

Celula fotoelectrică

Tematica: *Energii regenerabile*

→ **Capitol:** *Filiera solară*

→ **Secțiunea:** *Panourile fotoelectrice*

Tip resursă: *Expunere* *Laborator virtual / Exercițiu* *CVR*

În această expunere se prezintă tehnologia și caracteristicile celulelor utilizate în panourile fotoelectrice.

- cunoștințe anterioare necesare: nu există
- nivel: ciclul întâi
- durata estimată: 1/2 oră
- autori: Lucie Petillon, Jean-Charles Herant, Thimotée Leroy
- realizare: Fabien Poje, Sophie Poumaere
- traducere: [Sergiu Ivanov](#)

Tehnologia celulelor

1. Principiu

O celulă fotoelectrică poate fi asimilată cu o diodă fotosensibilă, funcționarea ei bazându-se pe proprietățile materialelor semiconductoare.

Celula fotoelectrică permite conversia directă a energiei luminoase în energie electrică. Principiul de funcționare se bazează pe efectul fotoelectric.

De fapt, o celulă este constituită din două straturi subțiri de material semiconductor. Cele două straturi sunt dopate diferit:

- Pentru stratul N, aport de electroni periferici
- Pentru stratul P, deficit de electroni.

Între cele două straturi va apare o diferență de potențial electric. Energia fotonilor luminii, captați de electronii periferici (stratul N) le va permite acestora să depășească bariera de potențial și să creeze astfel un curent electric continuu. Pentru colectarea acestui curent, se depun, prin serigrafie, electrozi pe cele două straturi semiconductoare (Figura 1). Electrocul superior este o grilă ce permite trecerea razelor luminoase. Pe acest electrod se depune apoi un strat antireflectorizant, pentru creșterea cantității de lumină absorbită.

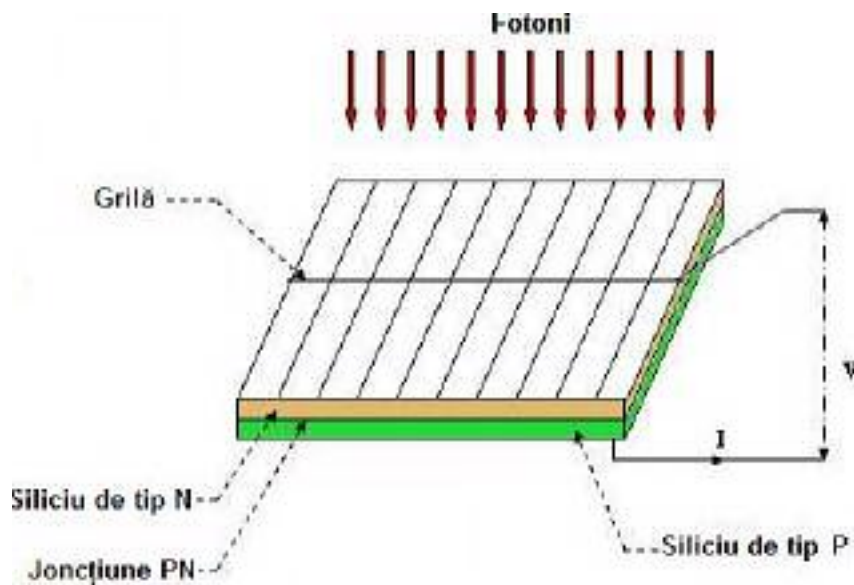


Figura 1: Schema unei celule elementare.

2. Tehnologii ale celulelor solare

Cel mai utilizat material pentru realizarea fopilelor sau a celulelor solare este siliciu, un semiconductor de tip IV. Acesta este tetra-valent, ceea ce înseamnă că un atom de siliciu se poate asocia cu patru alți atomi de aceeași natură.

Se mai utilizează arseniură de galiu și straturi subțiri de CdTe (telură de cadmiu), CIS (cupru-indiu-diseleniu) și CIGS.

Există mai multe tipuri de celule solare:

- [Celule monocristaline](#)

Celule monocristaline

Acest tip de fotopile sunt primele care au fost realizate, pe baza unui bloc de siliciu cristalizat într-un singur cristal.

