine nulă, iar intensitatea curentului este maximă, regimul de funcționare fiind în scurtcircuit. Considerând $U = 0$ în relația (6.7), se obține:

$$I_{sc} = I_L \quad (6.8)$$

Intensitatea curentului de scurtcircuit este direct proporțională cu intensitatea radiației solare incidente (fluxul de fotoni).

b. Tensiunea de mers în gol

Dacă la bornele fotocelulei nu este conectat un consumator, curentul debitat este nul, iar tensiunea la borne are valoarea maximă, pentru gradul de iluminare respectiv. Dacă în relația (6.7) se consideră $I_i = 0$, se obține succesiv:

$$U_0 = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (6.9)$$

Relația (6.9) arată că tensiunea de mers în gol depinde logaritmice de intensitatea radiației incidente, respectiv viteza de modificare a tensiunii de mers la gol este mult mai mică decât viteza de variație a intensității radiației solare. Se constată experimental că tensiunea de mers la gol este cu puțin mai mică dacă soarele este acoperit decât dacă soarele este aparent pe cer.

c. Puterea generată de fotocelulă

Prin conectarea la bornele unei celule fotovoltaice a unei rezistențe variabile, și prin modificarea acestei rezistențe între zero și, teoretic, infinit, curentul debitat de celulă va varia, de asemenea, între o valoare maximă, cunoscută sub denumirea de curent de scurtcircuit, I_{sc} (când bornele fotocelulei sunt scurtcircuitate, iar tensiunea la borne este evident zero) și zero (valoare specifică regimului de mers în gol, când tensiunea la bornele celulei este maximă – U_0).

Variația curentului debitat de celula fotovoltaică în funcție de tensiunea la bornele acesteia este cunoscută sub denumirea de caracteristica curent-tensiune ($I-U$) a celulei, exemplificarea grafică a acestei caracteristici fiind prezentată în figura 6.5.

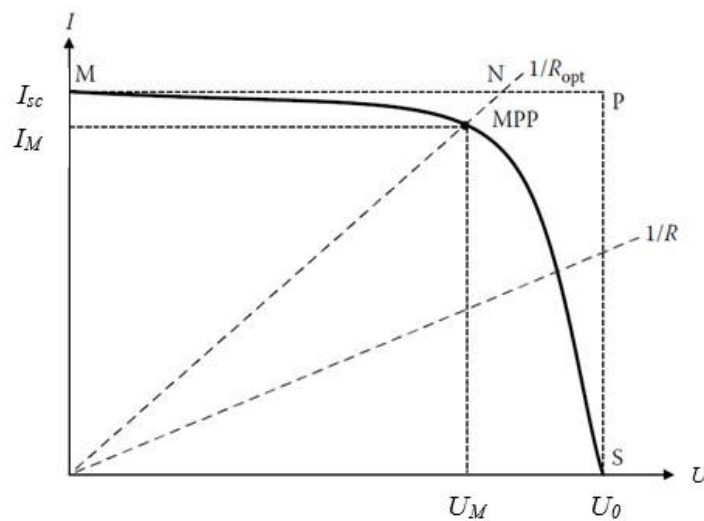


Fig.6.5. Caracteristica $I-U$ a unei celule fotovoltaice

Puterea furnizată de o celulă fotovoltaică depinde așadar de valoarea rezistenței sarcinii conectate la bornele acesteia, dar și de influența unor factori externi, precum intensitatea radiației solare, respectiv temperatura ambientală. Expresia generală a puterii generate este:

$$P = UI_i = U \left[I_L - I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \right] \quad (6.10)$$

Mărimea puterii generate variază între 0 (la funcționarea la gol și la scurtcircuit) și o valoare maximă, corespunzătoare punctului MPP din figura 6.5, punct cunoscut în literatura de specialitate și sub denumirea de punctul de putere maximă (Maximum Power Point – MPP).

