

CAPÍTOL 2:

LA CEL·LA FOTOVOLTAICA

2.1 ENERGIES RENOVABLES: ENERGIA FOTOVOLTAICA

L'energia solar fotovoltaica està dintre del grup de les energies renovables, i és l'energia solar que s'aprofita mitjançant cel·les fotoelèctriques, les quals són capaces de convertir la llum en una potència elèctrica.

Es denomina energia renovable a la energia que s'obté de fonts naturals en principi inesgotables, ja sigui per la immensa quantitat d'energia que contenen o perquè són capaces de regenerar-se per mitjans naturals a una velocitat igual o major a la del consum.

Gran part de les energies renovables deriven de la energia solar directament, com és el cas de la llum i el calor procedent de la radiació solar, o indirectament, com és el cas de la energia eòlica, hidràulica i les procedents del aprofitament del mar.

2.2 MATERIAL SEMICONDUCTOR

La cel·la fotovoltaica està feta d'un material semiconductor que acostuma a ser Silici d'unió PN, com en els díodes. La diferència amb aquests últims és que el Silici de les cel·les és especialment sensible als fotons que provenen de la llum.

El Silici del tipus P es crea dopant o impurificant el material amb bor amb el propòsit d'obtenir un nombre elevat de forats, mentre que el Silici del tipus N es crea dopant-lo amb fòsfor amb el propòsit invers, aconseguir un nombre elevat d'electrons lliures en el material.

Conseqüentment, la cèl·lula es pot definir com la unió d'una capa de Silici extrínsec del tipus P amb una capa de Silici extrínsec del tipus N on es manifesta una conducció d'electrons des del Silici del tipus N cap al tipus P. Aquesta conducció inicial crea una sèrie de càrregues fixes en una zona als dos costats de la unió PN, zona anomenada barrera interna de potencial. Aquesta zona es va incrementant fins que una determinada força de desplaçament, creada a partir de les càrregues positives i negatives als dos costats de la unió, fa frenar els electrons de la zona N delimitant aquesta barrera interna de potencial a 0,7V aproximadament.

Per tant, els fotons que arriben a la cèl·lula fotovoltaica són absorbits i quan es supera la barrera interna de potencial es creen parelles electró-forat que produeixen diferència de potencial entre els dos extrems del semiconductor PN. Així, a major intensitat de radiació, major creació de parelles electró-forat.

El silici utilitzat per cel·les solars pot ser del tipus cristal·lí, policristal·lí, multi cristal·lí i amorf. Essent del tipus cristal·lí la millor qualitat.

2.3 ESTRUCTURA BÀSICA D'UNA CEL·LA FOTOVOLTAICA

Amb la teoria ja descrita en els paràgrafs anteriors sabem que un fotó pot ser absorbit per una parella electró-forat. Evidentment no és suficient col·locar dos cables a un semiconductor i posar-ho al Sol per que hi circuli corrent elèctric. Si això es fes l'únic que s'aconseguiria seria que el semiconductor s'escalfés, ja que les parelles electró-forat que es generessin desapareixerien en algun punt dintre del semiconductor.

Per aconseguir l'extracció de corrent és necessari fabricar una unió PN que consisteix en fabricar un semiconductor en el que una zona sigui de semiconductor tipus N i altre zona del tipus P. Aquesta fabricació no consisteix en *pegar* un semiconductor P a un N si no que s'ha de fer de manera que la xarxa cristal·lina del semiconductor no s'interrompi al passar d'una regió a una altre. És necessari llavors, l'ús de tecnologies especials.

L'existència de la unió PN fa possible l'aparició d'un camp elèctric en la cèl·lula (amb la direcció del costat n al costat p) que separa les parelles electró-forat: els forats, càrregues positives, els dirigeix fins al contacte del costat P la qual cosa provoca l'extracció d'un electró des del metall que constitueix el contacte; els electrons, càrregues negatives, els dirigeix fins al contacte del costat N injectant-les en el metall. Això fa possible el manteniment d'una corrent elèctrica pel circuit exterior i en definitiva el funcionament de la cèl·lula com a generador fotovoltaic.