Ele se prezintă sub forma unor plachete rotunde, pătrate sau pseudo-pătrate.

Randamentul lor este de 12 - 16%. Totuși, ele au două dezavantaje:

- Prețul ridicat
- Durată mare de amortizare prin energia furnizată

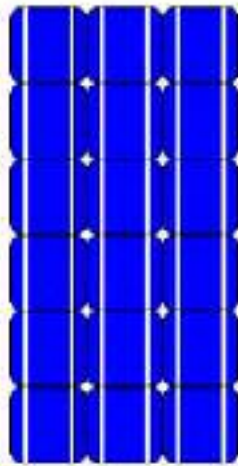


Figura 2: Celula monocristalină.

- [Celule policristaline](#)

Celule multicristaline sau policristaline

Acest tip de celule se realizează pe baza unui bloc de siliciu cristalizat în mai multe cristale, care au orientări diferite. Randamentul lor este de 11 - 13%, dar presupun un cost de producție mai redus decât cel al celulelor monocristaline.

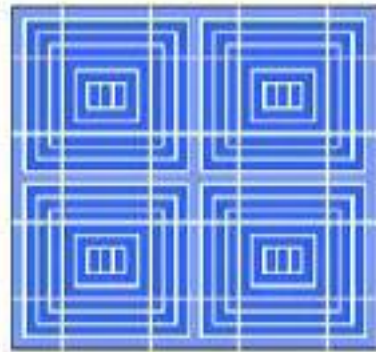


Figura 3: Celulă multicristalină.

- [Celule amorfe](#)

Celule amorfe

Aceste celule sunt realizate dintr-un suport de sticlă sau material sintetic, pe care se depune un strat subțire de siliciu (organizarea atomilor nu este regulată, ca în cazul unui cristal). Randamentul lor este de 5 - 10%, mai mic decât al celulelor cristaline, dar prețul este bun.

Ele sunt utilizate în mici produse comerciale (ceasuri, calculatoare), dar pot fi utilizate și în instalațiile solare.

Ele au avantajul de a se comporta mai bine la lumina difuză și la cea fluorescentă, fiind deci mai performante la temperaturi mai ridicate.

- [Celule CdTe, CIS, CIGS](#)

Celule cu CdTe, CIS și CIGS

Tehnologiile CdTe, CIS și CIGS sunt în curs de dezvoltare sau de industrializare. Mai precis,

- Celulele cu CdTe se bazează pe telura de cadmiu, material interesant datorită proprietății de absorbție foarte mare. Totuși, dezvoltarea lor riscă să fie frânată datorită toxicității cadmiului.
- Celulele cu CIS (CuInSe_2) se bazează pe cupru, indiu și seleniu. Acest material se caracterizează printr-o bună stabilitate sub acțiunea iluminării. Ele au proprietăți de absorbție excelente.
- Celulele cu CIGS sunt realizate din aceleași materiale ca și cele cu CIS, având ca particularitate alierea indiumului cu galiu. Aceasta permite obținerea unor caracteristici mai bune.

În tabelul următor sunt prezentate valorile randamentului tipic și teoretic ce poate fi obținut cu aceste diferite tehnologii.

Tehnologie	Randament tipic [%]	Randament teoretic [%]
Monocristaline	12-16	24
Policristaline	11-13	18,5
Amorfe	5-10	12,7

Tabelul 1: Randamentele diferitelor tehnologii.

Analogie cu dioda

Celula fotoelectrică este elementul de bază în conversia fotoelectrică. În întuneric, ea se comportă ca și o joncțiune PN (diodă). În aceste condiții, o celulă fotoelectrică are caracteristica curent - tensiune a unei joncțiuni PN (Figura 1).

Joncțiunea PN

Dioda PN se compune dintr-o porțiune de material semiconductor de tip "P", o joncțiune PN și o porțiune de material semiconductor de tip "N".

Partea de tip "P" se numește anod, iar cea de tip "N" catod.

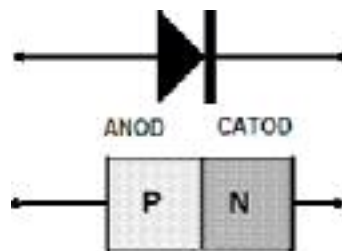


Figura 5: Dioda PN

În practică, diodele PN moderne sunt foarte asimetrice: doparea unei zone este mult mai mare decât a celeilalte.