Parametrii corespunzători punctului MPP se pot determina astfel:

- tensiunea U_M se poate determina cu ajutorul expresiei:

$$U_M = U_0 - \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(1 + \frac{q \cdot U_M}{k \cdot T} \right) \quad (6.11)$$

Rezultă astfel că tensiunea în punctul puterii maxime, MPP, este mai mică decât tensiunea de mers la gol, așa cum se întâmplă la orice sursă de electricitate. Relația (6.11) este implicită în raport cu parametrul U_M . Mărimea acestuia se poate determina prin calcul iterativ.

- curentul I_M se determină folosind relația:

$$I_M = (I_L + I_0) \frac{qU_M}{qU_M + kT} \quad (6.12)$$

Astfel, puterea maximă produsă de fotocelulă se poate scrie:

$$P_M = (I_L + I_0) \frac{qU_M^2}{qU_M + kT} \quad (6.13)$$

d. Factorul de umplere al fotocelulei

Factorul de umplere reprezintă un indicator în ceea ce privește calitatea unei celule fotovoltaice, acesta fiind dat de raportul dintre puterea maximă posibil realizabilă (specifică punctului de putere maximă), respectiv puterea maximă teoretică dată de produsul dintre curentul de scurtcircuit al celulei și tensiunea de mers în gol a acesteia. Valoarea se poate determina conform expresiei:

$$F_u = \frac{U_M \cdot I_M}{U_0 \cdot I_{sc}} \quad (6.14)$$

Din punct de vedere grafic, factorul de umplere reprezintă raportul dintre suprafețele celor două dreptunghiuri trasate cu linie discontinuă în figura 6.5. Este de dorit ca valoarea factorului de umplere să fie cât mai apropiată de 1, caracteristica $I-U$ a celulei fiind astfel mai rectangulară, ceea ce este util în utilizare deoarece tensiunea la borne ar scădea mai lent la creșterea curentului debitat.

e. Randamentul fotocelulei

Randamentul fotocelulei este variabil în funcție de sarcina alimentată, la fel ca și puterea electrică furnizată. Valoarea randamentului se poate calcula cu expresia:

$$\eta = \frac{P_M}{P_{in}} = \frac{U_M \cdot I_M}{A \cdot G} \quad (6.15)$$

în care: P_M reprezintă puterea maximă debitată de celulă iar P_{in} este puterea radiației incidente la nivelul celulei, obținută ca fiind produsul dintre aria suprafeței celulei, A , și densitatea de putere radiației incidente, G .

Valoarea precizată în cataloagele producătorilor indică eficiența maximă ce poate fi atinsă de fotocelula respectivă. Aceasta este calculată pentru o valoare standard a densității de putere a radiației solare ($G = 1000 \text{ W/m}^2$).

3.4. Influența factorilor externi asupra funcționării celulelor fotovoltaice

Comportarea celulelor fotovoltaice este puternic dependentă de valorile unor factori externi, cei mai importanți fiind densitatea de putere a radiației incidente, respectiv temperatura ambientală. Variațiile oricărui dintre acești doi parametri conduc în mod direct la modificarea caracteristicii curent-tensiune a celulei, și implicit a puterii maxime generate de aceasta, ca urmare a modificării poziției punctului de putere maximă. Din acest motiv determinarea continuă și cât mai precisă a punctului de putere maximă se constituie într-una din metodele de creștere a randamentului de conversie a celulelor fotovoltaice.

a. Influența intensității radiației solare asupra puterii generate de celula fotovoltaică

Așa cum s-a arătat anterior, intensitatea radiației solare la nivelul solului este mai redusă față de momentul intrării acesteia în atmosfera terestră, fapt datorat proceselor de reflecție, refracție și absorbție ce au loc la trecerea radiației prin atmosferă.

Factorii geografici, alături de cei meteorologici și de nivelul poluării atmosferice au o contribuție decisivă asupra intensității radiației solare, fiind astfel posibile variații semnificative ale acesteia în intervale de timp foarte scurte (secunde, minute).