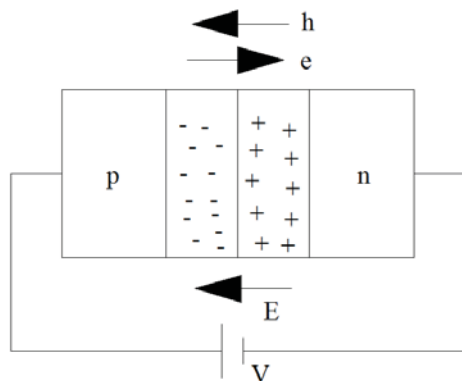


Figura 2. Formació del camp elèctric, E , i moviment de càrregues en una unió p-n.

Un altre concepte important en l'estructura d'una cèl·lula solar és el concepte que fa referència al que anomenem *mall de metal·lització* frontal. Els contactes metàl·lics superficials són necessaris per extraure la corrent elèctrica de la cèl·lula. El metall és un material opac a la llum, en conseqüència, al menys el contacte frontal (el del costat de la cèl·lula exposada directament al Sol) no pot recobrir completament la superfície de la cèl·lula. Pot pensar-se llavors que el contacte frontal ha de ser el més petit possible (en superfície), però si es fa excessivament petita un dels paràmetres dels que es parlarà posteriorment, la resistència sèrie, augmenta i això significa una pèrdua en l'eficiència de la cèl·lula. Així doncs ha d'arribar-se a una solució de compromís perquè la superfície del contacte frontal sigui lo suficientment baixa per permetre el pas de la llum del Sol i lo suficientment alta perquè la resistència sèrie de la cèl·lula sigui tolerable.

2.4 FUNCIONAMENT D'UNA CEL·LA FOTOVOLTAICA

Quan una cèl·lula solar s'exposa al Sol la llum genera parelles electró-forat. Cada una d'aquestes parelles constitueix un potencial electró circulant pel circuit exterior. Associat a aquest procés tenim els processos de recombinació. Cada procés de recombinació aniquilarà una de les parelles electró-forat generades i, per tant, tindrem un electró menys disponible per circular pel circuit exterior. D'això que es parli del mecanisme de recombinació com un mecanisme de pèrdues per la cèl·lula.

Per simplificar es considera el circuit exterior amb una resistència R que representa la càrrega de la cèl·lula. Si s'admet que s'ha fet circular una corrent I per el circuit exterior, aquesta corrent provocarà una caiguda de tensió en la resistència, que es traslladarà als borns de la resistència, la qual cosa significa que la cèl·lula haurà d'operar a una tensió $V = R \cdot I$. Aquesta tensió afecta a la recombinació, degut a que aquesta depèn de V de manera exponencial.

Llavors si la càrrega és molt elevada, també ho serà la tensió i en conseqüència la recombinació aniquilarà tots els processos de generació i impedirà la circulació de la corrent.

2.5 PARÀMETRES FONAMENTALS D'UNA CEL·LA FOTOVOLTAICA

Una cel·la fotovoltaica és, per tant, un díode que s'ha format unint una capa p, típicament dopada amb bor, i una capa n, típicament dopada amb fòsfor. És per aquest motiu que la corrent fotogenerada per la cel·la s'implementa en l'equació o corba característica I-V d'un díode de la següent forma:

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{m \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - I_L \quad [\text{Eq. 2. 1}]$$

on I_L és la corrent fotogenerada i I_o és la corrent inversa de saturació del díode. Aquest corrent es produeix degut a la recombinació interna i es representa com un díode.

Els paràmetres per caracteritzar la sortida d'una cel·la fotovoltaica ideal, per una irradiància donada, una temperatura d'operació i una determinada àrea són:

- *Corrent de curtcircuit*, I_{SC} , és la corrent màxima a voltatge zero i és directament proporcional a la llum disponible.

