

SUMARI ANNEX

| | |
|--|-----------|
| SUMARI ANNEX | 1 |
| A. LA CÈL·LULA FOTOVOLTAICA | 5 |
| A.1. Introducció | 5 |
| A.2. Conceptes bàsics sobre la cèl·lula fotovoltaica | 6 |
| A.2.1. Teoria de bandes, semiconductors extrínsecs i intrínsecs | 6 |
| A.2.2. La unió p-n | 8 |
| A.2.3. Expressió matemàtica del diode | 10 |
| A.2.4. L'Efecte fotoelèctric i les cèl·lules solars | 11 |
| A.2.5. Corba característica de la cèl·lula fotovoltaica | 12 |
| A.3. Model matemàtic de la cèl·lula fotovoltaica | 18 |
| A.3.1. Efecte de la resistència en sèrie R_s | 19 |
| A.3.2. Efecte de la resistència en paral·lel R_{sh} | 20 |
| A.3.3. Efecte del diode de recombinació D_2 | 21 |
| A.4. La cèl·lula com a unitat bàsica | 22 |
| A.4.1. Connexió en sèrie i en paral·lel | 22 |
| A.4.2. Construcció d'un model simple de panell a partir paràmetres proporcionats pel fabricant | 24 |
| A.5. Tecnologia de fabricació i tipus de cèl·lules fotovoltaiques | 26 |
| A.5.1. Cèl·lules de silici cristal·lí | 28 |
| A.5.2. Cèl·lules de làmina prima (Thin Films) | 31 |
| A.5.3. Cèl·lules Tandem | 35 |
| A.5.4. Taula resum de les diferents tecnologies | 36 |
| A.6. Normativa i estàndards | 37 |
| A.7. El mercat de panells fotovoltaics | 38 |
| A.7.1. Llistat de fabricants de panells fotovoltaics | 39 |
| B. VALORACIÓ ECONÒMICA DE LES DIFERENTS ALTERNATIVES | 41 |
| B.1. Alternativa I: Rectificador més elevador més reductor | 41 |
| B.2. Alternativa II: Rectificador més reductor amb relació de transformació 1:2 | 42 |
| B.3. Alternativa III: Rectificador més reductor amb transformador de doble sortida | 43 |



| | | |
|-----------|--|-----------|
| B.4. | Alternativa IV: Rectificador més dos reductors entrada paral·lel sortida sèrie | 44 |
| B.5. | Alternativa V: Rectificador més reductor buck més tres reductors entrada paral·lel sortida sèrie | 45 |
| B.6. | Alternativa VI: Rectificador més elevador més dos reductors entrada paral·lel sortida sèrie | 46 |
| B.7. | Comparació d'alternatives | 48 |
| C. | EL DSP | 49 |
| C.1. | Introducció als DSP | 49 |
| C.1.1. | Unitat aritmètica (CPU) | 49 |
| C.1.2. | Joc d'instruccions | 50 |
| C.1.3. | Arquitectura | 50 |
| C.1.4. | Adreçament | 50 |
| C.1.5. | Memòria | 50 |
| C.2. | DSP TMS320F2808PZA | 51 |
| C.2.1. | Característiques principals | 52 |
| C.2.2. | Arquitectura | 53 |
| C.2.3. | La memòria | 53 |
| C.2.4. | La CPU | 53 |
| C.2.5. | Perifèrics | 54 |
| D. | VALORACIÓ ECONÒMICA DEL PROTOTIP CONSTRUÏT | 57 |
| D.1. | Cost del prototip | 57 |
| D.1.1. | Convertidor Comercial | 57 |
| D.1.2. | Placa de control | 58 |
| D.1.3. | Plaques auxiliars i d'adaptació dels senyals | 59 |
| D.1.4. | Cost total del prototip | 59 |
| D.2. | Cost d'investigació i desenvolupament | 59 |
| D.2.1. | Costos de suport informàtic | 60 |
| D.2.2. | Costos de personal | 60 |
| D.2.3. | Costos totals de desenvolupament i disseny | 61 |
| D.3. | Cost total del projecte | 61 |
| E. | ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL | 63 |
| E.1. | Introducció | 63 |
| E.2. | Materials utilitzats | 64 |
| E.3. | Energia requerida | 64 |



| | |
|--|-----------|
| E.3.1. Desenvolupament i programació | 64 |
| E.3.2. Funcionament del sistema | 65 |
| E.4. Reciclatge..... | 65 |
| F. DOCUMENTACIÓ DIGITAL _____ | 67 |
| BIBLIOGRAFIA _____ | 69 |
| Referències bibliogràfiques | 69 |
| Bibliografia complementària | 71 |





A. LA CÈL·LULA FOTOVOLTAICA

En aquest annex es farà una introducció als conceptes bàsics de la cèl·lula fotovoltaica així com els seus principis de funcionament i l'estat actual d'aquest tipus de tecnologia.

A.1. Introducció

El panell solar és molt semblant a la típica unió pn. Quan la llum és absorbida per la unió, la energia dels fotons absorbits es transfeix als electrons del material, de manera que es creen portadors de càrrega. Aquests portadors de càrrega creen una diferència de potencial a la unió, són accelerats per l'efecte del camp elèctric i circulen a través d'un circuit exterior, tal com s'observa a la Fig A.1.

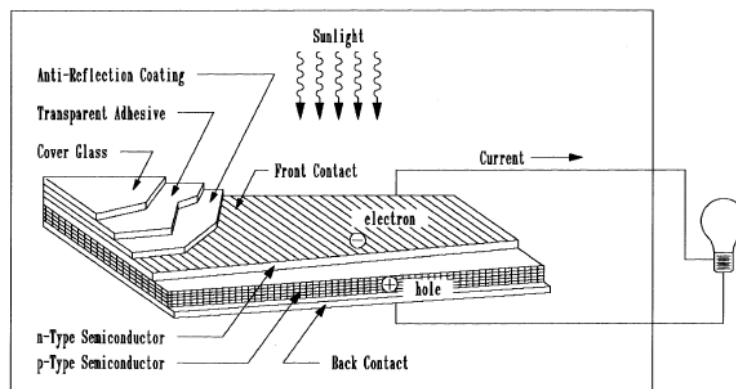


Fig A.1 Efecte fotoelèctric [1]

D'ençà Becquerel va observar al 1839 l'efecte fotovoltaic, les tècniques així com la tecnologia dels materials en aquest camp ha anat avançant fent nous descobriments, sempre intentant buscar la màxima eficiència i el menor cost per tal de trobar un lloc en el mercat. Actualment, la majoria de cèl·lules fotovoltaiques estan fetes de silici i poden produir típicament de 1 a 4 W i donen una tensió de 0,5 V/cèl·lula.



A.2. Conceptes bàsics sobre la cèl·lula fotovoltaica

A.2.1. Teoria de bandes, semiconductors extrínsecs i intrínsecs

Els nivells d'energia dels electrons en un àtom aïllat estan ben definits (per exemple pel cas del silici són $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$) però quan interacciona amb d'altres es pertorben, de manera que si mirem el seu nivell energètic per a N àtoms idèntics que interaccionen, aquest apareix desdoblant en N nivells molt pròxims formant el que anomenem com a *bandes d'energia*, Fig.A.2.

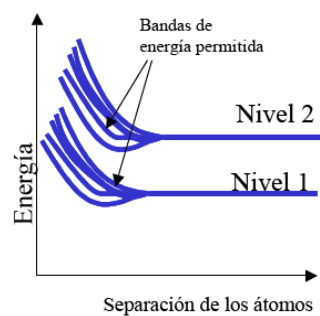


Fig A.2 Nivells i bandes d'energia [2]

Aquestes bandes d'energia poden arribar a solapar-se o bé romandre separades per la *banda d'energia prohibida* o *GAP*.

A la banda d'energia més alta que conté electrons se l'anomena *banda de valència*, i a la més baixa en la que hi ha estats no ocupats *banda de conducció*, Fig.A.3.

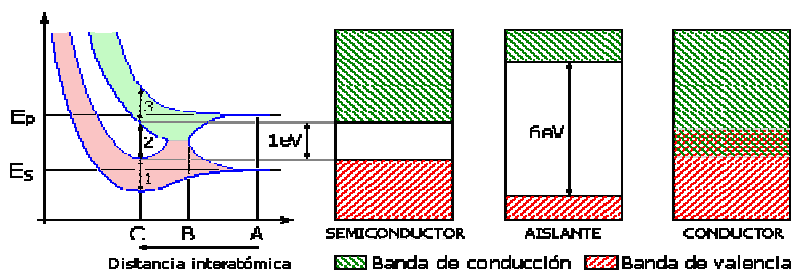


Fig A.3 Bandes d'energia [2]



Pel cas del silici, els 4 electrons $3sp$ es troben a la banda de valència i aquesta està lleugerament separada de la banda de conducció, en concret fa falta una energia d'un $1,1\text{eV}$ per a que un electró s'alliberi a la banda de conducció i passi a la de valència.

A temperatura ambient hi ha un número petit d'electrons a la banda de conducció, i en el cas d'alliberar-se un electró de la banda de valència queda un forat que pot ser ocupat per un altre electró de la banda, de manera que aquest forat es desplaça. També pot succeir el cas que un electró faci el procés contrari, vagi de la banda de conducció a la de valència, aquest fet s'anomena *recombinació*. Succeeix que a una determinada temperatura, les velocitats de creació de parells electró-forat i recombinació romanen constants de manera que la concentració global d'electrons i forats es constant, això és el que anomenem *concentració intrínseca* del semiconductor i és dependent de la temperatura.

Si a un semiconductor intrínsec se li afegeixen un petit percentatge d'impureses, bàsicament elements de valència III i V, el semiconductor rep el nom de *extrínsec* i es diu que està dopat.

Un semiconductor extrínsec del tipus *n*, Fig A.4, és aquell dopat amb elements de valència V (As, Sb o P), que al tenir cinc electrons a l'última capa farà que quan es formi la estructura cristal·lina, el cinquè electró no estigui lligat en un enllaç covalent. D'aquesta manera aquest cinquè electró, tot i no estar completament lliure, es trobarà en un nivell energètic superior als quatre restants.

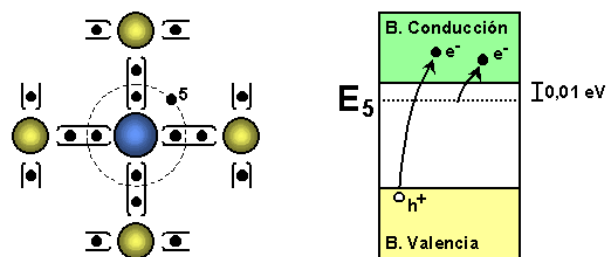


Fig A.4 Semiconductor extrínsec tipus n [2]

Així, un semiconductor de tipus *n* tindrà un número major d'electrons que de forats, per aquest motiu que els electrons són portadors majoritaris de l'energia elèctrica i, com que aquest excedent prové de d'impureses pentavalents, se les anomena donadores.



Un semiconductor extrínsec del tipus *p* és aquell dopat amb elements de valència III (Al, B, Ga o In), Fig A.5. En aquest cas succeeix el contrari als tipus *n*, les impureses aporten una vacant, per aquest motiu s'anomenen acceptadores. Tot i així aquesta vacant no és un forat com el format per un salt d'un electró, sinó que té un estat energètic lleugerament superior al de la banda de valència (de l'ordre de 0,01eV). En aquest cas els electrons saltaran a les vacants amb facilitat, deixant forats a la banda de valència en major número que electrons a la banda de conducció. D'aquesta manera els forats són els portadors majoritaris.

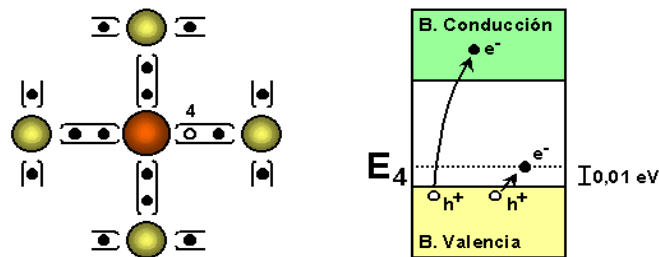


Fig A.5 Semiconductor extrínsec tipus *p* [2]

Així doncs als semiconductors de tipus *n* tenim electrons lliures a la banda de conducció, portadors majoritaris; i als de tipus *p* tenim forats lliures a la banda de valència, portadors majoritaris.

A.2.2. La unió p-n

Quan unim els dos tipus de semiconductors extrínsecs formem el que anomenem com a unió *p-n*. En aquesta unió es produeix la difusió de forats des del silici tipus *p* al *n* i d'electrons en sentit contrari, Fig A.6.

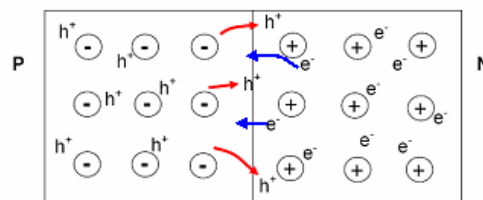


Fig A.6 Procés de difusió en una unió p-n [2]



D'aquesta manera es deixen en ambdós costats de la unió càrregues no compensades fixes que creen una diferència de potencial anomenat potencial de barrera ($0,7\text{ V}$ al Silici), V_B a Fig A.7.

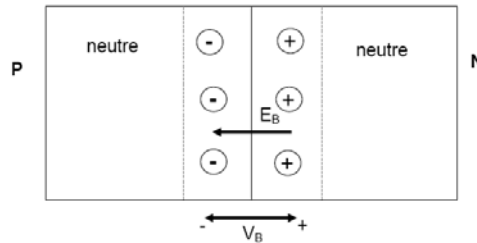


Fig A.7 Unió p-n [2]

Si apliquem un potencial extern a aquesta unió p-n, es pot aplicar la borna de major potencial a la part de la unió que és de silici extrínsec tipus p, fent que la unió es polaritzi directament. En aquest cas, el camp extern té sentit oposat al camp de la barrera i al ser major que aquest fa que hi hagi un corrent de difusió de forats de p a n i d'electrons de n a p i, per tant, que condueixi, Fig A.8.

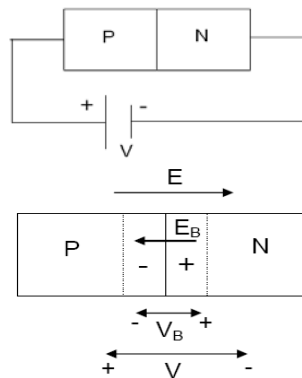


Fig A.8 Polarització directa [2]

Contràriament, si connectem la borna positiva a la part de silici n polaritzem la unió inversament i no condueix. Això es deu a que afegim un camp exterior al camp de la barrera augmentant el total i per tant fent que no hi circuli cap corrent.



D'aquesta manera, tenint en compte els dos efectes possibles tenim que la corba característica I-V per la unió p-n és la donada per la Fig A.9, principi en que es basa el díode.

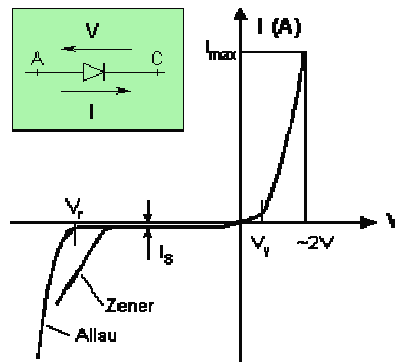


Fig A.9 Corba intensitat-tensió de la unió p-n [2]

A.2.3. Expressió matemàtica del díode

El model matemàtic més utilitzat per a representar el comportament del díode és el model de Shockley [2], donat per l'equació (Eq. A.1).

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_D}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (\text{Eq. A.1})$$

A on:

- I_d és la intensitat del corrent que travessa el díode i V_D la diferència de tensió entre els seus extrems.
- I_0 és el corrent de saturació
- q és la càrrega de l'electró
- T és la temperatura absoluta de la unió
- k és la constant de Boltzmann
- n és el coeficient d'emissió, dependent del procés de fabricació del díode i que sol adoptar valors entre 1 (per al germani) i de l'orde de 2 (per al silici).

Si tenim en compte la resistència en sèrie del díode R_s , queda l'equació (Eq A.2).