Impactul acestor variații asupra funcționării celulei fotovoltaice este identificat la nivelul caracteristicilor $I-U$ și $P-U$ ale celulei, un exemplu de principiu fiind prezentat în figura 6.6. Așa cum se poate observa din figura menționată, scăderea intensității radiației solare conduce la reducerea semnificativă a valorii curentului de scurtcircuit al celulei și la o reducere, mai puțin importantă, a tensiunii de mers în gol a celulei.

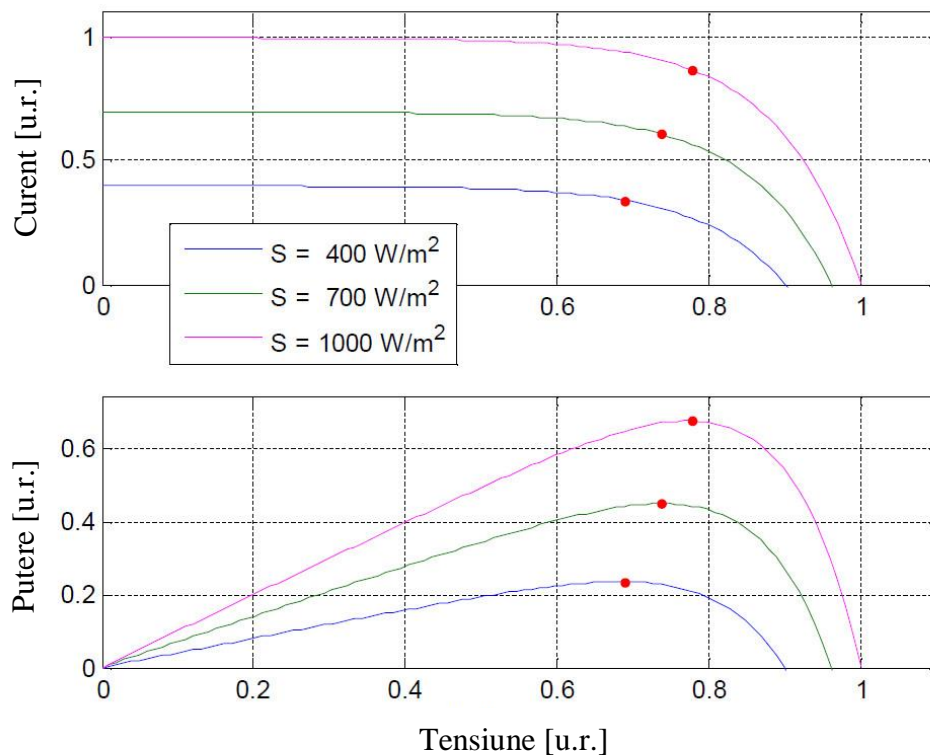


Fig.6.6. Variația caracteristicilor $I-U$ - (a) și $P-U$ - (b) ale unei celule fotovoltaice la modificarea densității de putere a radiației incidente

Acest fapt este datorat variației direct proporționale, respectiv logaritmice, a curentului de scurtcircuit și tensiunii de mers în gol, în raport cu curentul de iluminare al celulei, așa cum rezultă și din expresiile (6.8), respectiv (6.9).

În concluzie, la creșterea densității de putere a radiației solare curentul de iluminare al celulei crește și el, modificându-se deci caracteristica de funcționare $I-U$ a celulei (figura 6.6.a) și crescând implicit și puterea debitată de aceasta, așa cum rezultă din figura 6.6.b.

b. Influența temperaturii asupra puterii generate de celula fotovoltaică

Caracteristica de funcționare a unei celule fotovoltaice este influențată și de temperatura la care operează aceasta, astfel încât la creșterea temperaturii de funcționare se constată o scădere mai pronunțată a tensiunii de mers în gol a celulei, respectiv o ușoară creștere a curentului de scurtcircuit, așa cum se poate observa și din figura 6.7.a.