- *Voltatge a circuit obert*, V_{OC} , és el màxim voltatge a corrent zero. Augmenta logarítmicament amb la irradiància i disminueix amb la temperatura.
- *Punt de màxima potència*, P_m , on el producte $I_m \times V_m$ agafa el valor màxim.
- *Factor de forma*, FF, és una mesura de qualitat de la unió i de la resistència sèrie de la cel·la:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad [Eq. 2. 2]$$

La incidència de la llum té l'efecte de moure la corba I-V cap avall, al quart quadrant. No obstant, per conveni, la corba I-V s'acostuma a representar en el primer quadrant mitjançant la següent equació, modificació de l'anterior:

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{m \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad [Eq. 2. 3]$$

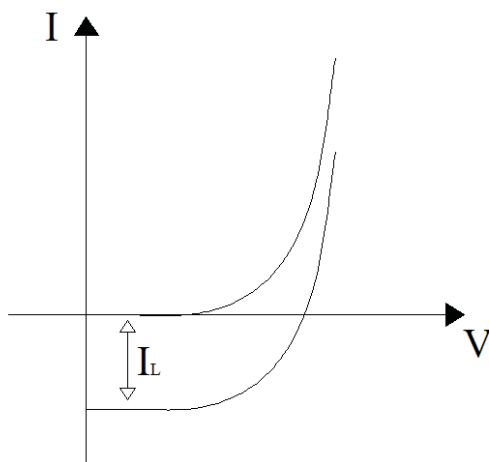


Figura 3. Efecte de la incidència de la llum en la característica I-V d'una unió p-n

També és de molt interès la resposta espectral d'una cel·la fotovoltaica, donada en amperes generats per vat de llum incident. Idealment augmenta amb la longitud d'ona. La forta dependència de la resposta espectral amb la longitud d'ona fa que el rendiment de la cel·la depengui majoritàriament del contingut espectral de la radiació incident.

I per últim, un altre factor molt important a tenir en compte és la temperatura d'operació de les cel·les solars la qual ve determinada per la temperatura ambient,

Disseny d'una plataforma docent per a generació fotovoltaica: La cel·la fotovoltaica

per les característiques del mòdul en el que està encapsulada, per la intensitat de la radiació solar i per altres variables com la velocitat del vent.

Degut a l'augment de la temperatura la corrent de curtcircuit I_{SC} augmenta lleugerament ja que disminueix l'amplada de la banda prohibida i, per tant, hi ha més fotons amb energia suficient per generar parelles electró-forat.

Però el major efecte de la temperatura el trobem en la reducció de la tensió a circuit obert, V_{OC} , del factor de forma, FF, i per tant de la potència P_m .

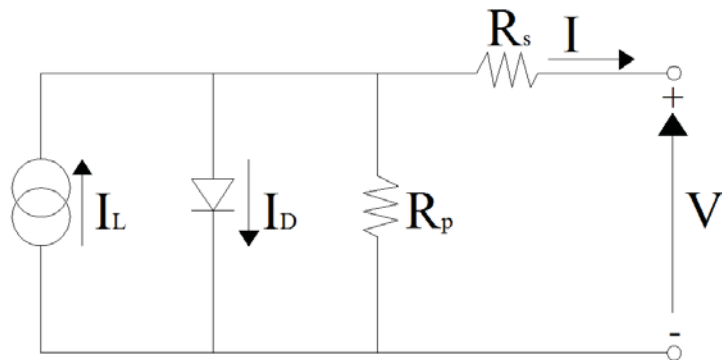


Figura 4. Circuit equivalent d'una cel·la fotovoltaica

Per cada punt de la corba I-V, el producte de la corrent per el voltatge representa la potència de sortida en les condicions d'operació. La potència màxima en condicions estàndard de mesura es coneix com la *potència pic* de la cel·la.

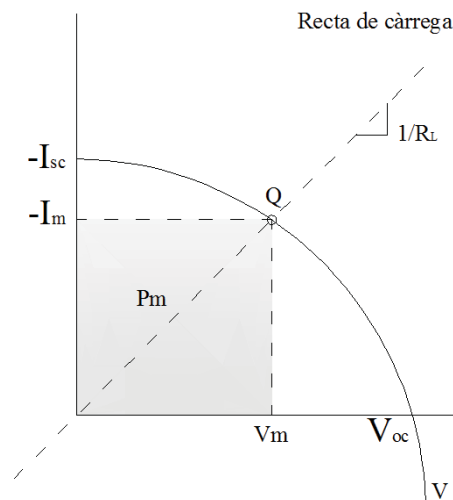


Figura 5. Recta de càrrega de la corba característica I-V d'una cel·la fotovoltaica