Dacă partea P este mult mai dopată decât partea N, avem de-a face cu o diodă P+N.

Dacă partea N este mult mai dopată decât partea P, avem de-a face cu o diodă PN+.

Dioda PN are particularitatea de a permite trecerea curentului într-un singur sens (sensul de conducție).

Animatia de mai jos vă permite să vizualizați această caracteristică, după ce ați ales în prealabil convenția de semne: generator sau receptor, ca și tipul iluminării.

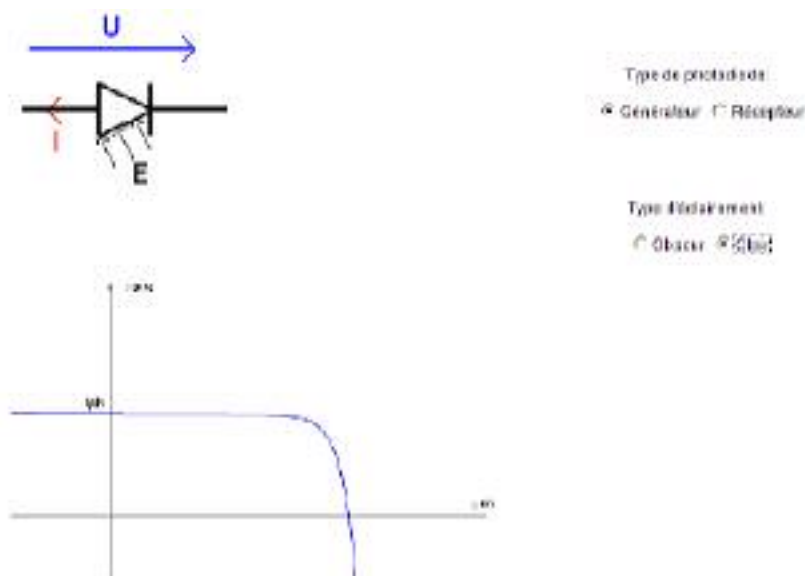


Figura 1: Caracteristica joncțiunii PN.

Când celula este iluminată, ea produce un curent cu atât mai mare cu cât iluminarea este mai intensă. Curentul este deci, proporțional cu iluminarea. Se va regăsi aceeași caracteristică de mai sus, dar decalată în jos cu curentul I_{ph} (fotocurent), corespunzător intensității iluminării.

În sfârșit, trebuie observat că, pentru a se obține caracteristica curent-tensiune ca în Figura 2a, se consideră ca sens de referință al curentului, sensul opus lui I_d (Figura 4), respectiv sensul fotocurentului I_{ph} .

Se poate obține, de asemenea, caracteristica de putere $P = f(U)$, care, pentru anumite condiții de iluminare și temperatură, pune în evidență un punct de funcționare la puterea maximă, așa cum se poate observa în Figura 2b.