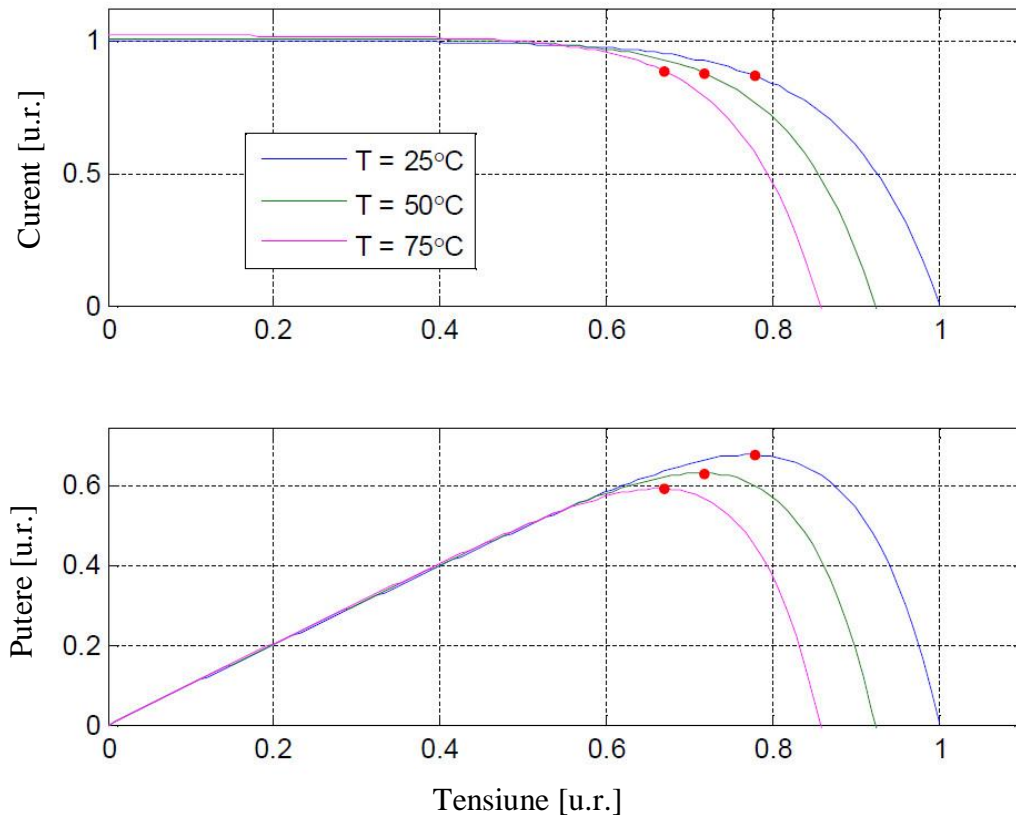


Fig.6.7. Variația caracteristicilor $I-U$ - (a) și $P-U$ - (b) ale unei celule fotovoltaice la modificarea temperaturii de funcționare a celulei

Impactul variației temperaturii de funcționare a celulei asupra curentului de scurtcircuit se poate neglija, însă variația tensiunii de mers în gol este mai pronunțată și trebuie luată în considerare, consecința directă constând în reducerea puterii generate de celulă, așa cum reiese și figura 6.7.b.

Dependența tensiunii de mers în gol de temperatura celulei fotovoltaice este una liniară, fiind dată de expresia:

$$U_0 = U_{0S} + C_3(T_c - T_{cS}) \quad (6.16)$$

în care: U_{0S} reprezintă tensiunea de mers în gol a celulei în condiții standard de temperatură, C_3 coeficient considerat egal cu $-2,3 \text{ mV/C}$, T_c și T_{cS} reprezintă temperatura reală, respectiv în condiții standard, a celulei.