$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V_D - R_S \cdot I_d)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (\text{Eq A.2})$$

A.2.4. L'Efecte fotoelèctric i les cèl·lules solars

El principi de funcionament de les fotovoltaïques és l'efecte fotoelèctric, que no és res més que la conversió de l'energia de la llum portada pels fotons en energia elèctrica. Tenint en compte que la majoria de la radiació solar incident sobre la superfície de les cèl·lules està compresa entre els 0,35 i els 0,3 μm de longitud d'ona, la cèl·lula fotovoltaica convencional no és sinó un diode especialment dissenyat per a aprofitar amb la màxima eficiència la energia dels fotons que incideix sobre la superfície amb aquest rang de longituds d'ona, [3].

Quan un fotó incideix sobre una unió p-n amb un energia superior a l'amplada de la banda prohibida es genera un parell electró-forat, de manera que si aquest es produeix a la zona de transició, l'electró i el forat es desplaçaran en sentits oposats, sota l'acció del camp elèctric existent. Si el parell electró-forat es genera a la zona p propera a la unió, és probable que l'electró sigui captat pel camp elèctric i accelerat cap a la zona n, de manera que el forat roman a la zona p. Pel cas que l'electró-forat es generi a la zona n propera a la unió, succeirà el contrari. D'aquesta manera, en els tres casos, és crea una corrent que podem assimilar a una corrent de forats I_S que va de n a p en el sentit del camp elèctric de la unió.

Com ja s'ha esmentat, per a que un fotó pugui produir un parell electró-forat, necessita tenir un energia mínima, una longitud d'onda menor que un valor determinat, però si succeeix el contrari, es a dir si resulta que els fotons són molt energètics, l'energia sobrant de la formació del parell no s'aprofita i es transforma en energia calorífica. D'aquesta manera es pot demostrar com per a un material exposat a la llum solar (longitud d'ona entre els 0,35 i els 0,3 μm) i amb un valor banda prohibida donat, existeix una determinada longitud d'ona per a la que la corrent de resposta I_S és màxima. Per aquest motiu es tant important el valor de la banda prohibida o gap dels materials.

Un altre factor a tenir en compte és que per a que aquest moviment d'electrons sigui possible, els portadors han de poder arribar a els contactes abans de recombinar-se, per tant el material de la unió ha de ser molt pur i el gruix de la cèl·lula adequat.



A.2.5. Corba característica de la cèl·lula fotovoltaica

Així doncs, tenint en compte els dos efectes esmentats que es produeixen en una unió p-n, la resposta d'aquesta quan es sotmesa a la llum solar, Fig A.10, és la obtinguda de la suma de l'efecte fotoelèctric i el d'un diode convencional.

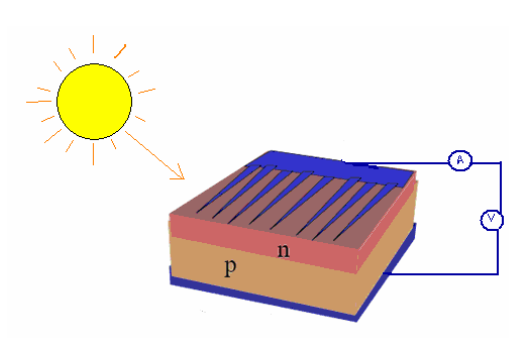


Fig A.10 Figura simplificada d'una cèl·lula fotovoltaica

I la intensitat donada per aquesta serà la resta de dues intensitats: I_s i I_d ; tal com mostra la equació (Eq. A.3).

$$I = I_s - I_d = I_s - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V_D - R_S \cdot I_d)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \tag{Eq A.3}$$

On ambdós corrents depenen del paràmetres constructius de la unió i, a més, I_s depèn de la irradiació incident.

Així, la corba característica d'una cèl·lula solar és la donada a la Fig A.11.

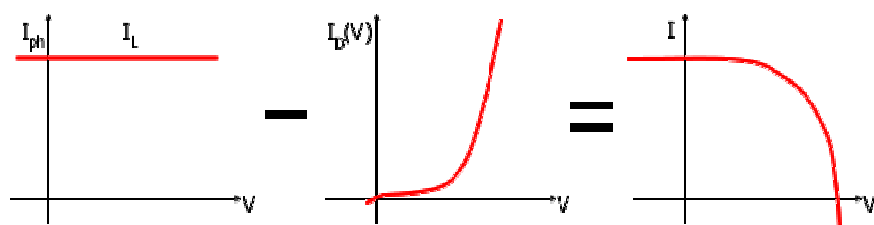


Fig A.11 Corba característica d'una cèl·lula fotovoltaica [2]



Es denominarà com a intensitat de curtcircuit, I_{sc} , al valor de la intensitat quan la tensió és nul·la, i com a tensió en circuit obert, V_{oc} , la tensió quan la intensitat és nul·la. Si es substitueix a l'equació (Eq. A.3), i es menysté la resistència en sèrie, R_s , resulta l'equació (Eq. A.4).

$$I_{sc} = I = I_s - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) = I_s \quad (\text{Eq. A.4})$$

I l'equació (Eq. A.5).

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T \cdot n}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_s}{I_0} + 1 \right) = \frac{k \cdot T \cdot n}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{Eq. A.5})$$

En una primera aproximació la cèl·lula fotovoltaica és pot representar mitjançant l'esquema equivalent de la figura Fig A. 12.

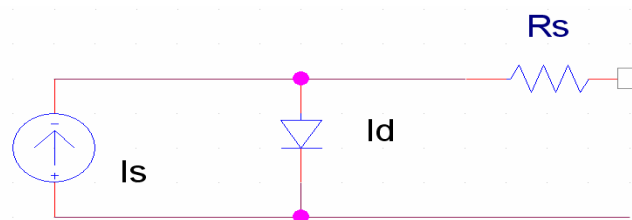


Fig A.12 Circuit equivalent d'una cèl·lula fotovoltaica (elaboració pròpia)

Tot això pel que fa a la resposta estàtica o en règim permanent de la cèl·lula fotovoltaica. Si tinguéssim en compte la resposta dinàmica veuríem que aquesta és molt ràpida, de l'ordre de desenes de microsegon, comportant-se aquest dispositiu com un fotodíode. De fet, la velocitat d'aquesta resposta depèn del la capacitat de difusió, en paral·lel amb una capacitat de la zona de carga i de la resistència de la unió pn, de manera que per a cèl·lules grans tindrem capacitats majors i respostes dinàmiques més lentes. Però com s'ha dit, aquestes respostes dinàmiques són molt ràpides pel tipus l'estudi que realitzem, de manera que considerarem instantani el comportament de les cèl·lules.



A.2.5.1. Efecte de la temperatura, la irradiació i el material de fabricació

La resposta d'una cèl·lula fotovoltaica depèn en bona part dels materials dels que està fabricada, ja que aquests seran els que ens marcaran el valor de la intensitat creada per efecte fotoelèctric i la de saturació. De la mateixa manera, hi ha altres factors que hi influeixen en la resposta de la cèl·lula tals com la temperatura i, com s'ha dit anteriorment, la irradiació incident.

A.2.5.1.1 Efecte de la temperatura

La resposta de les cèl·lules fotovoltaïques depèn fortament de la temperatura a la que es troben, degut a que es troben sotmeses a la radiació directe aquestes poden arribar a temperatures de fins a 60-65°C. Aquest efecte de la temperatura afecta principalment a la densitat de corrent de saturació, J_0 , que es veu incrementada amb la temperatura, [4], tal com mostra l'equació (Eq. A.6).

$$J_0 = B \cdot T^{XTI} \cdot \ell^{-\frac{E_g}{k \cdot T}} \Rightarrow I_0 = Area_cellula \cdot J_0 = f(T) \quad (\text{Eq. A.6})$$

A on:

- B , XTI i k són constants
- T és la temperatura en Kelvin
- E_g és la energia de banda prohibida que també és dependent de la temperatura.

Si es grafica es pot observar com a més temperatura menys voltatge en circuit obert i com per cada cas sempre hi ha un punt de màxima potència per a tota cèl·lula fotovoltaica i panell (conjunt de cèl·lules), Fig A.13, es dedueix que per una cèl·lula donada es pot extreure menys potència com més gran sigui la temperatura a la que es troba.

Aquest punt de màxima potència, donat pels punts U_{MPPT} i I_{MPPT} (sigles de l'anglès Maximum Power Point), com s'ha esmentat no és fix sinó que anirà variant amb la temperatura i, com es veurà posteriorment, anirà variant amb la irradiació, entre d'altres factors. Per aquest motiu els convertidors connectats als panells fotovoltaics habitualment inclouen un mecanisme de seguiment del punt de màxima potència.



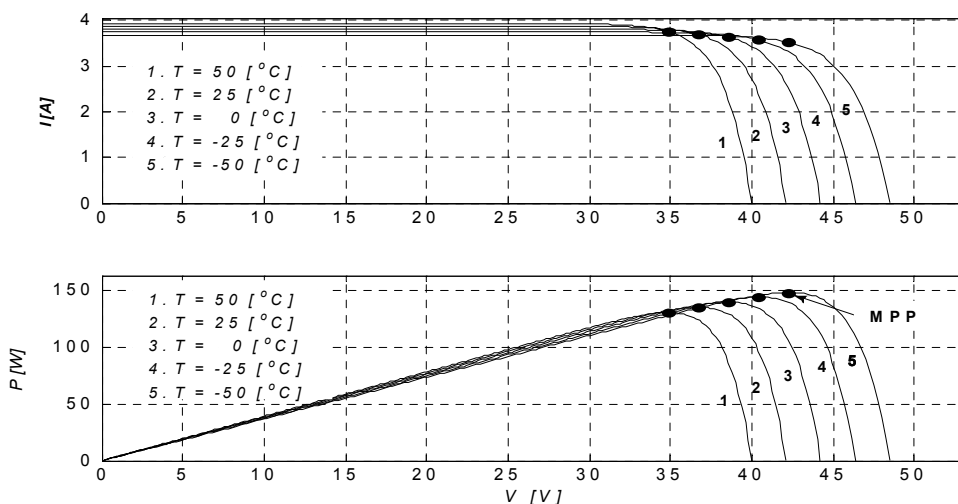


Fig. A.13 Característica d'intensitat i potència per a una placa fotovoltaica amb una irradiació de 1000W/m^2 (elaboració pròpia)

A.2.5.1.2 Efecte de la irradiació

Com s'ha anat insistint, un altre factor que influeix de forma determinant en la resposta de la cèl·lula fotovoltaica és la irradiació que aquesta rep. Fet que ve reflexat en la equació (Eq.A.7), [4].

$$I_S = (\text{Area}_{\text{cèl.lula}} \cdot J_S) \cdot \frac{G}{1000} \quad (\text{Eq.A.7})$$

A on:

- J_S és la densitat de corrent generada per l'efecte fotoelèctric (A/m^2), que es veu que depenia tant del material com de la longitud d'ona de l'espectre de radiació que rebia la cèl·lula. El factor $1/1000$ és degut a que normalment J_S és dona per a una radiació estàndard de espectre AM1.5G de 1000W/m^2 i a 25°C , [4].
- G és la irradiació global rebuda per m^2 de cèl·lula.

Així doncs per a una temperatura donada i diferents radiacions tindriem la figura Fig.A.14.

Es veu com efectivament la corba varia de forma substancial segons la irradiació que rebí, i el punt de màxima potència també. És justifica d'aquesta manera en determinades aplicacions l'ús de mecanismes de seguiment de punt de màxima potència ja que aquesta



irradiació variarà segons la hora del dia i segons l'estació de l'any per a una instal·lació donada.

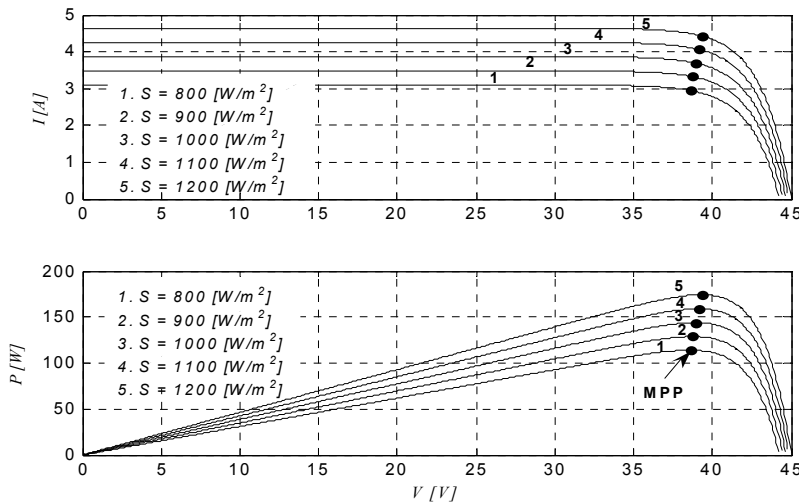


Fig.A.14 Característica de intensitat i potència per a una placa fotovoltaica amb una temperatura de 25°C (elaboració pròpia)

A.2.5.1.3 Efecte conjunt de la temperatura i de la irradiació

S'ha pogut observar com per a una cèl·lula determinada la corb característica I-V variarà segons la irradiació incident i la temperatura d'aquesta. És de suposar que aquests dos factors no seran aïllats ni molt menys fixes durant tot el dia ni al llarg de l'any, sinó que aniran variant i a més, molt probablement, estaran interrelacionats ja que a més irradiació incident sobre la cèl·lula més temperatura tindrà aquesta. Així doncs, si féssim l'anàlisi diari del comportament d'una cèl·lula, veuríem com a mesura que passa el dia rep més irradiació, va augmentant I_{sc} i per tant la potència que en podem extreure. Però al mateix temps la placa s'anirà calentant, disminuint el valor de V_{oc} i conseqüentment veurà disminuïda la potència que en podem extreure, [4]. De totes maneres l'efecte que provocat per l'augment de irradiació, per exemple de 0 a 1000 W/m², al llarg del dia és molt major que l'efecte de disminució causat per l'augment de temperatura, de 15 a 65°C com a molt.

A.2.5.1.4 Efecte degut al material de fabricació

La diferència principal prové de els valor de les densitats de corrent de saturació, J_0 , per als diferents materials. Pel cas de les cèl·lules de GaAs és vuit ordres de magnitud menor que



per a les cèl·lules de silici cristal·lí. Aquesta enorme diferència és deguda a la diferent concentració de càrregues per als diferents materials, n_i^2 és 10^{10}cm^{-3} pel silici i $9,27\cdot 10^5\text{cm}^{-3}$ pel GaAs.

Pel que fa a la densitat de corrent generada per efecte fotoelèctric, J_s , la diferència entre materials és molt menor ($31,188\cdot 10^{-3}\text{A/cm}^2$ pel silici i $25,53\cdot 10^{-3}\text{A/cm}^2$ pel GaAs), i no hi influeix molt [4].

Així doncs hi haurà diferències pel que fa a diferents materials i el punt de màxima potència, degut principalment a la corrent de saturació i no tant a la corrent generada per efecte fotoelèctric, figures Fig.A.15 i Fig.A.16.