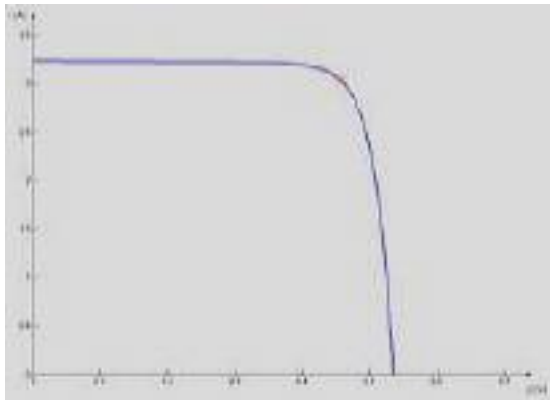


Figura 2a: Caracteristica curent-tensiune

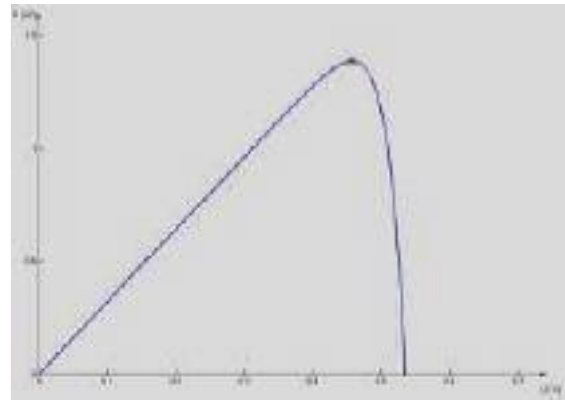


Figura 2b: Caracteristica putere-tensiune

În plus, utilizatorul poate determina experimental caracteristica curent-tensiune, prin modificarea rezistenței la bornele celulei. Animația este inițializată pentru proba în gol. Se pot lua până la 10 puncte de măsură, pentru a determina caracteristica. Punctele de măsură sunt memorate sub forma unor vectori de date obținute cu Matlab.

Această animație evidențiază modalitatea în care se poate ridica experimental caracteristica curent-tensiune a unei celule fotoelectrice, fără să fi definit toți parametrii ecuației $I=f(U)$. Animația este însoțită de schema de montaj de mai jos.

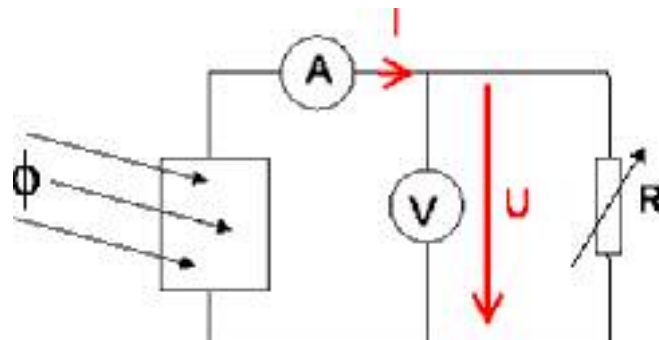


Figura 3: Schema de montaj

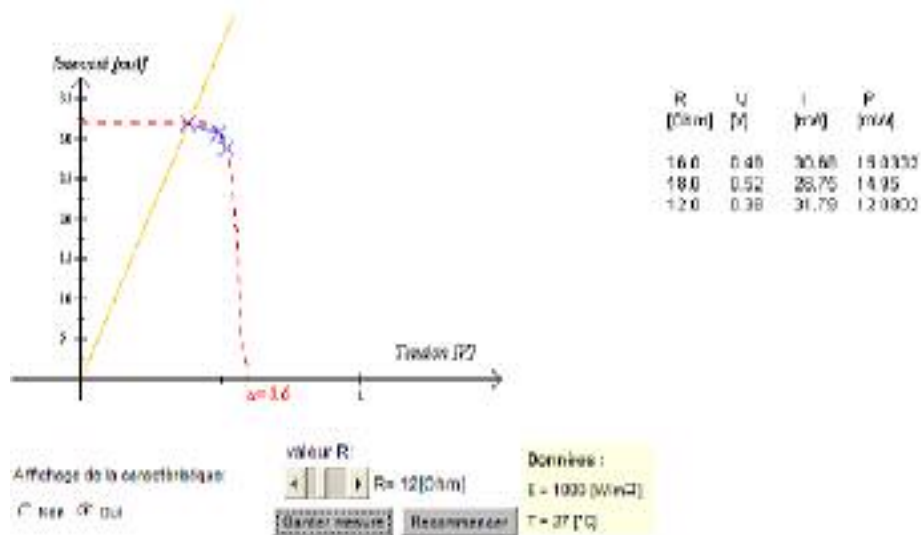


Figura 4: Caracteristica $I=f(U)$.

Modelul echivalent

Modelul matematic al celei fotoelectrice se poate obține, plecând de la cel al jonctiunii PN. Se adaugă curentul I_{ph} , proporțional cu iluminarea și un termen ce modelează fenomenele interne. Curentul I furnizat de celulă se poate scrie:

$$I = I_{ph} - I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$

$$I_{0d} = I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{k \cdot T}} - 1 \right),$$

în care:

- I_{ph} : fotocurent, sau curent generat prin iluminare [A];
- I_{0d} : curent de saturație [A];
- R_s : rezistență serie [Ω];
- R_{sh} : rezistență paralel [Ω];
- k : constanta lui Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$);
- q : sarcina electronului ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C);
- T : temperatura celei ($^{\circ}\text{K}$).