3.5. Pierderi de energie în celula fotovoltaică

O fotocelulă transformă în energie electrică numai o parte din energia radiantă incidentă. Pierderile de energie apar pe parcursul desfășurării procesului de conversie în mai multe moduri, după cum urmează:

În faza în care energia este în forma de radiație:

- pierderi prin reflexie pe suprafața celulei,
- pierderi prin absorbția unor fotoni fără generare de sarcini electrice libere,
- pierderi prin traversarea fotocelulei de o parte din radiația incidentă fără a fi absorbită.

După generarea sarcinilor electrice libere în semiconductor:

- pierderi prin recombinarea sarcinilor libere, înainte de a fi dirijate de câmpul electric intern,
- pierderi datorate rezistenței interne a fotocelulei.

a. Pierderi prin reflexie

La suprafața fotocelulei au loc fenomene de reflexie și refracție, în urma cărora numai o parte din energia radiantă incidentă va pătrunde în masa semiconductorului. O reprezentare de principiu a acestor fenomene este redată în figura 6.8.

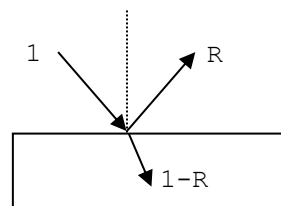


Fig.6.8. Pierderi prin reflexie

Valoarea acestor pierderi este dependentă de unghiul de incidență al radiației, starea suprafeței fotocelulei, respectiv coeficientul de reflexiei, R , al materialului utilizat. Reducerea acestor pierderilor este posibilă prin dispunerea pe suprafața celulei a unui strat anti-reflectant, format dintr-un material transparent cu indice de refracție cât mai mare.

b. Pierderi de fotoni fără generarea unor sarcini electrice libere

Radiația solară este constituită din fotoni cu energii diferite, o parte dintre aceștia neavând energia suficientă pentru a provoca tranziția electronilor din banda de valență în banda de conducție. Rezultatul unor astfel de interacțiuni este doar o încălzire a fotocelulei. O altă categorie de fotoni au energia suficient de mare, dar interacționează cu nucleele atomilor sau cu electronii aflați pe alte straturi decât cel de valență.

Eficiența procesului de eliberare a sarcinilor electrice în fotocelulă se exprimă prin intermediul unui parametru denumit randament cuantic, ce reprezintă raportul dintre numărul perechilor de sarcini libere formate și numărul de fotoni absorbiți în fotocelulă.

c. Pierderi datorate absorbției incomplete a radiației

Radiația ajunsă în masa semiconductorului suferă procese de absorbție ce sunt proporționale cu coeficientul de absorbție al materialului, α , și grosimea stratului semiconductor. O grosime prea mică a fotocelulei face ca fotonii radiației să traverseze semiconductorul fără a fi absorbiți, ducând doar la

încălzirea globală a celulei și implicit la reducerea randamentului. Din acest motiv, cu cât grosimea fotocelulei va fi mai mare cu atât energia radiantă absorbită va fi de asemenea mai mare. Cu toate acestea, o grosime prea mare va duce la creșterea rezistenței electrice interne a celulei.

d. Pierderi datorate recombinării sarcinilor libere

Electronii eliberați în urma interacțiunilor cu fotonii radiației incidente participă la curentul debitat de fotocelulă numai dacă se află, față de joncțiune, la o distanță cel mult egală cu lungimea medie a parcurului liber al electronilor ($l_{m-Si} = 200 \mu\text{m}$). Sarcinile eliberate la distanțe mai mari se vor recombină, ceea ce reprezintă pierderi din energia absorbită de către celulă, contribuind doar la creșterea temperaturii.