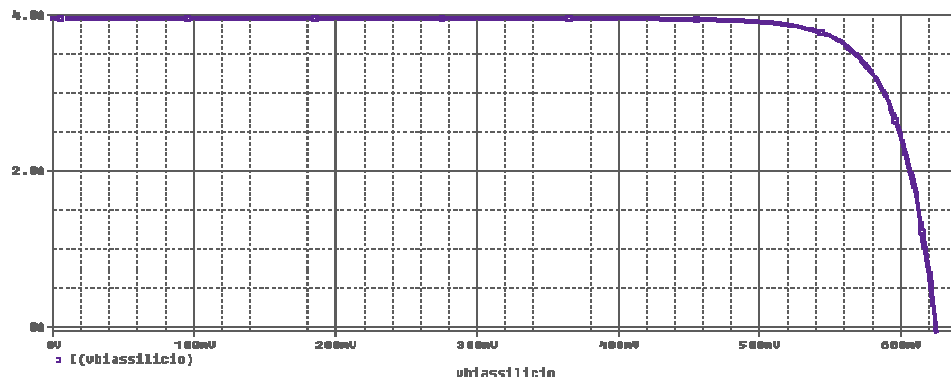


Fig.A.15 Simulació de la corba característica d'una cèl·lula de silici (elaboració pròpia)

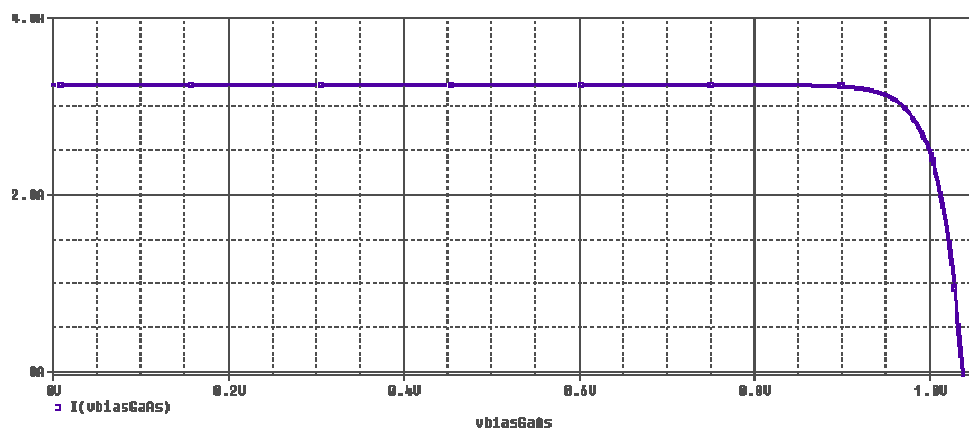


Fig.A.16 Simulació de la corba característica d'una cèl·lula de GaAs (elaboració pròpia)

Com s'ha vist en equacions anteriors, la densitat de corrent de saturació, J_0 , i la densitat de corrent generada per efecte fotoelèctric, J_s , depenen de la banda prohibida. Així doncs, si es defineix el rendiment de la cèl·lula tal com l'equació (Eq.A.8), [3].



$$\eta = \frac{P_{MPPT}}{P_{rebuda}} = \frac{U_{MPPT} \cdot I_{MPPT}}{Area_cèl.lula \cdot G} \quad (\text{Eq.A.8})$$

A on:

- G és la irradiació global rebuda per m^2 de cèl·lula.
- U_{MPPT} i I_{MPPT} defineixen els punts de màxima potència de la cèl·lula

Llavors, tenint en compte que U_{MPPT} i I_{MPPT} dependran del GAP del material, es pot graficar el rendiment teòric d'una cèl·lula fotovoltaica en funció de la banda prohibida del material de que està composta, figura Fig.A.17, de manera que per a un espectre solar donat (longitud d'ona entre els 0,35 i els 0,3 μm majoritàriament) hi haurà materials que podran generar més o menys potència.

D'aquesta manera podem veure els diferents rendiments teòrics que es poden obtenir per a unions de diferents material. Veiem que l'arseniür de Gal·li (GaAs) té un GAP molt pròxim al de màxim aprofitament de l'espectre solar.

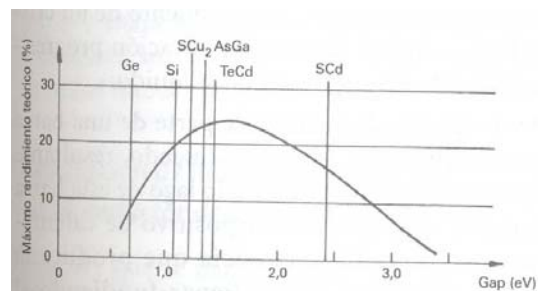


Fig.A.17 Rendiment teòric de la cèl·lula fotovoltaica en funció del GAP,[3].

A.3. Model matemàtic de la cèl·lula fotovoltaica

Com s'ha vist, els factors que intervenen en el funcionament de les cèl·lules fotovoltaïques són molts i molt diversos, tant que el model anterior basats en una font de corrent i un diode no sempre són representatius, tot i ser una bona primera aproximació. Això fa que per a poder arribar a simular el comportament real d'una cèl·lula haguem de recórrer a models més complexes.



En aquest intent de aconseguir una millor aproximació, s'han anat afegint components a aquell primer model ideal, de manera que s'obté el model de la figura Fig.A.18, [4] i [5].

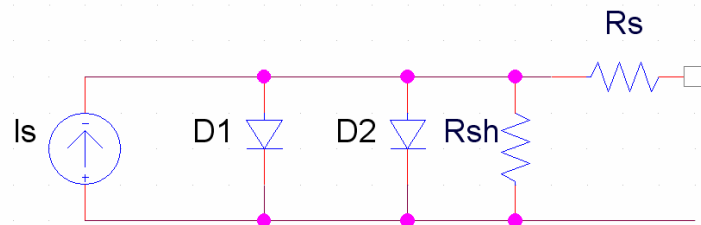


Fig.A.18 Circuit equivalent d'una cèl·lula fotovoltaica (elaboració pròpia)

A on s'ha afegit un segon diode $D2$ i una resistència en paral·lel Rsh . Com anteriorment, I_s representa la corrent generada per efecte fotoelèctric i $D1$ representa la corrent de difusió.

Atenent a aquest circuit equivalent, ens queda l'equació (Eq.A.9).

$$I = I_s - I_{d1} - I_{d2} - I_r = I_s - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{q(V - R_s \cdot I_d)}{n_1 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left(e^{\frac{q(V - R_s \cdot I_d)}{n_2 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{Eq.A.9})$$

A.3.1. Efecte de la resistència en sèrie R_s

La resistència en sèrie R_s representa les pèrdues per resistència que té qualsevol cèl·lula: resistència entre contactes, del propi material, etcètera. L'efecte que té aquesta resistència sobre la corba original de la cèl·lula fotovoltaica ideal és el que es pot observar a la figura Fig.A.19, [4].

Es veu com té un gran efecte sobre la corba característica, a més valor de R_s la corba va aixafant-se, de manera que pot arribar a fer canviar el valor de la intensitat de curtcircuit.

Per a que aquest efecte no tingui lloc, els fabricants intenten que aquest valor sigui prou baix de manera que no s'alteri substancialment el comportament ideal de la cèl·lula. Habitualment els valors que s'acostumen a trobar són de l'ordre de 0.01Ω o inferiors. També podem observar com el valor del voltatge en circuit obert no es veu afectat en cap moment per la



resistència sèrie. Això es veu a l'equació (Eq.A.10), igualant l'equació de la cèl·lula a 0 (tensió de curtcircuit, V_{oc}).

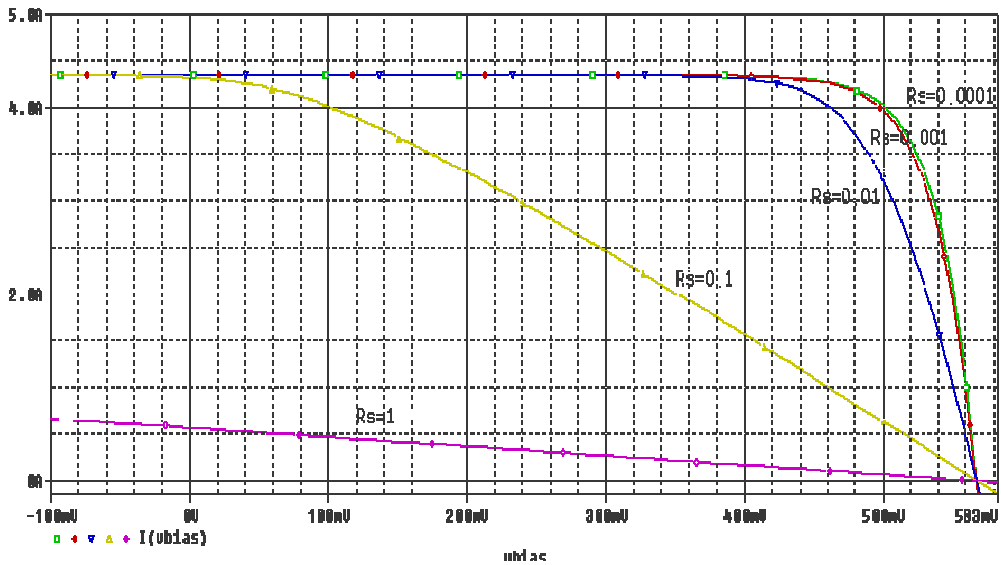


Fig.A.19 Efecte de la resistència en sèrie sobre la corba característica de la cèl·lula fotovoltaica (elaboració pròpia)

$$0 = I_s - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{q(V_{oc})}{n_1 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left(e^{\frac{q(V_{oc})}{n_2 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \tag{Eq.A.10}$$

Veiem com V_{oc} és independent del valor de R_s , tot i que no ho és de la resistència en paral·lel, R_{sh} , i dels corrents de difusió dels díodes.

A.3.2. Efecte de la resistència en paral·lel R_{sh}

Com en el cas de la resistència en sèrie, la variació de R_{sh} pot comportar una elevada degradació de la característica I-V de manera que per valors menors de la resistència en paral·lel, la corba es va aixafant, [4]. En aquest cas és el valor de la intensitat de corrent que roman constant i el que varia és el de la tensió de circuit obert V_{oc} , figura Fig.A.20. Si ens fixem en l'equació (Eq.A.10), V_{oc} és inversament proporcional a la resistència en paral·lel.



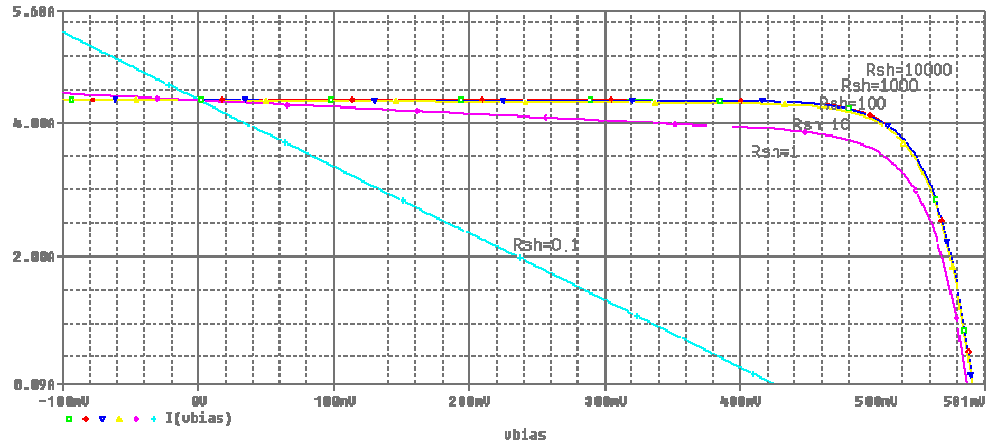


Fig.A.20 Efecte de la resistència en paral·lel sobre la corba característica de la cèl·lula fotovoltaica (elaboració pròpia)

A.3.3. Efecte del diode de recombinació $D2$

Per veure l'efecte que té el diode de recombinació, [4], es fa variar la densitat de corrent de difusió d'aquest diode, J_{02} , podent-se observar la influencia que té en la resposta a la figura Fig.A.21.

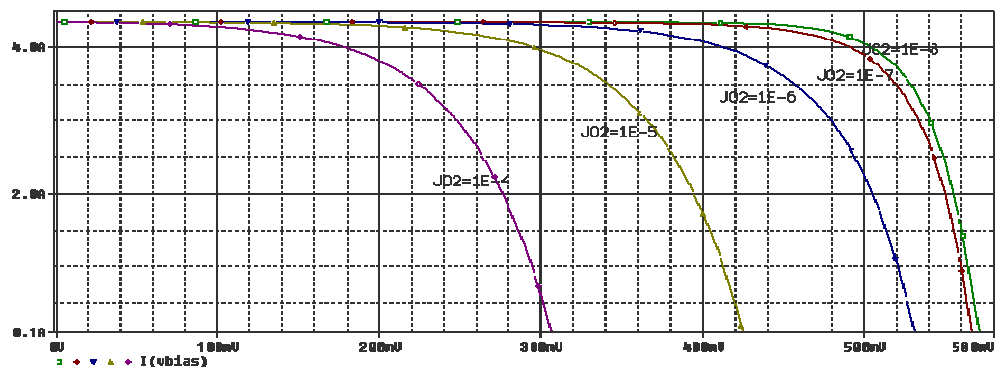


Fig.A.21 Efecte del diode de recombinació sobre la corba característica de la cèl·lula fotovoltaica (elaboració pròpia)



A.4. La cèl·lula com a unitat bàsica

La cèl·lula fotovoltaica és la unitat bàsica del sistema fotovoltaic. Les cèl·lules, degut al complex procés de fabricació que segueixen, tenen un àrea limitada i només produeixen de 1 a 4 W i, per tant, proporcionen valors de tensió i intensitats limitats per la majoria d'aplicacions. Per aquest motiu s'uneixen, figura Fig.A.22, per a construir mòduls fotovoltaics que proporcionen una potència major, típicament de 25 a 180 Wp, i són més fàcils d'utilitzar degut a que és un suport més robust. Aquests mòduls també s'uneixen de manera que s'obtenen els panells fotovoltaics de més potència, i més panells o mòduls connectats en sèrie formen el que anomenem com a branca.

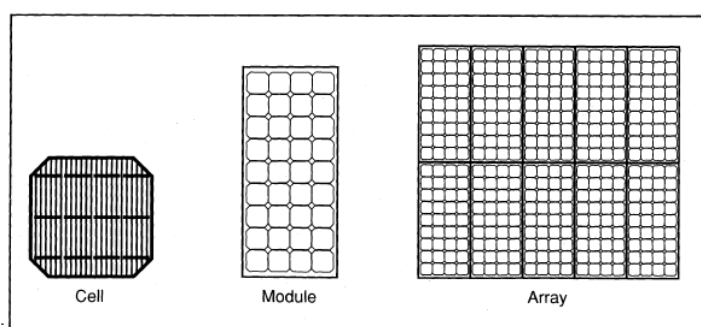


Fig.A.22 La cèl·lula és la unitat bàsica del panell

A.4.1. Connexió en sèrie i en paral·lel

La unió en sèrie o en paral·lel, com s'ha dit, és fa atenent al nivell de tensió i intensitat que volem que proporcioni el nostre mòdul fotovoltaic. Habitualment, els mòduls fotovoltaics acostumen a contenir de l'ordre de 33 a 36 cèl·lules fotovoltaïques en sèrie.

Si tenim una cèl·lula fotovoltaica donada, amb un nivell de radiació i condicions de temperatura estables, obtindrem una corba I-V. Si es posés una altra cèl·lula idèntica en idèntiques condicions en paral·lel amb aquesta, obtindríem una nova corba I-V pel sistema de dues cèl·lules però la intensitat de curtcircuit, I_{sc} , seria el doble, mentre que el tensió en circuit obert, V_{oc} , romandria constant, figura Fig.A.23. Si féssim el mateix procés però aquest cop amb les cèl·lules en sèrie succeiria que la nova corba I-V del sistema tindria el doble de



tensió en circuit obert, V_{oc} , respecte la primera cèl·lula, i la intensitat de curtcircuit, I_{sc} , seria la mateixa que la de la cèl·lula sola, figura Fig.A.24.

Així doncs, per obtindre nivells de tensió elevats connectaríem cèl·lules en sèrie i per arribar a nivells de intensitat elevats les connectaríem en paral·lel. A més podem observar com el model del panell és el mateix que per la cèl·lula, però aquest cop amb una intensitat de curtcircuit N_s vegades la d'una cèl·lula i una tensió de circuit obert N_p vegades major, essent N_s el número de cèl·lules en sèrie i N_p el número de cèl·lules en paral·lel. Idènticament succeeix pels punts de màxima potència del panell respecte dels de una cèl·lula.