Les cel·les solars presenten una resistència sèrie, R_s , i una resistència paral·lel, R_p , associades que redueixen el factor de forma, FF. La resistència sèrie és deguda principalment a la resistència del volum del material, a les interconnexions i a la resistència entre els contactes metàl·lics i el semiconductor. La resistència paral·lel és deguda a la no idealitat de la unió p-n i a les impureses a prop de la unió. Així doncs consirant aquets nous paràmetres ja podem parlar de la següent equació:

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V+I \cdot R_s}{m \cdot k \cdot T/q}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V+I \cdot R_s}{R_p}\right) \quad [\text{Eq. 2. 4}]$$

Encara que habitualment s'expressa de la següent forma:

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V+I \cdot R_s}{m \cdot v_t}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V+I \cdot R_s}{R_p}\right) \quad [\text{Eq. 2. 5}]$$

$$v_t = \frac{k \cdot T}{q} \quad [\text{Eq. 2. 6}]$$

on I_L , I_o , m , R_s y R_p són els paràmetres característics per al dispositius fotovoltaic en qüestió:

- I_L és la corrent fotogenerada, [A]
- I_o és la corrent d'obscuritat, [A].
- m és el factor d'idealitat del díode.

- R_s és la resistència sèrie, [Ω].
- R_p és la resistència paral·lel, [Ω].
- v_t és el voltatge tèrmic. On k és la constant de Boltzmann ($k = 1,3854 \times 10^{-23} JK$), T és la temperatura del dispositiu en kelvin i q és la càrrega de l'electró, $q = 1,6021 \times 10^{-19} C$.

A la figura 5 es pot observar les variacions en la corba característica segons els diferents valors de les resistències sèrie i paral·lel. Es dedueix que els fabricants de cel·les han de buscar un equilibri entre les dues resistències per tal de no reduir el factor de forma, FF.

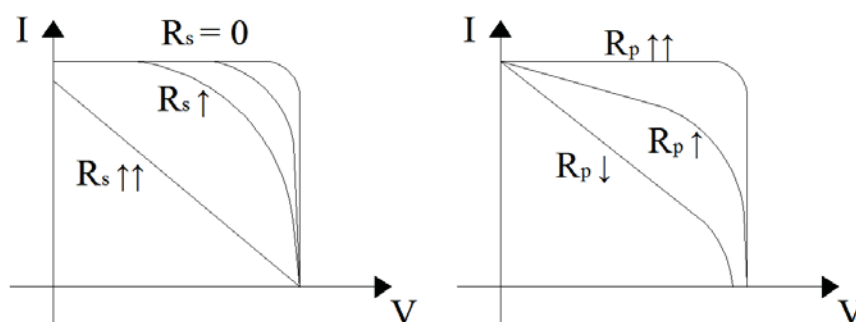


Figura 6. Influència de la variació de la resistència sèrie i de la resistència paral·lel en la corba I-V d'una cel·la solar

Les cèl·lules fotovoltaïques de silici monocristal·lí actualment no poden convertir més del 25% de la energia solar rebuda en electricitat, perquè la radiació en la regió infraroja del espectre electromagnètic no té suficient energia com per separar les càrregues positives i negatives en el material.

Actualment les cèl·lules fotovoltaïques de silici policristal·lí tenen una eficiència de menys del 20% i les cèl·lules amorfes de silici tenen una eficiència propera al 10%, degut a pèrdues d'energia internes més elevades que les del silici monocristal·lí.

Una característica important de les cèl·lules fotovoltaïques és que el voltatge de la cèl·lula no depèn de la seva grandària i que perdura bastant constant amb els

canvis d'intensitat de la llum. La corrent, en canvi, es quasi directament proporcional a la intensitat de la llum i a la grandària de la cèl·lula. Per comparar diverses cèl·lules les podem classificar per densitat de corrent, o ampers per centímetre quadrat del àrea de la cèl·lula. La potència entregada per una cèl·lula fotovoltaica es pot augmentar amb bastant eficàcia utilitzant un mecanisme de seguiment per mantindre el dispositiu fotovoltaic front al sol, o concentrant la llum d'aquest utilitzant lents o miralls. De totes maneres hi ha límits en aquest procés degut a la complexitat dels mecanismes i a la necessitat de refrigerar les cèl·lules. La corrent és relativament estable a altes temperatures però el voltatge es redueix conduint a una caiguda de potència a causa de l'augment de la temperatura de la cèl·lula.