Limitarea acestui tip de pierderi se poate realiza prin dimensionarea grosimii fotocelulei la cel mult lungimea parcurului mediu liber al electronilor în semiconductor.

e. Pierderi de tensiune pe rezistența internă a fotocelulei

Rezistența internă a celulei depinde de rezistivitatea semiconductorului utilizat, respectiv grosimea acestuia. Pierderi prin efect Joule apar și în zona contactelor dintre semiconductor și metalul electrozilor, sau în masa metalică a electrozilor. Reducerea acestor pierderi se poate realiza prin micșorarea grosimii fotocelulei, respectiv prin utilizarea argintului sau aurului pentru realizarea electrozilor.

4. Conversia termică a energiei solare

Conversia termică este un mecanism foarte simplu de absorbție a radiației solare și transformare a acesteia în căldură, la nivelul oricărui atom sau moleculă din natură. Acest proces are lor permanent în natură, el putând fi realizat într-un mod controlat cu ajutorul unor dispozitive ce se numesc captatoare solare.

Energia termică dezvoltată în captatoare este transportată la utilizator cu ajutorul unor fluide (lichide sau gaze). Principalul parametru energetic al captatoarelor solare este temperatura fluidului de răcire la ieșirea din captator, valoarea acesteia depinzând de:

- densitatea de putere a radiației incidente;
- factorul de concentrare a radiației solare;
- orientarea captatorului;
- eficiența optică a captatorului;
- eficiența termică a captatorului.

Creșterea temperaturii fluidului de răcire la ieșirea din captator nu se poate realiza prin gruparea adecvată a mai multor captatoare, deoarece randamentul de conversie scade pe măsurarea creșterii temperaturii agentului de răcire.

O primă clasificare a captatoarelor solare poate fi realizată în funcție de factorul de concentrare a radiației. Acesta este definit conform expresiei:

$$C = \frac{S_C}{S_R} \quad (6.17)$$

în care: S_C este suprafața sistemului de concentrare a radiației solare pe care cade radiația solară incidentă, iar S_R este suprafața receptorului unde are loc conversia termică propriu-zisă.

În funcție de valoarea factorului de concentrare se deosebesc următoarele categorii de captatoare solare:

- captatoare fără concentrarea radiației solare, $C = 1$ (se obțin temperaturi sub $100\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- captatoare cu concentrare a radiației solare, $C > 1$ (temperatura agentului de răcire poate ajunge până la $5000\text{ }^{\circ}\text{C}$).

4.1. Captatoare fără concentrarea radiației

În cazul acestor dispozitiv aria suprafeței iluminate este identică cu cea a suprafeței încălzite ($S_C = S_R$). Principalele avantaje ale unor astfel de captatoare sunt:

- utilizarea integrală a radiația solară (directă și difuză);
- nu necesită orientare foarte precisă după soare;
- construcția este relativ simplă, folosind materiale ușor accesibile;
- cheltuielile de investiție și de exploatare sunt reduse;
- domeniu larg de utilizare datorită numărului mare de consumatori de energie termică la temperatură scăzută;
- randament foarte bun în comparație cu conversia fotoelectrică.

Aceste captatoare pot fi realizate într-o diversitate de variante constructive, un model reprezentativ fiind captatorul plan reprezentat în figura 6.9.

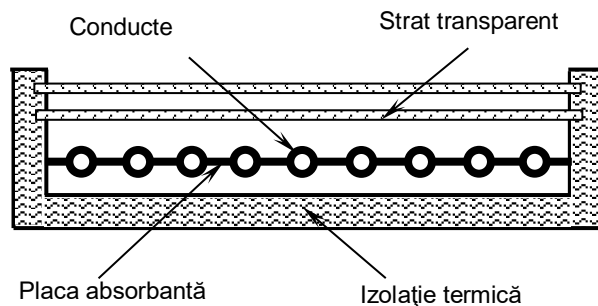


Fig.6.9. Secțiune transversală printr-un captator plan

Funcționarea unui astfel de captator este datorată fenomenelor de efect de seră și absorbției a radiației, ce au loc la nivelul acestuia. Procesul de conversie a radiației solare în energie termică este însoțit însă de o serie de pierderi, atât de natură optică, cât și termică.