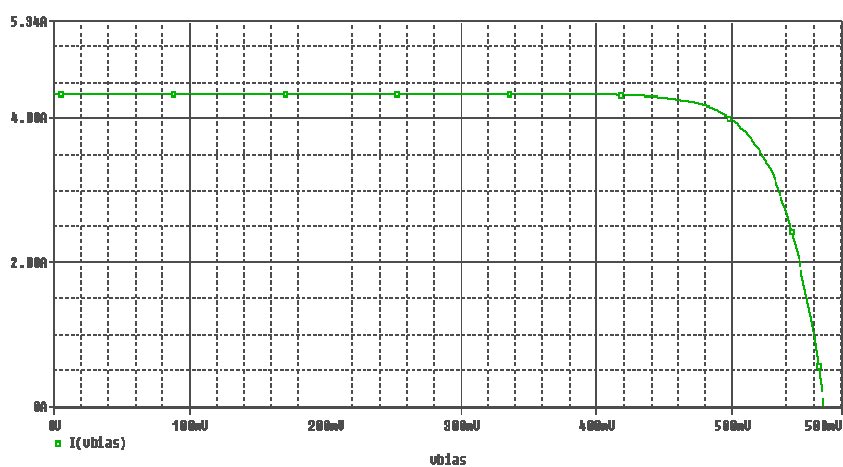


Fig.A.23 Corba I-V de dues cèl·lules de $I_{sc} = 4.4 \text{ A}$ i $V_{oc} = 570\text{mV}$, en sèrie (elaboració pròpia)

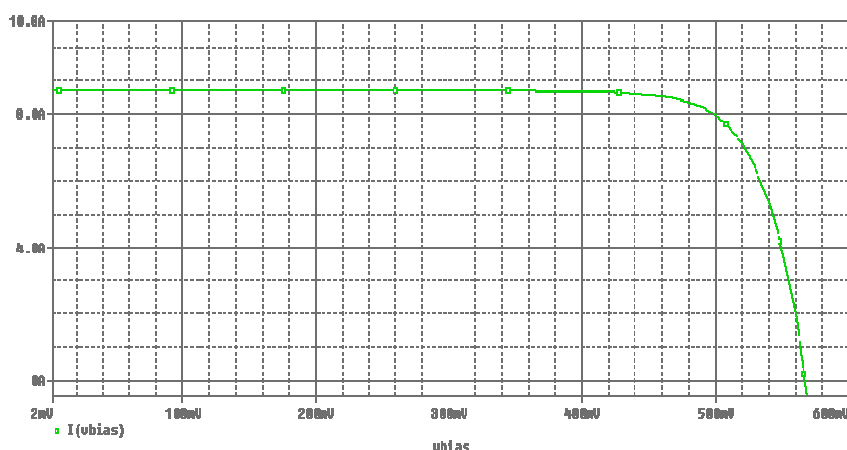


Fig.A.24 Corba I-V de dues cèl·lules de $I_{sc} = 4.4 \text{ A}$ i $V_{oc} = 570\text{mV}$, en paral·lel (elaboració pròpia)



Això és pel cas ideal, en que les cèl·lules són idèntiques i les condicions de funcionament les mateixes. Evidentment això no és així, normalment la radiació que reben les cèl·lules no és idèntica i això fa que la cèl·lula que rep menys radiació limiti la energia que en podem obtenir de les cèl·lules amb qui està connectada. Aquest fenomen fa que hi hagi moments en que les cèl·lules que reben menys rendiment puguin actuar com a dissipadores d'energia, fet que provoca el seu calentament i que a partir de 80-100°C pot crear danys irreversibles al panell, fenomen anomenat de punt calent. Aquest fenomen justifica la connexió de díodes de by-pass entre cèl·lules per evitar que és malmetin.

A.4.2. Construcció d'un model simple de panell a partir paràmetres proporcionats pel fabricant

Partint de l'esquema equivalent d'un generador fotovoltaic format per N_s cèl·lules en sèrie i a partir de l'equació (Eq.A.9) sense el segon díode, D_2 , obtenim la equació (Eq. A.11), [3].

$$I = I_s - I_{d1} - I_r = I_s - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{q(V - R_s \cdot I_d)}{n_1 \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} = I_s - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{(V - R_s \cdot I_d)}{a}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{Eq.A.11})$$

Essent a el valor donat per l'equació (Eq.A.12), on $V_T = \frac{k \cdot T}{q} \approx 0.025mV$ a 300 K.

$$a = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot N_s \quad (\text{Eq.A.12})$$

Com es pot observar a l'equació (Eq.A.11) el model és pot determinar a partir de cinc valors: I_s , I_{01} , R_s , R_{sh} i a ; que hauran de ser obtinguts fàcilment a partir dels paràmetres proporcionats pel fabricant que acostumen a ser la tensió en circuit obert, V_{oc} , la intensitat de curtcircuit, I_{sc} , i la tensió i intensitat al punt de màxima potencia en condicions estàndard, V_{MPP} i I_{MPP} .

La majoria de cèl·lules utilitzades avui en dia tenen una resistència paral·lel molt gran, això fa que podem considerar-la infinit, menystenint l'últim terme de l'equació (Eq.A.11), quedant un model dependent de quatre paràmetres. Hem de tenir en compte que aquesta simplificació no podem fer-la quan el pendent sigui negatiu per a valors baixos de tensió en comptes de ser quasi horitzontal, figura Fig.A.20.



Com s'ha vist a l'equació (Eq.A.4), si tenim una resistència sèrie prou petita, la intensitat de curtcircuit serà igual a la generada per efecte fotoelèctric: $I_{sc} \approx I_s$.

Tenint en compte l'equació (Eq.A.11), en circuit obert el terme exponencial és molt més gran que 1, per tant menyspreem el 1, i la intensitat és nul·la, així ens queda que I_{01} pren el valor donat per l'equació (Eq.A.13).

$$I_{01} = I_s \cdot \ell^{\frac{-V_{oc}}{a}} \quad (\text{Eq.A.13})$$

Despreciant el 1 envers el terme exponencial de l'equació (Eq.A.11) i aplicant-ho al cas del punt de màxima potència, obtenim per la resistència en sèrie el valor donat per l'equació (Eq.A.14).

$$R_s = \frac{a \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_s}\right) - V_{mpp} + V_{oc}}{I_{mpp}} \quad (\text{Eq.A.14})$$

Aquesta expressió limita el valor de a i de R_s . Això es deu a que al augmentar a , R_s tendeix a fer-se menor de zero i vicerversa.

Per altre banda, tenint en compte el efecte de la temperatura, pot demostrar-se, [3], que respecte d'una situació de referència a una temperatura donada, podem obtenir altres valors per altres temperatures, equacions (Eq.A.15), (Eq.A.16) i (Eq.A.17).

$$a = \frac{a_{ref} \cdot T}{T_{ref}} \quad (\text{Eq.A.15})$$

$$I_s = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{sref} + \mu_{isc} \cdot (T - T_{ref}) \right) \quad (\text{Eq.A.16})$$

$$I_0 = I_{0ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \ell^{\frac{\varepsilon \cdot N_s}{a_{ref}} \left(1 - \frac{T_{ref}}{T} \right)} \quad (\text{Eq.A.17})$$

A on:

- El paràmetre a_{ref} s'ha de calcular segons l'equació (Eq.A.18).



$$a_{ref} = \frac{\mu_{voc} \cdot T_{ref} - V_{oc} + \varepsilon \cdot N_s}{\frac{\mu_{isc} \cdot T_{ref}}{I_{sref}} - 3} \quad (\text{Eq.A. 18})$$

- ε és la amplada de la banda prohibida del material expressat en volts. Típicament 1.1 pel silici i 1.35 pel GaAs.
- μ_{isc} és el coeficient de variació de la intensitat de curtcircuit amb la temperatura que pot determinar-se a partir de les mesures efectuades a diferents temperatures, amb l'equació (Eq.A. 19).

$$\mu_{isc} = \frac{dI_{sc}}{dT} \approx \frac{I_{sc,T2} - I_{sc,T1}}{T_2 - T_1} \quad (\text{Eq.A. 19})$$

- μ_{voc} és el coeficient de variació de la tensió de circuit obert amb la temperatura que pot determinar-se a partir de les mesures efectuades a diferents temperatures amb l'equació (Eq.A. 20).

$$\mu_{voc} = \frac{dV_{oc}}{dT} \approx \frac{V_{oc,T2} - V_{oc,T1}}{T_2 - T_1} \quad (\text{Eq.A. 20})$$

Així doncs a partir dels valors de V_{oc} , I_{sc} per dos temperatures i els valors de V_{MPP} i I_{MPP} , podem obtenir l'esquema equivalent simple d'una cèl·lula, amb totes les consideracions i limitacions exposades anteriorment que fa que no sigui només que una primera aproximació.

A.5. Tecnologia de fabricació i tipus de cèl·lules fotovoltaïques

Al mercat trobem diferents tipus de cèl·lules fotovoltaïques fetes de diferents materials o bé mitjançant diferents tècniques: cèl·lules de silici monocristal·lí o policristal·lí, pel·lícules fotovoltaïques fetes de silici cristal·lí o amorf, pel·lícules fotovoltaïques de sulfo-sel·linur de coure indi i gal·li (CIGS), etcètera.

Tot i haver una gran diversitat, actualment el 90%, Fig. A.25, de la fabricació de mòduls fotovoltaïcs està basada en la tecnologia de cèl·lules de silici cristal·lí, i s'espera continuar amb aquesta quota de mercat fins al 2010 i endavant.



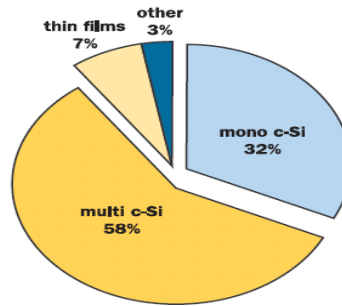


Fig.A.25 Distribució de la producció de cèl·lules fotovoltaïques l'any 2003, [6]

Aquesta predominança al mercat es deu a que, apart de que el silici és el segon element més abundant a l'escorça de la Terra, des dels anys 60 hi ha hagut una enorme esforç econòmic i tècnic pel que fa al desenvolupament de l'indústria del silici. Hi ha hagut molta investigació dedicada a esbrinar el comportament químic i elèctric del Si i com fabricar-lo amb suficient puresa i amb una estructura adequada. Totes aquestes investigacions anaven encaminades cap el desenvolupament de circuits integrats més complexes. D'aquesta manera, la indústria fotovoltaica va aprofitar la infraestructura així com tots els avanços fets en aquest element fins al moment. Tot i així actualment apareixen nous tipus de tecnologies que ja estan donant bons resultats.

Cal destacar que tot i que al llarg dels anys, Fig.A.26, hi ha hagut predominança de les cèl·lules de silici monocristal·lí, actualment estan prenent relleu les cèl·lules de silici policristal·lí, que tot i tenir eficiències menors són menys costoses.

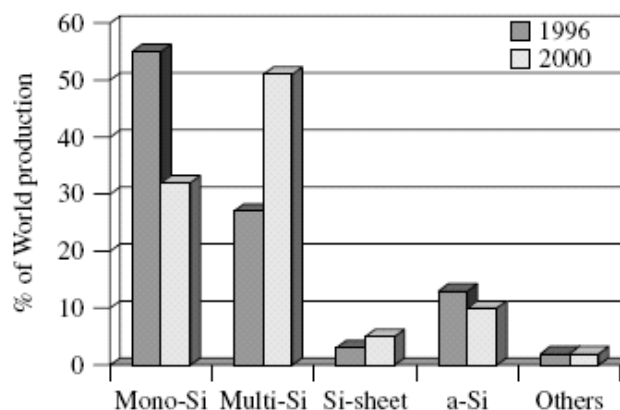


Fig.A.26 Comparació de les quotes de mercat segons tipus de tecnologia fotovoltaica (anys 1996 i 2001), [7].



A.5.1. Cèl·lules de silici cristal·lí

Aquest tipus de cèl·lules tenen una alta eficiència, però en la seva fabricació es requereixen materials molt purs i processos de fabricació molt costosos, el cost de les làmines de silici pot suposar el 40% del cost total del mòdul, fet que ha propiciat l'aparició de noves tecnologies que utilitzen altres materials o menys quantitat de silici pur

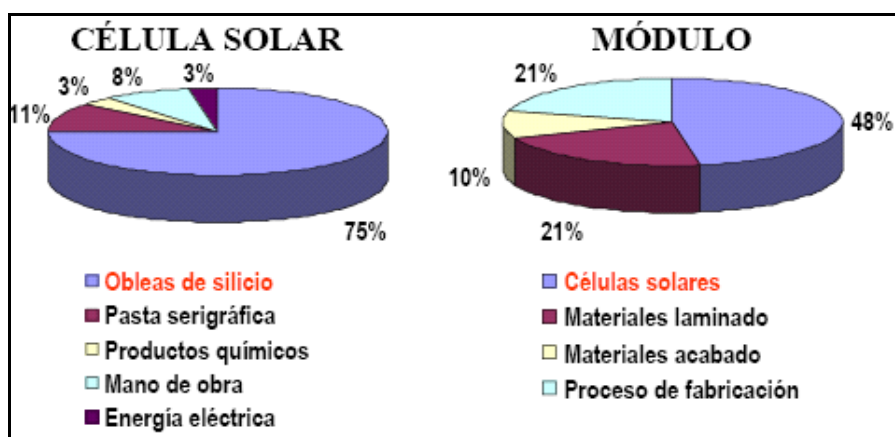


Fig.A.27 Cost percentual de fabricació de cèl·lules i mòduls solars [8]

Dins de la tecnologia basada en cèl·lules de silici cristal·lí, principalment ens trobem amb cèl·lules de silici monocristal·lí amb una eficiència de conversió del 12-15%, podent arribar a 24% en condicions de laboratori, i cèl·lules de silici multicristal·lí, també anomenat policristal·lí, amb una eficiència del 12%, podent arribar fins a 18%, però de cost més econòmic que les anteriors.

Cèl·lula de Silici Monocristal·lí: (Fig.A.28)

- Eficiència (mòduls) : 12 – 15 % (en condicions de laboratori es pot arribar al 24%)
- Forma: rodona / quadrada
- Color: negra / negra-blava / blavosa
- Pic de potència aprox.: 120 Wp/m²
- Preu aprox.: 4-5 € /Wp.



Fig.A.28 Cèl·lules de silici policristal·lí
SLK60M6L (Siliken)



Cèl·lula de Silici Multicristal·lí: (Fig.A.29)

- Eficiència (mòduls): 10 – 12 %
- Forma: quadrada
- Color: blavosa, reflexant
- Pic de potència aprox.: 100 W/m²
- Preu aprox.: 3-4 €/Wp



Fig.A.29 Cèl·lules de silici policristal·lí
SLK60P6L (Siliken)

A.5.1.1. Procés de Fabricació de les cèl·lules de silici cristal·lí (c-Si)

Bàsicament el procés de fabricació de cèl·lules cristal·lines consta de 8 fases [3]:

1. **Obtenció de silici de grau metal·lúrgic** (silici metall de 98% de puresa) a forns d'arc als que es fa reaccionar carboni amb pols de silici a altes temperatures (al voltant de 1800 °C), produint-se la reducció del SiO₂.
2. **Purificació del Silici fins al 99,9999%** (en el cas de cèl·lules solars es pot admetre fins a un àtom estrany per cada milió d'àtoms de Silici). Normalment aquesta purificació es fa per reacció amb àcid clorhídric, una posterior destil·lació fraccionada del líquid obtingut i finalment una reducció amb hidrogen, obtenint finalment una barra de silici, de 2 m de llargada i 30 cm de diàmetre, anomenat polisilici.
3. **Creixement dels cristalls de Silici.** A més de requerir silici de molta puresa, les cèl·lules fotovoltaïques necessiten que els àtoms es trobin disposats de forma ordenada formant un cristall sense defectes. Això es fa a partir del polisilici obtingut a la fase prèvia. Pel cas de les cèl·lules monocristal·lins, bàsicament del a través de dos mètodes:
 - a. *Mètode de Czochralski (CZ):* És el més extès. Es fon el polisilici en un cressol de quars calentat per inducció, un cop fos es submergeix a la part superior de la massa una llavor de silici monocristal·lí situada a l'extrem d'una barra de polisilici. A continuació la barra es desplaça verticalment, molt lentament, a la vegada que gira sobre sí mateixa, produint-se el creixement d'un cristall única través d'una solidificació progressiva a la interfase entre sòlid i líquid.



- b. **Mètode flotant (FZ):** Es fon la barra de polisilici desplaçant sobre ella un dispositiu de calentament per radiofreqüència. Es comença fonent la part inferior, llavors es posa en contacte amb una llavor de silici monocristal·lí i es va desplaçant el dispositiu cap a la part superior de la barra.

En el cas de les cèl·lules policristal·lines es fon el polisilici en un cresol de grafit a on, mitjançant un procés de refredament controlat, obtenim un bloc de silici policristal·lí. Durant aquest processos s'incorpora una quantitat controlada de bor o fòsfor a la massa fosa per a que el silici sigui de tipus p o n.