Expresia de mai sus se poate deduce din schema echivalentă din Figura 1:

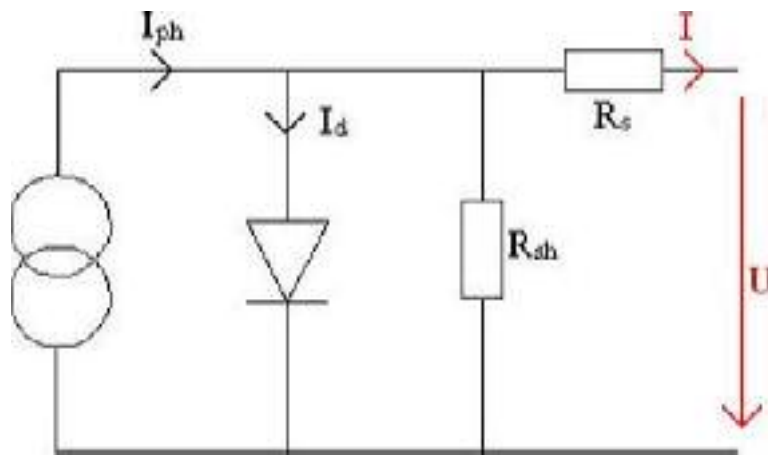


Figura 1: Schema echivalentă a unei celule fotoelectrice.

Dioda modelează comportamentul celulei în întuneric. Sursa de curent modelează curentul I_{ph} generat prin iluminare.

Rezistențele modelează pierderile interne:

- Rezistența serie R_s - modelează pierderile ohmice ale materialului;
- Rezistența paralel R_{sh} - modelează curenții paraziți ce parcurg celula.

Ideal, se poate neglija R_s și I față de U , și să se lucreze cu un model simplificat:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{sh}}$$

Cum rezistența paralel este mul mai mare decât rezistența serie, se poate neglija curentul prin R_{sh} . Rezultă:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

Schema echivalentă din Figura 2 corespunde celulei ideale:

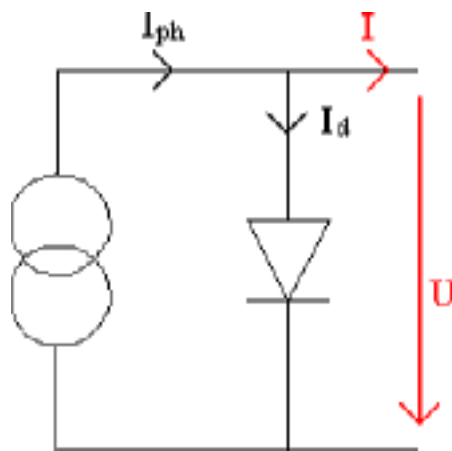


Figura 2: Schema echivalentă simplificată.

Parametrii

Se definește randamentul energetic al unei celule, ca fiind raportul dintre puterea electrică maximă și puterea incidentă:

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S},$$

în care:

- E - iluminarea [W/m^2];
- S - suprafața activă a panourilor [m^2].
- P_m - puterea maximă măsurată în condițiile STC (Standard Test Conditions), respectiv în spectrul AM1.5, la o temperatură de 25°C și iluminare de 1000 W/m^2 .

Ce înseamnă AMx?

AMx desemnează condițiile masei de aer, determinate în funcție de numărul de mase de aer (grosimea straturilor traversate de razele soarelui, constituția lor).

Exemple:

- AM0: fără atmosferă, la mare altitudine, 1353 W/m^2
- AM1: Soarele la zenit ($A=90^\circ$)
- AM1.5: Soarele la 48° , 833 W/m^2
- AM2: Soarele la 30°

De ce 1000 W/m^2 ?

Radiația solară provine de la Soare, o stea cu raza de 696000 km, masa de $1,99 \cdot 10^{30}$ kg, situată la 149.598.000 km de Pământ. Originea energiei Soarelui o reprezintă reacțiile de fuziune nucleară permanentă. Soarele poate fi asimilat unui corp negru cu temperatura de aproximativ 5800°K.