Astfel, randamentul captatorului plan poate fi calculat sub următoarele forme:

- randamentul global (η_g) – reprezintă raportul dintre energia termică extrasă din captator și energia radiantă aplicată acestuia;
- randamentul termic (η_t) – este dat de raportul dintre energia termică preluată de agentul de răcire, respectiv energia radiantă absorbită de placă.

Randamentul global al captatorului va fi dat de:

$$\eta_g = \eta_{\text{optic}} - \frac{K_t \cdot (t_p - t_a)}{E \cdot f_o} \quad (6.18)$$

în care: K_t – coeficientul total al pierderilor de căldură, E – densitatea radiației solare, f_0 – factorul de orientare, t_p – temperatura medie a plăcii absorbante, iar t_a este temperatura aerului în jurul captatorului.

Randamentul termic poate fi determinat cu ajutorul relației:

$$\eta_t = 1 - \frac{K_t \cdot (t_p - t_a)}{E \cdot f_0 \cdot \eta_{optic}} \quad (6.19)$$

Randamentul termic caracterizează captatorul din punctul de vedere al calității izolației termice. Între cele două variante de calcul a randamentului există următoarea relație:

$$\eta_g = \eta_{optic} \cdot \eta_t \quad (6.20)$$

Randamentul captatorului depinde de mai mulți factori: gradul de insolație, orientare, proprietăți termice, temperatura plăcii absorbante, temperatura mediului ambiant, etc. Procentual, pierderile de energie ce apar într-un captator cu două straturi transparente au valorile prezentate în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2. Nivelul procentual al pierderilor de energie într-un captator plan cu două straturi transparente

Pierderi optice în două straturi de sticlă:	
▪ prin reflexie	2 x 4% = 8%
▪ prin absorbție	2 x 3,5% = 7%
Total pierderi optice	15%
Pierderi termice:	
▪ prin convecție pe partea superioară	17%,
▪ prin radiație pe partea superioară	12%,
▪ prin conducție (pe părțile laterală și inferioară)	3%,
Total pierderi termice	32%

Rezultă astfel un randament optic de 85% și un randament termic de 68%, fapt care asigură un randament global de aproximativ 57%, mult mai bun decât cel al celulelor fotoelectrice. În funcție de diferența de temperatură $t_p - t_a$, randamentul se modifică conform cu fig.6.10.

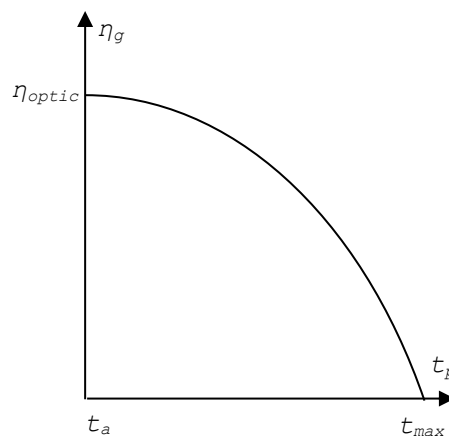


Fig.6.10. Randamentul captatorului plan în funcție de temperatura plăcii absorbante

Evoluția neliniară este datorată creșterii pierderilor prin radiație proporțional cu puterea a 4-a a temperaturii, ceea ce face să apară o scădere mai rapidă a randamentului pe măsura creșterii temperaturii plăcii absorbante, dacă ceilalți parametri rămân constanți.

4.1. Captatoare solare cu concentrator

Un astfel de dispozitiv este alcătuit dintr-un sistem de concentrare a radiației solare, respectiv receptorul de radiație concentrată. Concentrarea radiației solare se realizează cel mai adesea cu ajutorul unor oglinzi, pe baza fenomenului de reflexie. Aceste captatoare utilizează pentru concentrare numai radiația directă, radiația difuză fiind folosită doar sub forma neconcentrată.