4. **Producció de làmines de material semiconductor.** De les barres de silici monocristal·lí i dels blocs de silici policristal·lí obtenim làmines de 0,2 y 0,5 mm d'aquests materials. En aquest procés podem arribar perdre fins a un 50% de la matèria prima.
5. **Atac químic i texturització.** Després dels talls en l'etapa anterior la superfície queda molt malmesa, per això requereix d'un procés de neteja d'aquesta normalment a través d'un atac químic. Aquest atac es pot fer diferenciat segons direccions, de manera que la superfície presenta una rugositat pseudoperiòdica en forma de successió de piràmides anomenada texturitzada en cèl·lules monocristal·lines. Així, tot i que aquest increment en la superfície suposa un augment de la resistència en sèrie, també suposa una disminució de les pèrdues per reflexió.
6. **Formació de la unió.** S'introdueixen contaminants del tipus p o n per implementació d'ions o per difusió de fòsfor.
7. **Col·locació dels contactes metàl·lics.** A la part posterior acostuma a ocupar tota la superfície mentre que a la part superior s'intenta arribar a un compromís entre les pèrdues per ombrejat (augmenten amb la superfície de contacte) i les pèrdues degudes a la resistència en sèrie (disminueixen amb l'augment de la superfície de contacte). Per aquest motiu s'utilitzen contactes de 300 μm , tot i poder ser més prims.
8. **Tractaments antireflexants.** Juntament amb la texturització permeten reduir les pèrdues per reflexió a menys de l'1%. Poden fer-se abans de la col·locació dels contactes.



A.5.1.2. Fabricants de cèl·lules de silici cristal·lí:

- *Fabricants de cèl·lules de silici monocristal·lí:* Siemens Solar (USA), Solec Intl (USA), Astropower (USA), Hoxan (Japan), Isofoton (Spain), Helios (Italy), CEL (India), Bharat Hel (India), BP Solar/Solarex (UK, Spain, Australia)
- *Fabricants de cèl·lules de silici multicristal·lí:* Solarex (USA), Sharp (Japan), Kyocera (Japan), ASE GmbH (Denmark), Photowatt (France), Eurosolare (Italy), Shell Pilkington Solar (Denmark), Shell Netherlands (Netherlands).

A.5.2. Cèl·lules de làmina prima (Thin Films)

Apart de les cèl·lules de silici cristal·lí, també trobem un altre tipus de tecnologia anomenada pel·lícules fotovoltaïques (thin films) que permeten fabricar panells molt prims i incorporar-se a façanes d'edificis amb altres materials transparents, a més de permetre la fabricació de panells flexibles; això fa que es perfilin com el futur, sobretot pel que fa a aplicacions domèstiques. Tot i així, la quota de mercat actualment és molt baixa, degut principalment a que és una tecnologia molt nova i exclusiva per aplicacions fotovoltaïques, això fa que no estigui tan desenvolupada com ho estava la del silici cristal·lí.

Com s'ha vist, la fabricació de cèl·lules cristal·lines és molt costosa, per aquest motiu s'han desenvolupat tecnologies com aquesta, en que es requereix menys material o s'utilitza altre tipus de materials que comporten menys cost de fabricació. Així doncs ens trobem amb panells més lleugers, però que com a contrapart ofereixen unes eficiències menors.

Bàsicament trobem pel·lícules fotovoltaïques de silici amorf (a-Si), tel·luri de cadmi (CdTe) i de sulfo-sel·linur de coure indi i gal·li (CIGS); per a aquest tipus de tecnologies s'ha arribat a eficiències del 13%, 16.5% i 19% respectivament [9]. També es poden trobar pel·lícules fotovoltaïques de silici cristal·lí que tot i tenir eficiències elevades presenten problemes de cost en la seva fabricació.

A.5.2.1. Cèl·lules silici amorf de làmina prima (a-Si)

En aquest tipus de cèl·lules els àtoms que les componen no es col·loquen formant una estructura amb un ordre periòdic definit, això provoca que la vida mitjana dels portadors de càrrega en aquest material sigui molt baixa, i que en depengui fortament del nivell de contaminació del material i que el rendiment sigui més baix. A més, el silici amorf presenta



problemes de dopatge. Per intentar pal·liar aquests efectes negatius s'afegeix hidrogen que s'introdueix en aquests defectes (a-Si:H).

Cèl·lula de Silici Amorf: (Fig.A.30)

- Eficiència (mòduls): 4 – 9 %
- Forma: làmines primes
- Color: negra / marró fosc
- Pic de potència aprox.: 50 Wp/m²
- Preu aprox.: 5-6 €/Wp

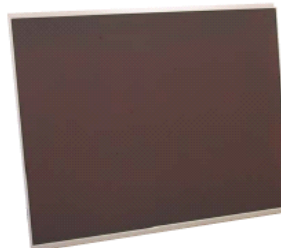


Fig.A.30 Pel·lícula fotovoltaica de silici amorf MEA100 (MHI, Mitsubishi)

També trobem cèl·lules de silici amorf amb una zona de silici intrínsec entremig, estructura p-i-n, ja que com s'ha dit els portadors tenen una vida mitja molt baixa a les zones p i n.

Aquest tipus de tecnologies s'utilitza en mòduls semitransparents i en rellotges solars o calculadores. Tot i ser menys eficients (s'ha arribat a eficiències del 13%) han estat molt utilitzades en aplicacions en l'espai per la seva lleugeresa. Tenen l'avantatge que tant el silici com el hidrogen, matèria prima de les pel·lícules, són materials relativament abundants i la deposició de materials amorfs pot realitzar-se a baixa temperatura i incloure un substrat de vidre. Tot i així, tenen un gran desavantatge i és que són inestables. La exposició a la llum solar fa que es vagin degradant, sobretot pel que fa ala seva intensitat de curtcircuit que va disminuint, i que la seva eficiència disminueixi notablement amb el temps. Tot i així, sotmetent la cèl·lula a temperatures superiors a 100°C es recuperen les especificacions originals de la cèl·lula.

A.5.2.1.1 Fabricants de Cèl·lules silici amorf de làmina prima

- *Fabricants de cèl·lules silici amorf de làmina prima:* ASE Phototronics (Alemanya), Canon (Japó), United Solar (USA), Solarex (USA), Sanyo (Japó), Kaneka (Japó), NAPS/Free Energy Europe (França), Dunasolar (Hongria), Rade Konkar (Hongria), Inrtersolar (Regne Unit), EPV (USA), Sinonar (Taiwan), Fuji (Japó).



A.5.2.2. Cèl·lules de silici cristal·lí de làmina prima

Tot i que són més fines que les cèl·lules de silici cristal·lí convencionals són més gruixudes que la resta de cèl·lules de làmina prima. Els aspectes positius d'aquest tipus de tecnologia és que, com les cèl·lules convencionals, el material és abundant, no tòxic i estable en el temps, a part de tenir una bona eficiència (s'ha arribat a valors de l'ordre del 17%); però a més a més es requereix menys material per la seva construcció.

El desavantatge, com en el cas de les cèl·lules convencionals de silici cristal·lí, segueix sent el seu elevat cost de fabricació.

A.5.2.2.1 Fabricants de Cèl·lules de silici cristal·lí de làmina prima

- *Fabricants de pel·lícules de cèl·lules de silici cristal·lí de làmina prima:* ASE Americas (USA), ASE GmbH (Germany), Astropower (USA), Ebara Solar (USA), Pacific Solar (Australia), Evergreen (USA).

A.5.2.3. Cèl·lules de tel·luri de cadmi de làmina prima

Pel que fa a les pel·lícules de Tel·luri de Cadmi (CdTe), és el material policristal·lí de fabricació més fàcil i el seu cost és menor, presenta unes eficiències mitges de l'ordre del 10%, podent arribar fins al 16% en laboratori, i estables. Fa més de deu anys que es fabrica per a calculadores solars però té el gran inconvenient de treballar amb Cadmi, metall considerat molt tòxic.

A.5.2.3.1 Fabricants de cèl·lules de tel·luri de cadmi de làmina prima

- *Fabricants de cèl·lules de tel·luri de cadmi de làmina prima:* ANTEC (Alemanya), BPSolar (Regne Unit, USA), Golden Photon (USA), Matsushita (Japó), Solar Cells Inc./ First Solar (USA).

A.5.2.4. Cèl·lules de Disel·leniur de coure indi i gal·li (CIGS) de làmina prima

Les pel·lícules de sulfo-sel·leniur de coure indi i gal·li (CIGS) i de disel·leniur de coure i indi (CIS) arriben a eficiències en laboratori de fins a 19% per les cèl·lules i del 9 % en mòduls comercials, a més sembla que conserven aquesta eficiència al llarg dels anys, tot i així la quota de mercat encara és molt baixa per aquest tipus de tecnologia. El fet que les investigacions en aquest camp siguin exclusivament per a l'industria fotovoltaica condiona



el seu avanç notablement, fet que no succeeix amb les tecnologies que utilitzen el silici com a matèria prima.

A.5.2.4.1 Fabricants de cèl·lules de Disel·leniur de coure indi i gal·li (CIGS) de làmina prima

- *Fabricants de cèl·lules de Disel·leniur de coure indi i gal·li (CIGS) de làmina prima:* EPV (USA), ISET (USA), Siemens Solar (USA, Dinamarca), Global Soar (USA), ZSW WürthSolar (Dinamarca), Showa Shell (Japó)

A.5.2.5. Cèl·lules d'arseniür de gal·li de làmina prima

La seva amplada de banda prohibida fa que aquest tipus de material es situï pròxim al màxim teòric de aprofitament de energia solar pera una sola unió. A més té facilitat per enllaçar-se amb altres materials de menor amplada de banda prohibida permeten així la construcció de cèl·lules tàndem, reduint així les pèrdues d'absorció i augmentant-ne la eficiència (s'han arribat a eficiències de 25-30% per cèl·lules). Tot i així, degut al seu elevat cost i a problemes de toxicitat dels seus components que en limiten la seva producció a gran escala, fa que aquest tipus de tecnologia s'empri en l'industria aeroespacial o en instal·lacions terrestres de concentració.

La tecnologia de concentració sorgeix de la idea de disminuir els costos de producció i consisteix en concentrar la llum a través d'una sèrie d'elements òptics en una cèl·lula de molt alta eficiència, la cèl·lula té un cost més elevat per m² però l'àrea utilitzada és menor. S'ha de dir que això es possible gracies a que la sensibilitat de l'eficiència d'aquest tipus de cèl·lules amb la temperatura es petita en comparació al silici, fet que en propici el seu ús en aquest tipus d'aplicació. També podem trobar cèl·lules de concentració fetes de GaSb, GaAs, GaAlAs o GaInP entre d'altres materials.

Cal tenir en compte que per a que aquest tipus de tecnologia sigui rentable s'han de aconseguir sistemes òptics de captació, sistemes de seguiment solar i cèl·lules d'alta eficiència que en conjunt no superin el cost de les estructures convencionals. Es creu que això és així, tot i que actualment no s'ha pogut confirmar degut a la falta de mercat d'aquest tipus de tecnologia que fa que no es pugui beneficiar de la baixada de preus per producció en massa.



A.5.2.5.1 Fabricants de cèl·lules d'arseniür de gal·li de làmina prima

- *Fabricants de cèl·lules d'arseniür de gal·li de làmina prima:* Amonich (USA), Entech (USA), Sunpower (USA), Midways Labs(USA).

A.5.3. Cèl·lules Tandem

Donat que es té una eficiència teòrica donada per a una única unió i que s'han arribat a eficiències elevades en comparació amb aquesta, sorgeix la idea de crear cèl·lules multiunió o tandem de manera que s'aprofita més l'energia continguda en tot l'espectre solar. Bàsicament es tracta de superposar cèl·lules fabricades de diferents materials de manera que fotons que no pugui aprofitar una els pugui aprofitar una altre, d'aquesta manera aconseguim utilitzar més part del espectre solar. En aquest tipus de panells s'acostuma a posar les cèl·lules de major GAP a la part superior i les de menor GAP a la part inferior, obtenint una resposta conjunta millor.

Amb aquest concepte s'han aconseguit eficiències teòriques del 35% per unions dobles, com per exemple la unió GaAs i GaSb, i del 50% per unions triples.



A.5.4. Taula resum de les diferents tecnologies

La Taula A.1 ens mostra les diferències entre les diverses tecnologies de fabricació de cèl·lules fotovoltaïques.

| Tecnologia | Eficiència | | | Flexibilitat | Altres característiques |
|--------------------------|------------------------|---------------------|-----------------|------------------|---|
| | Cèl·lula de laboratori | Mòdul en laboratori | Mòdul comercial | | |
| Silici cristal·lí | | | | | |
| Si Monocristal·lí | 24.7 | 22.7 | 12-14 | rígid | <ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia plenament desenvolupada • Cost actual elevat degut a les tècniques de fabricació |
| Si Multicristal·lí | 20.3 | 15.3 | 10-12 | rígid | <ul style="list-style-type: none"> • Similar al Monocristal·lí però de cost menor |
| Làmina prima | | | | | |
| Si amorf | 12.7 | - | 5-7 | rígid o flexible | <ul style="list-style-type: none"> • Dificultat en incrementar la seva eficiència • Degradació i inestabilitat |
| Si multicristal·lí | 12.4 | 10.4 | 6-8 | rígid | <ul style="list-style-type: none"> • No són tan fines com la resta de tecnologies de làmina prima • Segueix havent-hi problemes de cost |
| Tel·luri de Cadmi | 16.5 | 10.7 | 7-8 | rígid | <ul style="list-style-type: none"> • Econòmics • Toxicitat del Cd • Dificultat en incrementar la seva eficiència |
| CIGS | 19.2 | 13.4 | 9-11 | rígid o flexible | <ul style="list-style-type: none"> • Bones eficiències i Estables al llarg del temps |
| Arseniür de gal·li | 30 | 26 | 22 | rígid | <ul style="list-style-type: none"> • Requereix de sistemes de concentració • Cost elevat |

Taula A.1 Quadre resum de diferents tecnologies de cèl·lules fotovoltaïques, [10] i [11]



A.6. Normativa i estàndards

Pel que fa a la generació de normatives i estàndards internacionals per sistemes de Generació Distribuïda en general i pel cas de la energia fotovoltaica en particular, hi ha diferents actors entre els que cal destacar a nivell europeu l'Internacional Electrotechnical Commission (IEC). En referència a la fabricació de mòduls solar alguns dels seus estàndards són:

- IEC 60891: Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic (PV) devices (1987). (Amendment 1: 1992).
- IEC 60904-1: Photovoltaic devices - Part 1: Measurement of photovoltaic (PV) current - voltage characteristics (1987).
- IEC 60904-2: Photovoltaic devices - Part 2: Requirements for reference solar cells (1989).
- IEC 60904-3: Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data (1989).
- IEC 60904-5: Photovoltaic devices - Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method (1993).
- IEC 60904-6: Photovoltaic devices - Part 6: Requirements for reference solar modules (1994).
- IEC 60904-7: Photovoltaic devices - Part 7: Computation of spectral mismatch error introduced in the testing of a photovoltaic device (1995).
- IEC 60904-8: Photovoltaic devices - Part 8: Guidance for spectral measurement of a photovoltaic device (1995).
- IEC 60904-9: Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements (1995).



- IEC 61215: Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval (1993).
- IEC 61646: Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval (1996).
- IEC 61701: Salt mist corrosion testing of photovoltaic (PV) modules (1995).
- IEC 61721: Susceptibility of a photovoltaic (PV) module to accidental impact damage (resistance to impact test) (1995).
- IEC 61725: Analytical expression for daily solar profiles (1997).
- IEC 61829: Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) array - On site measurement of IV characteristics (1995).
- IEC 60904-10: Photovoltaic devices - Part 10: Methods of linearity measurement.
- IEC 61345: UV test on photovoltaic (PV) modules.
- IEC 61849: Design qualification and type approval of photovoltaic (PV) modules for marine environments
- IEC 61853: Power and energy rating of photovoltaic (PV) modules.

A.7. El mercat de panells fotovoltaics

Com ja s'ha vist la gran majoria del mercat està dominat pels panells fotovoltaics de silici cristal·lí. Pel que fa a fabricants, als anys 80 en la seva majoria eren de USA, Japó i Europa, però posteriorment les companyies americanes van vendre la majoria de la seva industria fotovoltaica a companyies estrangeres, de manera que actualment el mercat es troba dominat per Japó seguit d'Europa, Fig.A.31. Tot i així els EUA segueixen tenint una producció predominant pel que fa a la producció de cristall de silici, matèria prima de la majoria de panells fotovoltaics i circuits integrats. Pel que fa a les empreses es pot veure reflexat aquesta predominancia de la quota de mercat per part de les empreses japoneses en la figura Fig.A.32.