NASA a evaluat fluxul energetic incident la nivelul Pământului (fără atmosferă) la 1367 W/m^2 .

În urma trecerii prin atmosferă, radiația globală a Soarelui se descompune în radiație directă, radiație difuză și albedo. Radiația directă provine direct de la Soare, fără a fi deviată. Radiația difuză provine de la bolta cerească, difuzată de particule (aer, gaz, nori). Pentru aceasta, nu există o direcție preferențială. Albedo este fracțiunea de radiație difuzată sau reflectată de sol.

În sfârșit, Soarele radiază $6,32 \cdot 10^6$ W/m^2 , dar fluxul care ajunge pe Pământ este de doar 1367 W/m^2 . Trebuie să se țină cont și de atmosferă. Practic, radiația ajunsă pe Pământ, la nivelul solului, nu este decât cel mult 1000 W/m^2 . Această radiație este obținută, la latitudinea noastră, doar pe durata a câtorva zile pe an.

Randamentul unei celule este, în general, destul de scăzut, de ordinul 10 - 20%. Au fost obținute randamente mai bune cu materiale noi (în laborator, arseniura de galiu AsGa oferă un randament mai mare de 25%) au cu tehnologii experimentale (tehnologia multistraturi), deseori dificile și costisitoare pentru a fi puse în practică.

În aceste condiții, materialul fotoelectric cel mai utilizat este siliciul, care reprezintă o soluție economică. Pentru astfel de celule, randamentul energetic nu depășește 15%.

Pe baza caracteristicilor curent-tensiune și putere-tensiune, se pot obține și alți parametri:

- Curentul de scurtcircuit I_{cc} , respectiv curentul debitat de celulă, atunci când tensiunea la bornele sale este nulă. Practic, acest curent este foarte apropiat de fotocurentul I_{ph} .
- Tensiunea în gol V_{co} , respectiv, tensiune la bornele celulei, atunci când curentul debitat este nul.
- Între cele două extreme, există un optim care oferă puterea maximă P_{max} sau MPP (Maximum Power Point).
- Factorul de formă, care arată cât de ideală este caracteristica, respectiv raportul:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

Influența temperaturii

Randamentul unei celule depinde de iluminare și de temperatură.

Temperatura este un parametru important, deoarece celulele sunt expuse radiației solare, fiind posibilă încălzirea lor. În plus, o parte din energia absorbită nu este convertită în energie electrică: se disipă sub formă de căldură. Din aceste motive, temperatura celulelor este întotdeauna mai ridicată decât a mediului ambiant.

Pentru a estima temperatura unei celule T_c , cunoscând temperatura mediului ambiant T_a , se poate folosi expresia:

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20)$$

în care:

- E_m : iluminarea medie [W/m^2].
- TUC: Temperatura de utilizare a celulei [$^{\circ}C$].

Animația de mai jos vă permite să vizualizați influența valorii temperaturii (pe care o puteți modifica prin intermediul cursorului), asupra curentului și puterii. Se poate, de asemenea, să se vizualizeze puterea maximă, ce va determina caracteristica $P = f(U)$.

Ipoteze:

- iluminarea este constantă ($1000 W/m^2$);
- celula este realizată din siliciu.

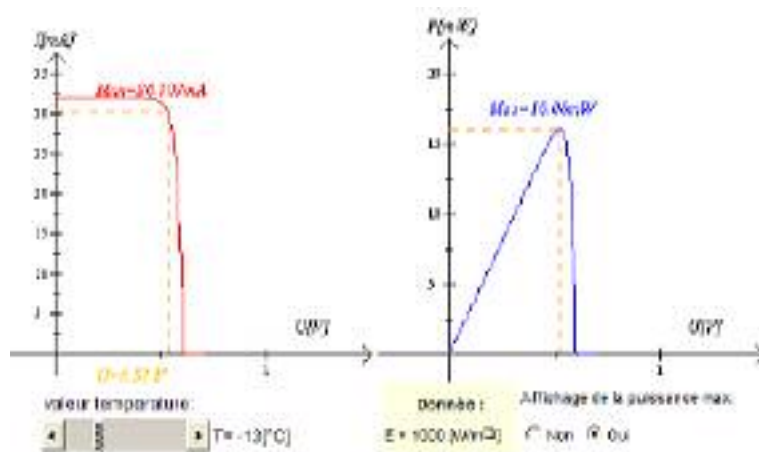


Figura 1: Influența temperaturii.