În funcție de geometria sistemului optic, factorul de concentrare poate lua valori de la ordinul unităților la cel al zecilor de mii, ceea ce înseamnă mărirea densității de putere pe suprafața receptorului în raport cu densitatea de putere a radiației incidente. În acest mod se poate ajunge la o temperatură mult mai mare a agentului termic, dependentă, de asemenea, de mărimea factorului de concentrare.

Cu cât factorul de concentrare dorit este mai mare, cu atât orientarea precisă după soare este mai importantă. În acest scop sunt utilizate sisteme automate foarte avansate din punct de vedere tehnologic, dar care implică și un consum permanent de energie pe durata funcționării.

a. Captatoare cu concentrator fix

Captatorul plan cu oglinzi laterale

Un astfel de dispozitiv se obține prin adăugarea unor oglinzi unui captator plan. În acest fel se poate mări aportul de energie incidentă pe suprafața captatorului, datorită radiației reflectate de pe oglinzi. Se pot utiliza oglinzi plane montate în diferite variante, așa cum se poate observa și din figura de mai jos:

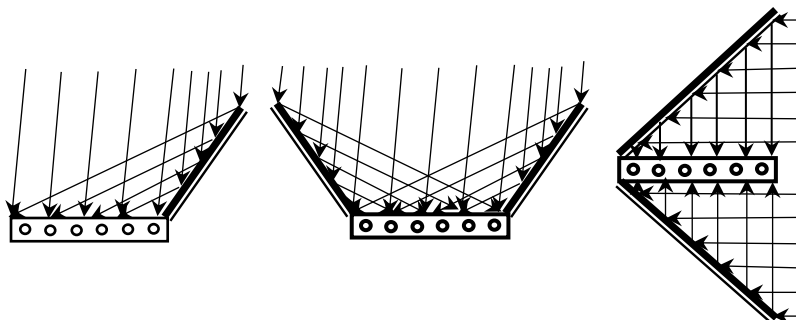


Fig.6.11. Concentratoare cu oglinzi plane

Deoarece oglinzile sunt fixe, factorul de concentrare variază în funcție de poziția soarelui. În practică se obțin valori ale factorului de concentrare cuprinse între 1 și 6.

Captatorul sferic cu receptor mobil

În acest caz, captatorul utilizează o oglindă fixă sub forma unei calote sferice ce va reflecta radiația incidentă către un focar liniar, paralel cu aceasta. Receptorul este un tub cilindric, ce efectuează o mișcare pe două grade de libertate pentru a rămâne mereu în focarul oglinzii (fig. 6.12.)

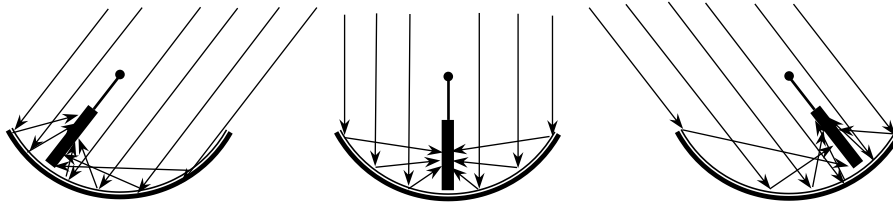


Fig.6.12. Captatorul sferic cu receptor mobil

Deschiderea unghiulară a oglinzii este de 120 grade, iar lungimea receptorului este egală cu jumătate din raza oglinzii. Teoretic, factorul de concentrare geometric este de 187. Practic, se poate obține doar cca.1/5 din această valoare, datorită impreciziei geometrice și pierderilor prin reflexie.

c. Captatoare cu concentrator mobil

Pentru obținerea unor performanțe mari în ceea ce privește utilizarea energie solare, este necesară asigurarea unei valori cât mai mari și mai constante a factorului de concentrare geometric. Acest lucru este posibil prin orientarea concentratorului simultan cu receptorul. În instalațiile de mare putere se folosesc și variante cu receptorul fix și concentratorul mobil.