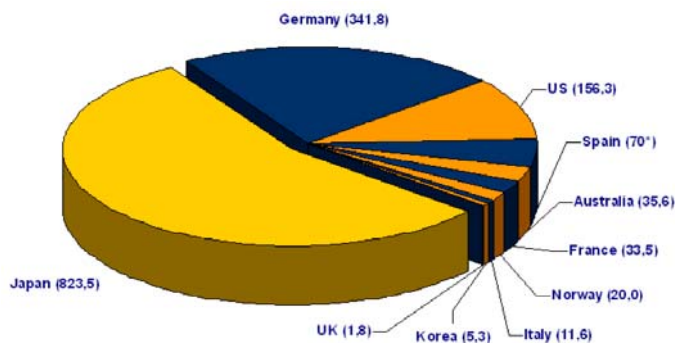


Fig.A.31 Producció de cèl·lules fotovoltaïques en MW per països, any 2005 , [12]

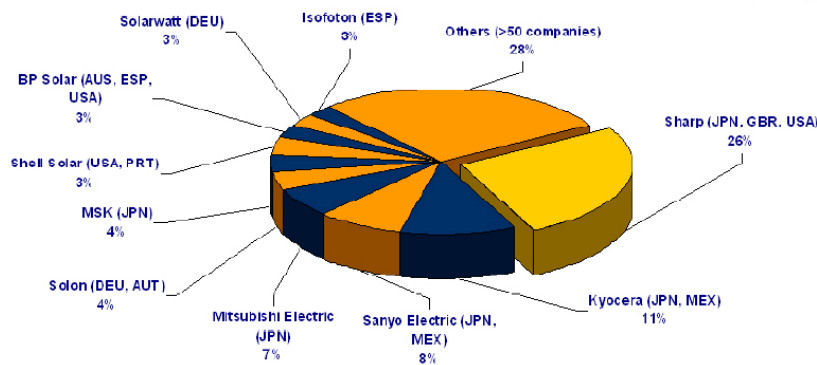


Fig.A.32 Quota de producció de mòduls FV de les companyies més importants, any 2005. [12]

A.7.1. Llistat de fabricants de panells fotovoltaics

La Taula A.2 es una petita mostra dels diferents fabricants de mòduls fotovoltaics.

| Fabricant | Pàgina web |
|-----------|---|
| BP Solar | www.bpsolar.com |
| EPV | http://www.epv.net/ |



| | |
|---------------------------|---|
| First Solar | http://www.firstsolar.com/ |
| Gällivare PhotoVoltaic AB | www.gpv-solar.com |
| Global Solar | http://www.globalsolar.com/ |
| Isofoton | http://www.isofoton.com/ |
| Kaneka | http://www.kaneka.com/ |
| Kyocera | www.kyocerasolar.com |
| MHI | http://www.mhi.co.jp/power/e_a-si/ |
| Mitsubishi Electric | http://global.mitsubishielectric.com |
| MSK | http://www.msk.ne.jp/en/ |
| Photowatt | www.photowatt.com |
| Uni-solar | http://www.uni-solar.com/ |
| Sanyo | http://www.sanyo.com/ |
| Sharp Electric | www.sharp-world.com/solar/ |
| S.M.D. | http://www.aleo-solar.de/ |
| Shell (Siemens) | www.shellsolar.com |
| Solarwatt | www.solarwatt.de |
| Solon | http://www.solonag.com/ |
| Wurth Solar | http://www.wuerth-solergy.com |

Taula A.2 Quadre resum de diferents fabricants de mòduls fotovoltaics (elaboració pròpia)



B. VALORACIÓ ECONÒMICA DE LES DIFERENTS ALTERNATIVES

En aquest annex es farà un breu i orientatiu anàlisi econòmic de les diverses alternatives proposades a l'apartat 5 *ANÀLISI D'ALTERNATIVES* de la memòria, per tal de tenir un primera visió qualitativa dels costos que comportarien l'ús d'una o altre estructura .

En aquest estudi, i tenint en compte que es un anàlisi orientatiu, es tindrà en compte el cost dels principals semiconductors donat que el preu de les bobines, transformadors i condensadors, no variarà substancialment tret que n'hi hagi més número dels mateixos en una o altre estructura. A l'hora de triar els components s'agafaran valors aproximats d'aquests i segons la disponibilitat dels mateixos, sempre amb un marge de seguretat que farà que estiguin una mica sobredimensionats. Així mateix s'intentarà agafar components de característiques similars per tal de que els resultats siguin comparables.

Atesa la potència del convertidor que es pretén construir s'ha suposat que l'estructura que s'utilitzarà als convertidors CC/CC amb transformadors d'alta freqüència serà tipus pont-complet i els interruptors IGBTs.

Per fer la comparació entre les diferents alternatives s'utilitzarà components i preus d'un distribuïdor del mercat de producte electrònics. Per la seva ampla gamma de productes s'ha escollit FARNELL, [13].

B.1. Alternativa I: Rectificador més elevador més reductor

Aquest tipus d'estructura està formada per un pont de díodes trifàsic que rectifica la tensió d'entrada, seguit d'un elevador clàssic (boost) que l'eleva a 800V i d'un reductor amb aïllament galvànic que l'adaptarà al valor desitjat seguint la corba I-V d'un panell fotovoltaic. La Taula B.1 mostra els components principals d'aquesta estructura, i el cost dels seus semiconductors.

| Components | nº | Requisits | Component | Referència | Preu |
|------------|----|------------------|------------------------------------|----------------------|--------|
| Díodes | 4 | VN=620V, IN= 15A | Pont díodes: VRRM=1200V, ID=35A | VISHAY 26MT120PBF | 1*17 € |



| | | | | | |
|----------------------------|---|---------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------|
| Condensador filtre entrada | 1 | C=2200uF, VN=600V | - | - | - |
| Bobina (elevador) | 1 | L≈2mH, IN= 10A | - | - | - |
| Díode (elevador) | 1 | VN=800V, IN= 15A | Díode: VRRM=1700V, ID=20A | No trobat a FARNELL | ? |
| IGBT (elevador) | 1 | VN=800V, IN= 15A | Dual VRRM=1700V, IC=125A | SKM100GB176D | 1*182 € |
| Condensador (elevador) | 1 | C=220uF, VN=800V | - | - | - |
| IGBTs (reductor) | 4 | VN=800V, IN= 15A | Dual IGBTs: VRRM=1700V, IC=125A | SKM100GB176D | 2*182€ |
| Transformador HF | 1 | V1=800V V2=800V S=4kVA | - | - | - |
| Díodes (reductor) | 4 | VN=900V, IN= 15A | Pont díodes: VRRM=1700V, ID=20A | No trobat a FARNELL | ? |
| Bobina (reductor) | 1 | L≈1.5mH, IN= 10A | - | - | - |
| Condensadors (reductor) | 1 | C=220uF, VN=800V | - | - | - |
| TOTAL | | | | | 563€ |

Taula B.1 Quadre resum dels diferents components que conformen l'alternativa I (elaboració pròpia)

Cal remarcar que pel cas del pont de díodes del reductor no s'ha trobat a FARNELL per aquestes especificacions ja que per tensions de més de 1200V resulta complicat trobar components, amb el conseqüent increment de cost que això suposa tant en cost del semiconductor com en terminis de lliurament.

B.2. Alternativa II: Rectificador més reductor amb relació de transformació 1:2

Aquest convertidor està format per un pont rectificador i una estructura de reductor amb transformador d'alta freqüència amb relació de transformació 1:2, de manera que es pot



arribar a tensions més elevades que els 560 V. La Taula B.2 mostra els components principals d'aquesta estructura, i el cost dels seus semiconductors.

| Components | nº | Requisits | Component | Referència | Preu |
|----------------------------|----|---------------------------|------------------------------------|------------------------|------------|
| Díodes | 4 | VN=620V, IN= 20A | Pont díodes: VRRM=1200V, ID=30A | VISHAY 26MT120PBF | 1*17 € |
| Condensador filtre entrada | 1 | C=2200uF, VN=600V | - | - | - |
| IGBT | 4 | VN=620V, IN= 20A | Dual IGBT: VRRM=1200V, IC=40A | SK40GB123 | 2*31€ |
| Transformador HF | 1 | V1=560V V2=560V S=4kVA | - | - | - |
| Díodes (reductor) | 4 | VN=900V, IN= 15A | Pont díodes: VRRM=1700V, ID=20A | No trobat a FARNELL | ? |
| Bobina (reductor) | 1 | L≈1.5mH, IN= 10A | - | - | - |
| Condensadors (reductor) | 1 | C=220uF, VN=800V | - | - | - |
| TOTAL | | | | | 79€ |

Taula B.2 Quadre resum dels diferents components que conformen l'alternativa II (elaboració pròpia)

Com en el cas anterior no s'han trobat díodes pel pont rectificador del reductor a FARNELL.

B.3. Alternativa III: Rectificador més reductor amb transformador de doble sortida

Aquesta estructura consta d'un rectificador i un reductor amb un transformador de doble sortida 1:1:1 amb les sortides connectades en sèrie per aconseguir major tensió. La Taula B.3 mostra els components principals d'aquesta estructura, i el cost dels seus semiconductors.



| Components | nº | Requisits | Component | Referència | Preu |
|----------------------------|----|--|------------------------------------|----------------------|-------------|
| Díodes | 4 | VN=620V, IN= 10A | Pont díodes: VRRM=1200V, ID=30A | VISHAY 26MT120PBF | 1*17 € |
| Condensador filtre entrada | 1 | C=2200uF, VN=600V | - | - | - |
| IGBT | 4 | VN=620V, IN= 20A | Dual IGBT: VRRM=1200V, IC=40A | SK40GB123 | 2*31€ |
| Transformador HF | 1 | V1=560V V2=V3=560V S=4kVA, amb doble debanat a la sortida | - | - | - |
| Díodes (reductor) | 8 | VN=560V, IN= 15A | díodes: VRRM=1200V, ID=20A | IXYS DSEP30-12AR | 8*4 |
| Bobina (reductor) | 2 | L≈1.5mH, IN= 20A | - | - | - |
| Condensadors (reductor) | 2 | C=220uF, VN=400V | - | - | - |
| TOTAL | | | | | 111€ |

Taula B.3 Quadre resum dels diferents components que conformen l'alternativa III
(elaboració pròpia)

En aquesta estructura, en comparació amb les estructures anteriors, hem de tenir en compte que es doblaran els components del secundari del transformador: díodes, bobina i condensador.

B.4. Alternativa IV: Rectificador més dos reductors entrada paral·lel sortida sèrie

En aquest tipus d'estructura es connecten paral·lel dos convertidors CC/CC reductors amb transformador 1:1 d'alta freqüència, i en sèrie a la sortida del pont rectificador, la Taula B.4 mostra els components principals d'aquesta estructura, i el cost dels seus semiconductors.

| Components | nº | Requisits | Component | Referència | Preu |
|------------|----|-----------|-----------|------------|------|
|------------|----|-----------|-----------|------------|------|



| | | | | | |
|----------------------------|---|----------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------|
| Díodes | 4 | VN=620V, IN= 10A | Pont díodes: VRRM=1200V, ID=30A | VISHAY 26MT120PBF | 1*17 € |
| Condensador filtre entrada | 1 | C=2200uF, VN=600V | - | - | - |
| IGBT | 8 | VN=620V, IN= 20A | Dual IGBT: VRRM=1200V, IC=40A | SK40GB123 | 4*31€ |
| Transformador HF | 2 | V1=560V V2=560V S=2kVA, | - | - | - |
| Díodes (reductor) | 8 | VN=560V, IN= 15A | díodes: VRRM=1200V, ID=20A | IXYS DSEP30-12AR | 8*4 |
| Bobina (reductor) | 2 | L≈1.5mH, IN= 20A | - | - | - |
| Condensadors (reductor) | 2 | C=220uF, VN=400V | - | - | - |
| TOTAL | | | | | 173€ |

Taula B.4 Quadre resum dels diferents components que conformen l'alternativa IV (elaboració pròpia)

En aquesta estructura, apart de doblar bobines, condensadors i díodes com en el cas anterior, tenim un transformador més de la meitat de potència i 4 IGBTs més, apart dels drivers que els hauran de disparar.

B.5. Alternativa V: Rectificador més reductor buck més tres reductors entrada paral·lel sortida sèrie

En aquest el convertidor està format per un rectificador, un reductor buck i tres reductors amb transformadors HF 1:1, la Taula B.5 mostra els components principals d'aquesta estructura, i el cost dels seus semiconductors.

| Components | nº | Requisits | Component | Referència | Preu |
|------------|----|------------------|------------------------------------|----------------------|--------|
| Díodes | 4 | VN=620V, IN= 10A | Pont díodes: VRRM=1200V, ID=30A | VISHAY 26MT120PBF | 1*17 € |



| | | | | | |
|----------------------------|----|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------|
| Condensador filtre entrada | 1 | C=2200uF, VN=600V | - | - | - |
| Bobina (reductor) | 1 | L≈2mH, IN= 10A | - | - | - |
| Díode (reductor) | 1 | VN=600V, IN= 15A | VRRM=1200V, ID=20A | IXYS DSEP30-12AR | 1*4 € |
| IGBT (reductor) | 1 | VN=600V, IN= 15A | VRRM=1200V, IC=32A | INFINEON 20ETF12PBF | 1*11 € |
| Condensador (reductor) | 1 | C=220uF, VN=600V | - | - | - |
| IGBT | 12 | VN=300V, IN= 20A | Dual IGBT: VRRM=600V, IC=20A | FAIRCHILD FGP20N6S2D | 12*3 € |
| Transformador HF | 3 | V1=300V V2=300V S=1.7 kVA, | - | - | - |
| Díodes (reductor) | 12 | VN=300V, IN= 15A | VRRM=600V, ID=20A | VISHAY 20ETF06PBF | 12*4 € |
| Bobina (reductor) | 3 | L≈1.5mH, IN= 20A | - | - | - |
| Condensadors (reductor) | 3 | C=220uF, VN=300V | - | - | - |
| TOTAL | | | | | 116 € |

Taula B.5 Quadre resum dels diferents components que conformen l'alternativa V (elaboració pròpia)

En aquesta estructura respecte les primeres s'ha triplicat el número de bobines, condensadors, díodes i transistors, així com de transformadors, tot i que aquests són de menor potència i tensió, i per tant de menor cost unitari. Com en el cas anterior s'ha de tenir en compte que al triplicar el numero d'interruptors també s'han de triplicar els drivers que els controlen, fet que farà encarir encara més el cost del convertidor.

B.6. Alternativa VI: Rectificador més elevador més dos reductors entrada paral·lel sortida sèrie

Aquest tipus d'estructura està formada per un pont de díodes trifàsic que rectifica la tensió d'entrada, seguit d'un elevador clàssic (boost) i de dos reductors amb aïllament galvànic. La



Taula B.6 mostra els components principals d'aquesta estructura, i el cost dels seus semiconductors.

| Components | nº | Requisits | Component | Referència | Preu |
|----------------------------|----|---------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------|
| Díodes | 4 | VN=620V, IN= 15A | Pont díodes: VRRM=1200V, ID=35A | VISHAY 26MT120PBF | 1*17 € |
| Condensador filtre entrada | 1 | C=2200uF, VN=600V | - | - | - |
| Bobina (elevador) | 1 | L≈2mH, IN= 10A | - | - | - |
| Díode (elevador) | 1 | VN=600V, IN= 15A | VRRM=1200V, ID=20A | IXYS DSEP30-12AR | 1*4 € |
| IGBT (elevador) | 1 | VN=600V, IN= 15A | VRRM=1200V, IC=32A | INFINEON 20ETF12PBF | 1*11 € |
| Condensador (elevador) | 1 | C=220uF, VN=800V | - | - | - |
| IGBTs (reductor) | 8 | VN=600V, IN= 15A | VRRM=1200V, IC=32A | INFINEON 20ETF12PBF | 8*11 € |
| Transformador HF | 2 | V1=600V V2=600V S=2kVA | - | - | - |
| Díodes (reductor) | 8 | VN=600V, IN= 15A | VRRM=1200V, ID=20A | IXYS DSEP30-12AR | 8*4 € |
| Bobina (reductor) | 2 | L≈1.5mH, IN= 10A | - | - | - |
| Condensadors (reductor) | 2 | C=220uF, VN=400V | - | - | - |
| TOTAL | | | | | 152 € |

Taula B.6 Quadre resum dels diferents components que conformen l'alternativa VI (elaboració pròpia)

En aquesta estructura, apart de doblar bobines, condensadors, díodes, transformadors i drivers que els controlen, tenim que hi ha una bobina, IGBT, díode i condensador més per l'elevador.