Cu ajutorul animației de mai sus se poate observa că temperatura celulei are o importanță foarte mare asupra performanțelor electrice. Cu cât temperatura este mai mică, cu atât celula este mai eficientă.

Fiecare grad de încălzire a celulei, determină o pierdere a randamentului de ordinul a 0,5 %. În mod empiric, s-a constatat că fotocurentul crește puțin cu temperatura (de ordinul a 0.05%/°K, în cazul celulelor cu siliciu).

De asemenea, se poate observa că punctul de putere maximă poate avea variații semnificative.

Influența iluminării

Fotocurentul este, practic, proporțional cu iluminarea sau cu fluxul luminos.

Animația de mai jos vă permite să vizualizați influența valorii iluminării (pe care o puteți modifica prin intermediul cursorului), asupra curentului și puterii. Se poate, de asemenea, să se vizualizeze puterea maximă, ce va determina caracteristica $P = f(U)$.

Ipoteze:

- temperatura este constantă (27°C);
- celula este realizată din siliciu.

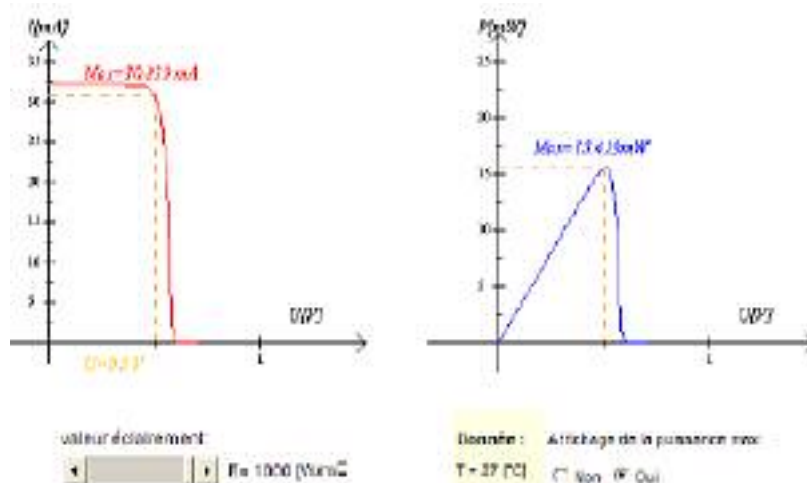


Figura 1: Influența iluminării.

În mod normal, curentul nu se modifică. Acest comportament nu este valabil decât pentru celulele care nu utilizează concentratoare a radiației solare, sau cu concentrare redusă. În consecință, densitatea purtătorilor de sarcină și curentul de saturație variază prin modificarea temperaturii și a concentrației iluminării.

Fotocurentul creat de o celulă fotoelectrică este proporțional și cu suprafața S a joncțiunii, supusă expunerii la radiația solară; pe de altă parte, tensiunea în gol nu depinde de această suprafață, ci doar de calitatea materialului semiconductor și de tipul joncțiunii.

Se poate considera că tensiunea U este constantă, deoarece variația valorii U_{pmax} în funcție de iluminare, este infimă (Figura 2a, 2b). Pierderea de putere nu va fi semnificativă.