B.7. Comparació d'alternatives

En una primera visió de les diferents alternatives proposades i tenint en compte els components i la disponibilitat dels mateixos al mercat, les dues primeres alternatives, I i II quedarien descartades, degut a les grans tensions que haurien de suportar alguns dels seus components.

En un segon anàlisi de les restants alternatives, l'alternativa III és una bona opció tot i que com s'insisteix a l'apartat 5 *ANÀLISI D'ALTERNATIVES* de la Memòria serà menys precisa i no permetrà realitzar tècniques d'interleaving.

A l'alternativa IV, respecte a la III, hi ha un increment del número d'interruptors al secundari fet que suposa un increment del cost no molt substancial si només tenim en compte aquests, però també s'ha de tenir en compte que caldran drivers que els controlin i que faran encarir el preu.

De la mateixa manera que la IV, l'alternativa V tot i tenir un cost menor pel que fa a díodes i interruptors degut a que requereixen suportar tensions menors, requerirà d'un augment del número de drivers que els controlen, a més del número de bobines, transformadors i condensadors; fet que fa que econòmicament sigui més cara que la III i la IV.

Respecte a l'alternativa VI, com en el cas de la IV, tot i donar una solució tècnicament millor que la III, el cost que suposa en drivers, interruptors, bobines i altres components, faria que s'encareixi molt el cost total del convertidor.



C. EL DSP

En aquest annex es farà una breu introducció a les característiques generals dels DSP i posteriorment es mostraran les característiques principals del DSP TMS320F2808PZA.

C.1. Introducció als DSP

DSP és l'acrònim de Digital Signal Processor, són processadors dissenyats específicament per fer càlculs en temps real de tractament digital de la senyal, des de implementació de filtres digitals, transformades de Fourier, tractament de imatge i so, etc... Els DSPs tenen aproximadament el mateix nivell d'integració i la mateixa freqüència de rellotge que un microprocessador genèric, fins i tot moltes vegades els microprocessadors avantatgen els DSPs, però els DSP efectuen les tasques de tractament digital de senyal dues o tres vegades més ràpid, ja que la seva arquitectura està optimitzada per a realitzar aquest tipus de tasques.

C.1.1. Unitat aritmètica (CPU)

L'operació més comú en el processat digital de senyals és el càlcul d'una suma de productes ($S = \sum a_i \cdot b_i$). L'operació aritmètica més complexa en la tècnica digital és precisament la multiplicació. Els microprocessadors genèrics no incorporen un element tant complex com un multiplicador ja que en les aplicacions usuals aquesta operació representa un tant per cent molt baix sobre el total d'operacions. Però en el tractament digital del senyal la multiplicació és una tasca fonamental, i el multiplicador és un element bàsic d'un DSP capaç de realitzar aquesta operació en un cicle. Per incrementar encara més la velocitat el processador incorpora diferents unitats aritmètiques de manera que puguin realitzar diferents operacions simultàniament: els DSPs típics tenen un multiplicador i un acumulador que permeten multiplicar i sumar en un sol cicle, a més de registres de desplaçament per preparar les dades sense penalitzar en el temps. Cal destacar que de la mateixa manera que una multiplicació es realitza en un cicle una divisió pot implicar més de 100 cicles. És per aquesta raó que sempre que es pugui en un DSP serà preferible multiplicar per una inversa que dividir el nombre en qüestió.



C.1.2. Joc d'instruccions

Freqüències de mostreig fixes requereixen tenir un cicle d'instrucció regular. En microprocessadors RISC (joc d'instruccions reduït) aquesta regularitat s'aconsegueix restringint les instruccions; en els DSP s'aconsegueix incrementant la velocitat del hardware en aquelles instruccions complexes bàsiques com les multiplicacions.

C.1.3. Arquitectura

Oposada a l'arquitectura de Von Neumann utilitzada per molts microprocessadors, tots els DSP es basen en una arquitectura de Harvard amb busos de programa i dades independents. I alguns DSP encara han millorat aquesta estructura amb tres busos: un de programa i dos de dades, que permet llegir la instrucció i dos operands simultàniament.

C.1.4. Adreçament

Moltes vegades la lògica de generació d'adreces és més lenta que la realització de la operació aritmètica en sí. Com a regla general, els DSP tenen una unitat aritmètica especial per generar adreces gràcies a la qual aquest fet no suposa un temps addicional.

C.1.5. Memòria

els programes de DSP, gràcies a instruccions especialitzades i l'arquitectura del mateix, acostumen a tenir una estructura senzilla i són, per tant, molt curts comparats amb un mateix programa per a un microprocessador genèric. Això permetrà guardar-los en una memòria no volàtil integrada en el mateix xip, a més de decrementar el temps de transferència del programa. També integren a més memòria RAM per les dades usades durant el programa.

Totes aquestes diferències tant de hardware com de software estan pensades per optimitzar al màxim el tractament de senyals, però també és aplicable per al control on hi ha una sèrie de necessitats comuns, com són el d'una freqüència de mostreig fixa, càlculs en temps real per respondre ràpidament a variacions del sistema a controlar, així com el filtrat, que enlloc de fer-lo analògicament, com és usual actualment, es pot fer digitalment sense perjudicar la



rutina principal de control. També les multiplicacions són una operació normal en els programes de control: coeficients de realimentació, càlcul de PID, etcètera.

C.2. DSP TMS320F2808PZA

El DSP emprat forma part de la família de processadors digital de senyal de Texas Instruments, [14]. La gamma de DSP que ofereix es divideix en tres plataformes: C6000, C5000 i C2000. Les dues primeres plataformes estan orientades al món del tractament digital d'imatges i àudio, aplicacions de telefonia i comunicacions mentre que la plataforma està dissenyada per ser utilitzada en aplicacions de control de motors. Això fa que les diferències entre els DSP de diferents plataformes sigui molt notable, tant a nivell d'arquitectura interna, cal recordar que és un DSP de coma fixa, com a nivell perifèric que incorpora, com a sortides PWM, conversors analògics - digital d'altres prestacions, mòduls CAN, port sèrie síncron i asíncron, i una gran quantitat d'interrupcions associades a aquests perifèrics.

El TMS320F2808PZA pertany a la família TMS320F28XX, Fig.C.1, que treballen amb coma fixa. Aquests DSP estan dissenyats per aplicacions industrials de gamma alta: control d'accionaments de velocitat variables, sistemes d'alimentació ininterrompuda, automatització industrial, etcètera.

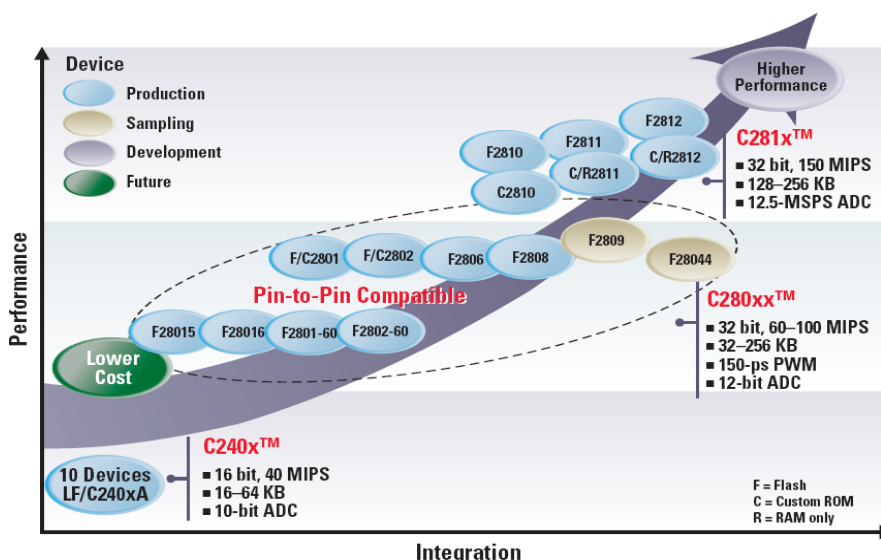


Fig.C.1 Família TMS320F28XX, [15].



Dins d'aquesta família, el 2808 és de gamma mitja, però és més que suficient per l'aplicació d'aquest projecte. Aquesta senzillesa té l'avantatge de tenir poques potes i, per tant, facilita el disseny de la placa de control.

C.2.1. Característiques principals

Les característiques principals del DSP TMS320F2808PZA són les que es mostren a la Taula C.1.

| FEATURE | | F2809 | F2808 |
|--|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Instruction cycle (at 100 MHz) | | 10 ns | 10 ns |
| Single-access RAM (SARAM) (16-bit word) | | 18K (L0, L1, M0, M1, H0) | 18K (L0, L1, M0, M1, H0) |
| 3.3-V on-chip flash (16-bit word) | | 128K | 64K |
| On-chip ROM (16-bit word) | | – | – |
| Code security for on-chip flash/SARAM/OTP blocks | | Yes | Yes |
| Boot ROM (4K X16) | | Yes | Yes |
| One-time programmable (OTP) ROM (16-bit word) | | 1K | 1K |
| PWM outputs | | ePWM1/2/3/4/5/6 | ePWM1/2/3/4/5/6 |
| HRPWM channels | | ePWM1A/2A/3A/4A/5A/6A | ePWM1A/2A/3A/4A |
| 32-bit CAPTURE inputs or auxiliary PWM outputs | | eCAP1/2/3/4 | eCAP1/2/3/4 |
| 32-bit QEP channels (four inputs/channel) | | eQEP1/2 | eQEP1/2 |
| Watchdog timer | | Yes | Yes |
| 12-Bit, 16-channel ADC conversion time | | 80 ns | 160 ns |
| 32-Bit CPU timers | | 3 | 3 |
| Serial Peripheral Interface (SPI) | | SPI-A/B/C/D | SPI-A/B/C/D |
| Serial Communications Interface (SCI) | | SCI-A/B | SCI-A/B |
| Enhanced Controller Area Network (eCAN) | | eCAN-A/B | eCAN-A/B |
| Inter-Integrated Circuit (I ² C) | | I ² C-A | I ² C-A |
| Digital I/O pins (shared) | | 35 | 35 |
| External interrupts | | 3 | 3 |
| Supply voltage | 1.8-V Core, 3.3-V I/O | Yes | Yes |
| Packaging | 100-Pin PZ | Yes | Yes |
| | 100-Ball GGM, ZGM | Yes | Yes |
| Temperature options ⁽¹⁾ | A: -40°C to 85°C | (PZ, GGM, ZGM) | (PZ, GGM, ZGM) |
| | S: -40°C to 125°C | (PZ, GGM, ZGM) | (PZ, GGM, ZGM) |
| | Q: -40°C to 125°C | (PZ) | (PZ) |
| Product status ⁽²⁾ | | TMX | TMS |

Taula C.1 característiques principals del DSP TMS320F2808PZA, [16].



C.2.2. Arquitectura

L'arquitectura del DSP es basa en una arquitectura de Harvard on el bus de programa i el de dades són diferents. Això permetrà fer accessos simultanis a memòria i a programa i el en un mateix cicle. A més a més, hi ha un tercer espai de memòria d'entrades/sortides accessibles a través del bus extern. Els perifèrics també tenen el seu propi bus, tot i que aquest està mapejat en unes posicions concretes de la memòria: qualsevol accés a aquestes posicions accedirà directament al perifèric associat.

C.2.3. La memòria

Aquest DSP disposa de dos tipus de memòria:

1. La Flash EEPROM que és una memòria no volàtil que ofereix la possibilitat de poder-la gravar tants cops com calgui en la tarjeta final. A més, els algorismes de programació els executa la pròpia CPU del DSP evitant així la necessitat d'una màquina d'estat dedicada.

El TMS320F2808PZA incorpora 64 K paraules de 16 bits de memòria de programa.

2. SARAM, la Single-Access RAM, que és una memòria RAM que només s'hi pot accedir un cop per cicle (o lectura o escriptura), i és de 18 K amb paraules de 16 bits.

C.2.4. La CPU

La unitat central de procés té tres grans components:

1. *La unitat aritmètico-lògica central de 32 bits*: agafa dues paraules de la memòria i els hi pot fer opeacions aritmètiques i booleanes. El resultat s'aboca en l'acumulador de 32 bits des del qual es pot guardar la part alta i la baixa per separat, en memòria. Disposa a més de registres de xifrat de les dades tant de l'entrada com a la sortida.



2. *Multiplicador*: permet realitzar productes de 16x16 bits en complement a dos obtenint-se un resultat de 32 bits. Aquest multiplicador és capaç de fer el producte en un cicle i serà molt útil per fer els càlculs del control així com filtres digitals, correlacions, etcètera.
3. *Unitat aritmètica de registres auxiliars*: aquesta unitat genera adreces de la memòria de dades quan s'utilitza adreçatge indirecte per accedir a aquesta. Està formada per 8 registres auxiliars que es poden carregar amb valors de 32 bits directament amb una instrucció.

El DSP treballa amb una quàdruple pipeline que és gestionada per la lògica de control del programa que també descodifica les instruccions i guarda els estats de les operacions. D'altra banda hi ha instruccions de l'ensamblador que permetran controlar per software el flux del programa com són instruccions de salt, condicionals o no, resets, i interrupcions.

C.2.5. Perifèrics

El TMS320F2808PZA incorpora els següents perifèrics:

- Event Manager: genera els timers i els PWM
- Conversor A/D de 12 bits i 160ns de temps de conversió
- Port síncron sèrie SPI
- Port asíncron sèrie SCI (UART)
- Pins d'entrada/sortida
- Interface amb bus CAN
- Watch dog timer

De tots aquests perifèrics els que s'usaran en l'aplicació són l'Event Manager amb el que es controlarà el cicle d'execució del control, i generarà també les sortides que faran obrir i tancar els interruptors de potència amb un temps mort programable per software. El conversor analògic digital serà el que proporcionarà la realimentació de les variables necessàries per al control; de la seva rapidesa, així com de la optimització del codi del control dependrà la màxima freqüència a la que es podrà arribar. S'utilitzaran també algunes entrades i sortides



digitals per tal de rebre la senyal d'error de l'ondulador en cas de curtcircuit en alguna de les seves branques. Finalment es farà servir també el port SPI per enviar dades a un convertidor D/A extern degut a la manca d'aquest perifèric en el DSP, això és degut a que aquest perifèric només es sol usar durant el desenvolupament i la depuració de software, ja que permet visualitzar els valors de les variables internes del programa en temps real.





D. VALORACIÓ ECONÒMICA DEL PROTOTIP CONSTRUÏT

En aquest apartat es farà la valoració econòmica total del cost que ha suposat el convertidor construït. S'ha dividit en dos apartats principals, el cost del prototip i el cost d'investigació i desenvolupament.

D.1. Cost del prototip

En aquest apartat es considerarà el cost total de la construcció del prototip, incloent-hi també el cost de mà d'obra. Per contra, no es tindrà en compte el cost de disseny i desenvolupament, es farà referència a aquest cost més endavant.

D.1.1. Convertidor Comercial

Pel que fa al cost del convertidor, el cost inclou solament el cost d'adquisició i muntatge dels components principals. S'inclourà dins del preu qualsevol component integrat dins del convertidor, tant de la part de potència com la part de control excepte la placa de control i les plaques d'adaptació de les senyals. El convertidor compta amb un rectificador, el bus de contínua, l'integrat amb els drivers i els IGBTs, les sondes de corrent, etcètera; definits a l'apartat 7. *CONSTRUCCIÓ DEL CONVERTIDOR* de la *Memòria* i comptabilitzats a la Taula D.1.

| Component | Quantitat | Referència | Cost (€) |
|--------------------|-----------------|----------------------------|----------|
| Pont de Díodes | 1 | SEMIKRON SKD30/12A | 60,35 |
| Condensador de bus | 2 | NICHICON LNR2G392ASMGMG | 2×82,09 |
| IGBTs | 2 (mòduls de 2) | SEMIKRON KM75GB123D | 2×176,02 |
| Transformador | 2 | NUCTOR | 2×48,56 |
| Díodes secundari | 8 | IXYS DSEI30-12A | 8×4 |
| Bobina sortida | 2 | NUCTOR | 2×31,2 |



| | | | |
|---------------------|-----|--|------------------|
| Condensador sortida | 2 | UNITED CHEMI-CON EKMH401VNN471MA45T | 2×6,46 |
| Sondes de corrent | 2 | LEM LA55-P | 2×23,05 |
| Sondes de tensió | 2 | LEM LV25-P | 2×49,73 |
| Drivers | 2 | SEMIKRON SKHI24 | 2×62,92 |
| Radiadors | 4 | 250×200×25mm 0,43 °C/W | 4×20,95 |
| Snubber | 2 | 33Ω i 3,3nF | 2×4 |
| Muntatge | 25h | | 25×24 |
| TOTAL | | | 1744,21 € |

Taula D.1 Cost dels principals components del convertidor construït (elaboració pròpia)

D.1.2. Placa de control

La placa de control es comptabilitza com una sola placa. Ja es tindran en compte tots els components necessaris pel funcionament de la placa, Taula D.2.

| Descripció | Quantitat | Cost unitari | Cost (€) |
|------------------------|-----------|--------------|--------------|
| Components electrònics | | | 130 € |
| Plaques (insolar) | 1 | 35 € | 35 € |
| Mà d'obra de muntatge | 10 hores | 24 € | 240 € |
| TOTAL | | | 405 € |

Taula D.2 Cost de la placa de control (elaboració pròpia)



D.1.3. Plaques auxiliars i d'adaptació dels senyals

En aquest apartat es comptabilitzen les adaptacions dels diferents senyals per poder ser utilitzades en el DSP: plaques dels drivers, plaques dels transductors i de l'integrat *SN74AHCT244DW*; reflexades a la Taula D.3

| Descripció | Quantitat | Cost unitari | Cost (€) |
|--|-----------|--------------|--------------|
| Components electrònics, connectors i plaques | | | 15 € |
| Placa i muntatge | 5 hores | 24 € | 24 € |
| TOTAL | | | 135 € |

Taula D.3 Cost de la les plaques auxiliars i d'adaptació (elaboració pròpia)

D.1.4. Cost total del prototip

A la Taula D.4 es mostra el cost total del prototip construït.

| Descripció | Cost (€) |
|---|------------------|
| Convertidor Comercial | 1744,21 |
| Placa de control | 405 € |
| Placa auxiliar i d'adaptació dels senyals | 135 € |
| TOTAL | 2284,21 € |

Taula D.4 Cost total del prototip (elaboració pròpia)

D.2. Cost d'investigació i desenvolupament

Als costos de construcció del prototip s'han d'afegir els costos del temps dedicat a la investigació, al disseny i a la programació del control. També s'han de tenir en compte els costos associats a les eines necessàries per portar a terme aquestes tasques, com seria



l'ordinador o el software de programació. Als costos d'aquestes eines es contempla una amortització contant una vida útil de 3 anys i una durada del projecte de 9 mesos.

D.2.1. Costos de suport informàtic

Els costos del suport informàtic utilitzat durant el transcurs de l'estudi es mostren a la Taula D.5.

| Descripció | Preu uni. (€) | Preu amortitzat (€) |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|
| Ordinador | 1200 | 300 |
| Matlab | 1800 | 450 |
| PSim | 1000 | 250 |
| Emulador JTAG (6 anys d'amortització) | 2000 | 333 |
| Code Composer Studio | 2000 | 667 |
| TOTAL | | 2000 € |

Taula D.5 Costos del suport informàtic (elaboració pròpia)

D.2.2. Costos de personal

A aquests subtotals se'ls ha d'afegir el cost d'investigació i desenvolupament que ha representat el projecte, tot i que és molt difícil fer una estimació de les hores dedicades a la realització del projecte, així com a la divisió entre ells. Cal tenir en compte que el preu hora del cost de personal, és el preu de cobrament d'un enginyer júnior. Aquest costos venen explicitats a la Taula D.6.

| Hores | Descripció | Preu hora (€) | Cost total (€) |
|-------|--------------|---------------|----------------|
| 210 | Disseny | 48 | 10080 |
| 240 | Investigació | 48 | 11520 |



| | | | |
|--------------|-------------|----|----------------|
| 170 | Programació | 30 | 5100 |
| 110 | Redacció | 20 | 2200 |
| TOTAL | | | 28900 € |

Taula D.6 Costos de personal (elaboració pròpia)

D.2.3. Costos totals de desenvolupament i disseny

A la Taula D.7 es mostren els costos totals de desenvolupament i disseny del prototip.

| Descripció | Cost total(€) |
|-------------------------------------|---------------|
| Costos suport informàtic | 2000 |
| Cost investigació i desenvolupament | 28900 |
| Total | 30900 |

Taula D.7 Costos totals de desenvolupament i disseny (elaboració pròpia)

D.3. Cost total del projecte

El pressupost total del projecte realitzat, sumant les diferents partides concretades en els punts anteriors, els imprevistos i l'IVA es mostren a la Taula D.8.

| Descripció | Cost total (€) |
|---------------------------------------|----------------|
| Cost prototip | 2284 € |
| Costos investigació i desenvolupament | 30900 € |
| SUBTOTAL | 33184 € |

| | |
|------------------|-------|
| Imprevistos (3%) | 500 € |
|------------------|-------|



| | |
|---------------------------|----------------|
| TOTAL | 33684 € |
| IVA (16%) | 5389 € |
| TOTAL (IVA inclòs) | 39073 € |

Taula D.8 Costos totals del projecte (elaboració pròpia)

El cost total de la realització del projecte és de 39.073 €, la major part del qual és degut als costos d'investigació i desenvolupament.

L'amortització de l'investigació i el desenvolupament d'aquest projecte s'amortitza al 100% en aquest prototipus, ja que només se n'ha fabricat un. Si es fabriquessin més unitats aquests costos s'haurien de repartir entre totes les unitats fabricades.

Per altra banda s'ha de tenir en compte que aquest preu és el corresponent pel desenvolupament d'un prototipus, i no d'un producte final comercialitzable en el mercat general, encara que sigui possible la seva venda en ocasions concretes.



E. ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL

En aquest annex es farà un breu anàlisi dels possibles impactes i consideracions mediambientals que s'han de tenir en compte en aquest estudi, recalcant que el convertidor és un prototip.

E.1. Introducció

L'avaluació de l'impacte ambiental és un instrument de caràcter preventiu per a la protecció del medi ambient que permet conèixer la incidència d'un projecte sobre l'entorn i adoptar mesures per evitar o corregir els impactes que podrien ocasionar la seva execució i funcionament. La seva aplicació, basada en el principi de que és millor prevenir les perturbacions en origen que combatre després els seus efectes, està recomanada per diverses organitzacions internacionals, com les Nacions Unides, l'Organització Mundial de la Salut, l'Organització per a la Cooperació i el Desenvolupament Econòmic (OCDE) i la Comunitat Econòmica Europea. La Comunitat Econòmica Europea va aprovar l'any 1985 la Directiva d'Avaluació d'Impacte Ambiental (85/377/CEE).

En l'estudi que ens ocupa, degut a la naturalesa del projecte, no es rellevant fer una d'avaluació d'impacte ambiental. Aquest estudi planteja la construcció d'un prototip sense pensar encara en una posterior comercialització del producte. En el moment que sorgeixi el plantejament de produir-se la comercialització serà quan s'hagi de fer un estudi detallat dels possibles impactes produïts durant la seva fabricació.

Tot i així, si es fa un petit estudi d'impacte ambiental en l'entorn durant el seu temps de disseny, implementació i muntatge juntament amb les seves hores de desenvolupament d'aquest prototipus, es pot tenir en compte diferents punts claus del procés:

- Materials utilitzats
- Energia requerida
- Reciclatge



E.2. Materials utilitzats

Dins de la llei d'impacte ambiental d'àmbit europeu es contempla una directiva que afecta als materials utilitzats en aparells electrònics. La directiva és la "2002/95/EC" de Restricció d'Ús de determinades Substàncies Perilloses (RUSP), [17]. Rohs (restricció de l'ús de determinades substàncies perilloses en aparells electrònics i elèctrics) és una directiva de la Unió Europea que restringeix l'ús de 6 materials perillosos en la fabricació de diversos tipus d'equips electrònics i elèctrics. Aquesta directiva entra en vigor el dia 1 de juliol del 2006 a través del R.D 208/2005, [18]. Es prohibeix superar uns límits de concentració màxims (nivells de concentració article 1 de la directiva) de dites substàncies. Aquestes substàncies són: plom (Pb), Mercuri (Hg), Cadmi (Cd), Crom hexavalent (Cr(VI)) i un tipus de materials ignífugs que s'usen en certs plàstics com el PBB i el PBDE.

Cal tenir en compte que tots els components electrònics que s'ha utilitzat per implementar les plaques d'aquest projecte (placa de control i plaques auxiliars) compleixen la normativa Rohs.

E.3. Energia requerida

Es pot desglossar el consum de l'energia que s'ha necessitat per a la realització del projecte en dos grups:

- Desenvolupament i programació
- Funcionament del sistema

E.3.1. Desenvolupament i programació

Pel desenvolupament del projecte s'ha utilitzat energia de tipus elèctrica, aquesta és consumida de la xarxa, per tant, es pot tenir en compte l'impacte produït per la generació d'aquesta energia, tot i que per les característiques del convertidor, no està pensat per funcionar tot el dia sinó per fer assaigs puntuals a convertidors en un banc de proves, per tant el consum no serà molt elevat.



E.3.2. Funcionament del sistema

Per altra banda cal tenir en compte l'energia que consumeix el sistema. Les pertorbacions de la xarxa poden provocar problemes al convertidor, però ell mateix és una font de pertorbacions.

El consum del convertidor, tal com s'ha insistit al capítol 6. *CALCUL I DISSENY DEL CONVERTIDOR* de la *Memòria*, produeix harmònics a la xarxa que distorsionen altres equips que es puguin tenir connectats al voltant. Per tant, en cas de comercialitzar el convertidor, s'hauran de tenir en compte proteccions a aquest tipus de pertorbacions. Ja que un convertidor ens podria provocar distorsions en qualsevol altre tipus d'aparells que estiguin relativament a prop d'aquest, provocant errades en adquisició de dades i introducció de sorolls en el sistema.

E.4. Reciclatge

Existeix una altra directiva europea que s'encarrega de la recuperació d'equips electrònics i elèctrics, és la *2002/96/EC de Residus d'Aparells Electrònics i Elèctrics (RAEE)*, [19]. Aquesta té com a objectiu reduir la quantitat d'aquests residus i la perillositat dels components, fomentar la reutilització dels aparells i la valorització dels seus residus i determinar una gestió adequada intentant millorar l'eficàcia de la protecció ambiental. Per aconseguir aquests objectius s'estableixen una sèrie de normes aplicables a la fabricació del producte i altres relatives a una correcta gestió ambiental quan esdevingui residu. Aquesta directiva ha entrat en vigor el 13 d'agost del 2005 a través del mateix *R.D 208/2005*, [18]. Per altra banda, cal remarcar que per tal fi es necessita el compromís de que els fabricants de components i convertidors tinguin una política de reciclatge dels seus productes.





F. DOCUMENTACIÓ DIGITAL

En aquest annex s'ha inclòs un cd amb documentació digital utilitzada al llarg del projecte.

El contingut principal d'aquest són els Data Sheets dels components del convertidor, així com els manuals, articles i Data Sheets utilitzats pel seu disseny. També s'han inclòs els manuals emprats per la implementació del DSP i el llistat de codi de programa implementats en format "*.txt". I també s'ha inclòs el Data Sheet del panell fotovoltaic que s'ha emulat durant els assaigs. Finalment s'hi ha disposat d'una còpia d'aquest annex i de la memòria del projecte.





Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] MUKUND , R. PATEL. *Wind and Solar Power Systems*. New York, EU: CRC Press, 1999, p. 32-49.
- [2] WIKIPEDIA, LA ENCICLOPEDIA LIBRE. Versió en espanyol.

[<http://es.wikipedia.org/wiki/Portada>, 20 d'abril de 2007]
- [3] DE JUANA, J. *Energías Renovables para el desarrollo*. Madrid, Spain: Paraninfo, 2003, p 95-144.
- [4] CASTAÑER, LL. *Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice*. London, UK: John Wiley & Sons, 2002, p. 41-75.
- [5] MARKVART, T., CASTAÑER, L. *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications* . Oxford, UK: Elsevier Science Ltd, 2003, p.75.
- [6] PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGY RESERCH ADVISORY COUNCIL (PV-TRAC). *A vision for Photovoltaic Technology*. Brussels: European Comission, 2005, p. 20.
- [7] LUQUE, A., HEGUEDUS, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. London: John Wiley & Sons, 2004, p.35
- [8] BALENZATEGUI, J.L. *Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la ESFV*. Madrid, Espanya: Ciemat, 2000.
- [9] RAJEEWA, R. *Technology and market challenges to mainstream thin-film photovoltaic modules and applications*. Williammsburg , USA: Conference papers, 2004, p.1.
- [10] EUROPEAN PARLIAMENT. *Working paper: New developments in the field of photovoltaic cells*. Brussels, Belgium: Energy and Research Series:ENER - 109 EN, 1999. p.9.



- [11] GREEN, M., EMERY, K. *Short communication: Solar cell efficiency tables (version 29)*. London, UK: John Wiley & Sons, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, agost 2006, p.455-461.
- [12] IEA-PVPS *Task 1. International statistics. Production*. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.

[<http://www.iea-pvps.org/isr/index.htm>, 20 d'abril de 2007]
- [13] FARNELL. *Farnell In One*. Espanya (distribuïdor de material elèctric, de manteniment, reparació i operació).

[<http://es.farnell.com>, 20 d'abril de 2007]
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. *Texas Instruments*. (Multinacional fabricant de microprocessadors i altres circuits integrats).

[<http://www.ti.com/>, 20 d'abril de 2007].
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. *DSP Selection Guide*. Houston, USA: Texas Instruments Incorporated, 2007, p.39.
- [16] TEXAS INSTRUMENTS. *TMS320F2809, TMS320F2808, TMS320F2806, TMS320F2802, TMS320F2801, UCD9501, TMS320C2802, TMS320C2801, and TMS320F2801x DSPs Data Manual*. Houston, USA: Texas Instruments Incorporated, 2006, p.13.
- [17] EUROPEAN PARLIAMENT. *Directive 2002/95/EC of The European Parliament and of the Council on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment*. Brussels, Belgium: European Parliament and Council, 27 January 2003.

[http://europa.eu.int/eur-lex/pri/en/oj/dat/2003/l_037/l_03720030213en00190023.pdf, 20 d'abril de 2007].
- [18] MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA. *REAL DECRETO 208/2005, de 25 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos*. Madrid, Espanya: Ministerio de la presidencia, 26 de Febrer de 2005, BOE n. 49.



[http://www.boe.es/g/es/bases_datos/doc.php?coleccion=iberlex&id=2005/03242, 20 d'abril de 2007].

- [19] EUROPEAN PARLIAMENT. *Directive 2002/96/EC of The European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. Brussels, Belgium: European Parliament and Council, 27 January 2003.

[http://europa.eu.int/eur-lex/pri/en/oj/dat/2003/l_037/l_03720030213en00240038.pdf, 20 d'abril de 2007].

Bibliografia complementària

- [20] EPIA. *EPIA Roadmap*. Brussels, Belgium: European Photovoltaic Industry Association, 2004.

- [21] SOLARBUZZ LLC. *Solarbuzz*. (empresa multinacional dedicada a la recerca i a la publicació d'informes d'energia solar, amb pàgina web d'informació general i estadístiques amb un gran llistat de fabricant de panells fotovoltaics entre d'altres)

[<http://www.solarbuzz.com/>, 20 d'abril de 2007]

- [22] GREEN PAGES. *The Global Directory for Environmental Technology*. (pàgina web amb gran llistat de fabricant de panells fotovoltaics entre d'altres)

[<http://www.eco-web.com/>, 20 d'abril de 2007]

- [23] GLOBALSOLAR. *Globalsolar* (empresa fabricant de panells solars amb pàgina web amb informació general sobre les diferents tecnologies emprades en la fabricació de cèl·lules fotovoltaïques i links a altres pàgines).

[<http://www.globalsolar.com/>, 20 d'abril de 2007]