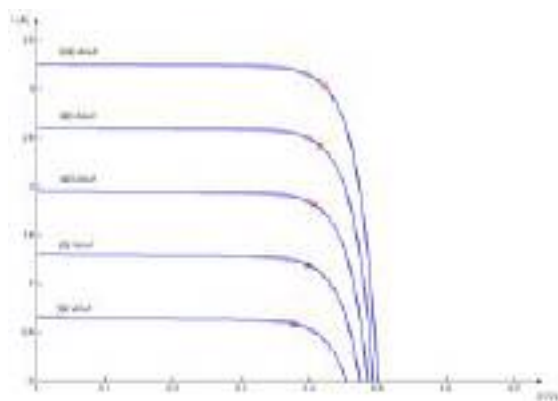


Figura 2a: Familie de caracteristici U-I

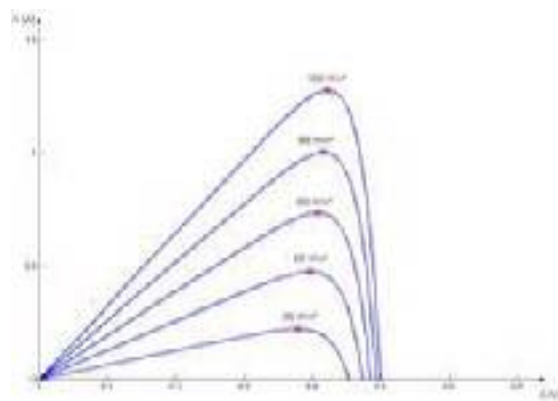


Figura 2b: Familie de caracteristici U-P

Pentru creșterea iluminării celulelor, este de dorit ca acestea să fie orientate astfel încât, razele Soarelui să cadă perpendicular pe ele. Există panouri fixe, dar și cu înclinare variabilă, cele din urmă fiind mai eficiente. De exemplu, pe timpul iernii, un panou plasat orizontal este de două ori mai puțin eficient decât un panou înclinat, astfel încât incidența radiației să fie perpendiculară.

Conectarea celulelor

În condiții standard STC (1000W/m^2 , 25°C , AM1.5), puterea maximă a unei celule de siliciu de 10 cm^2 va fi de aproximativ $1,25\text{ W}$. Celula fotoelectrică elementară reprezintă, deci, un generator electric de foarte mică putere, insuficient pentru majoritatea aplicațiilor casnice sau industriale. În consecință, generatoarele fotoelectrice sunt realizate prin conectarea (asocierea) în serie și/sau în paralel a unui număr mare de celule elementare. Aceste grupări se numesc module, care la rândul lor vor forma panourile.

Această conectare trebuie să se realizeze cu respectarea anumitor criterii precise, ținând cont de dezechilibrele care se creează în timpul funcționării într-o rețea de fotocelule. Practic, chiar dacă numeroasele celule care formează un generator, sunt teoretic identice, datorită inevitabilelor dispersii de fabricație, ele au caracteristici diferite. Pe de altă parte, iluminarea și temperatura celulelor nu este aceeași pentru toate celulele din rețea.

Conectarea în serie a celulelor face ca tensiunea la bornele ansamblului să fie mai mare, curentul fiind același în toate celulele. Conectarea în paralel determină creșterea curentului debitat, tensiunea la bornele ansamblului fiind aceeași.

Conectarea în serie

În cazul conectării în serie, celulele sunt parcurse de același curent, iar caracteristica ansamblului rezultat este dată de suma tensiunilor celulelor componente, la un anumit curent.

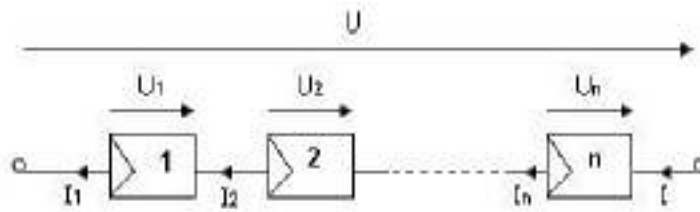


Figura 1: Conectarea serie.

Conectarea în paralel

În cazul conectării în paralel, tensiunea la bornele tuturor celulelor este aceeași, curentul rezultat al ansamblului fiind suma curenților celulelor componente. Caracteristica ansamblului este dată de suma curenților furnizați de celulele componente, la o anumită tensiune.

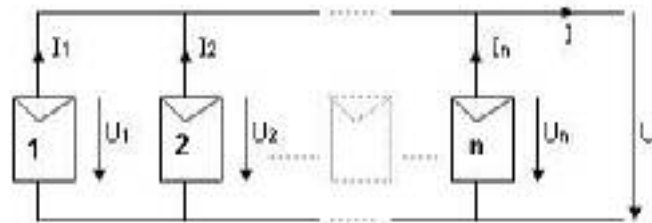


Figura 2: Conectarea paralel.

Cea mai mare parte a modulelor comercializate, sunt compuse din 36 de celule de siliciu cristalin, conectate în serie pentru aplicații de 12 V.