

# Muntatges d'instal·lacions solars fotovoltaiques

Instal·lacions solars fotovoltaiques



# Índex

<b>Introducció</b> .....	5
<b>Objectius</b> .....	6
<b>1. Principis bàsics de l'energia solar</b> .....	7
1.1. Conversió de l'energia solar en electricitat .....	8
1.1.1. Sistemes solars termoelèctrics .....	8
1.1.2. sistemes solars fotovoltaïcs .....	10
1.2. Radiació solar .....	10
1.2.1. Constant solar .....	11
1.2.2. Radiació incident a la superfície de la Terra .....	11
1.3. Distribució espectral de la radiació solar .....	12
1.4. Posició del Sol .....	13
1.4.1. Posició d'un emplaçament a la Terra .....	13
1.4.2. Principals paràmetres de la posició del Sol .....	15
1.5. Insolació mitjana diària .....	16
1.6. Efecte fotovoltaic .....	18
1.6.1. Generació de portadors .....	19
1.7. La cèl·lula fotovoltaica .....	20
1.7.1. Principi de funcionament de la cèl·lula .....	21
1.7.2. Corba I-V .....	22
1.7.3. Variacions de la corba en funció de la radiació incident .....	25
1.7.4. Variacions de la corba en funció de la temperatura de la cèl·lula .....	26
1.8. Tipologia de cèl·lules fotovoltaïques més esteses .....	26
<b>2. Elements de les instal·lacions fotovoltaïques</b> .....	28
2.1. Placa fotovoltaica .....	28
2.1.1. Característiques elèctriques de la placa fotovoltaica .....	28
2.1.2. Connexions de plaques .....	29
2.1.3. Connexions en sèrie de plaques FV .....	30
2.1.4. Connexions en paral·lel de plaques FV .....	30
2.1.5. Connexions mixtes de plaques FV .....	31
2.1.6. Díodes de pas a les plaques votovoltaïques .....	32
2.2. Estructures de suport de les plaques .....	33
2.2.1. Estructures mòbils .....	34
2.3. Elements específics de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes .....	35
2.3.1. Acumuladors d'energia elèctrica o bateries .....	36

2.3.2. Regulador de càrrega .....	42
2.3.3. Convertidors d'energia elèctrica cc/ca per a aplicacions autònomes .....	45
2.4. Elements específics de les instal·lacions fotovoltaïques connectades a la xarxa .....	46
2.4.1. Convertidor de connexió a la xarxa .....	47
2.4.2. Punt de connexió a la xarxa .....	49
<b>3. Dimensionament i càlculs de les instal·lacions</b> .....	51
3.1. Orientació i inclinació de les plaques .....	51
3.2. Incidència d'ombres .....	52
3.2.1. Separació entre fileres de plaques .....	53
3.3. Dimensionament d'elements bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes .....	54
3.3.1. Característiques de les necessitats a cobrir .....	54
3.3.2. Energia diària necessària .....	55
3.3.3. Radiació incident "hora sol pic" ( <i>hsp</i> ) .....	56
3.3.4. Nombre de plaques necessàries .....	56
3.3.5. Voltatge i capacitat de l'acumulador .....	57
3.3.6. Intensitat del regulador .....	58
3.3.7. Potència de l'inversor .....	59
3.3.8. Tipus d'equips auxiliars necessaris .....	59
3.4. Dimensionament d'elements bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques connectades a la xarxa .....	60
3.4.1. Nombre de plaques necessàries .....	60
3.4.2. Potència del convertidor .....	60
3.4.3. Radiació incident "hora sol pic" ( <i>hsp</i> ) .....	61
3.4.4. Pèrdues de rendiment dels components "PR" .....	61
3.4.5. Producció energètica estimada .....	62
3.5. Elements elèctrics bàsics en les instal·lacions fotovoltaïques .....	63
3.5.1. Proteccions elèctriques bàsiques en les instal·lacions fotovoltaïques .....	63
3.5.2. Secció dels conductors .....	63

## Introducció

Les instal·lacions solars fotovoltaïques són instal·lacions generadores d'electricitat en baixa tensió. En aquest context i amb criteris generals, aquestes instal·lacions no presenten diferències significatives respecte a les instal·lacions generadores que utilitzen altres fonts d'energia, com el gas o el gasoil.

Per això reglamentàriament, les instal·lacions solars fotovoltaïques estan subjectes al marc normatiu establert per les instal·lacions elèctriques de baixa tensió RBT i més específicament la instrucció tècnica ITC-BT 40 “Instalaciones Generadoras de Baja Tensión”.

Així doncs, per al correcte muntatge de les instal·lacions solars fotovoltaïques, caldrà aplicar els criteris d'instal·lacions elèctriques bàsics i com a coneixements específics serà necessari conèixer els detalls i peculiaritats del **Sol** com a recurs energètic, així com les màquines “plaques fotovoltaïques”, que ens permetran el seu aprofitament directe.

En el nucli d'activitat “Principis bàsics de l'energia solar” es descriuran les tecnologies actuals d'aprofitament de l'energia solar per a generar electricitat, alhora es tractarà la radiació solar com a recurs energètic, així com els factors bàsics que influiran en la disponibilitat i quantitat de radiació solar incident sobre la superfície de la terra. Per últim es presentarà l'efecte fotovoltaic com a tècnica específica per a l'aprofitament de la radiació solar per a generar electricitat directament.

En el nucli d'activitat “Elements bàsics de les instal·lacions solars fotovoltaïques” es descriuran els elements i peculiaritats particulars de les instal·lacions solars fotovoltaïques autònomes i de connexió a la xarxa.

En el nucli d'activitat “Configuració i càlcul de les instal·lacions” es treballarà sobre la base dels coneixements adquirits, per tal de determinar la correcta ubicació de les plaques fotovoltaïques i el dimensionament de tots els elements bàsics de les instal·lacions a partir de les configuracions tipus.

## **Objectius**

En acabar aquesta unitat formativa heu de ser capaços del següent:

1. Reconèixer els paràmetres bàsics que influiran en la radiació solar incident.
2. Determinar la ubicació i posició de les plaques solars fotovoltaïques en funció de l'aplicació i condicions d'ubicació.
3. Identificar incidència d'ombres sobre les plaques, produïdes per obstacles propers.
4. Reconèixer i dimensionar els elements bàsics de les instal·lacions solars fotovoltaïques autònomes i de connexió a la xarxa.

## 1. Principis bàsics de l'energia solar

La radiació solar és la principal font energètica de la terra, responsable de la major part dels paràmetres ambientals que permeten la vida en el planeta (fotosíntesis, pluja, vent, etc.). En aquest sentit la radiació solar també és aprofitada per l'ésser humà com a recurs energètic primari.

L'energia solar com a recurs energètic, presenta tot un seguit d'avantatges enfront d'altres fonts d'energia primària “no renovables”:

- L'energia solar és un **recurs energètic renovable** (!!). Cada dia, de forma natural, la radiació solar arriba a la Terra i no requereix cap procés d'extracció o transport.
- L'energia solar és present a qualsevol part del planeta en major o menor intensitat; per tant, la seva **utilització no requereix cap tipus de transport**.
- L'energia solar és un **recurs energètic sostenible**. S'aprofita o no, aquesta energia continuarà arribant en la mateixa intensitat a la Terra.
- L'energia solar és **capaç d'atendre gran part de la demanda d'energia actual**. A Catalunya la incidència mitjana diària de radiació solar és de 4 kWh per cada m<sup>2</sup>. En la figura 1 es mostra la radiació solar incident per zones de Catalunya.

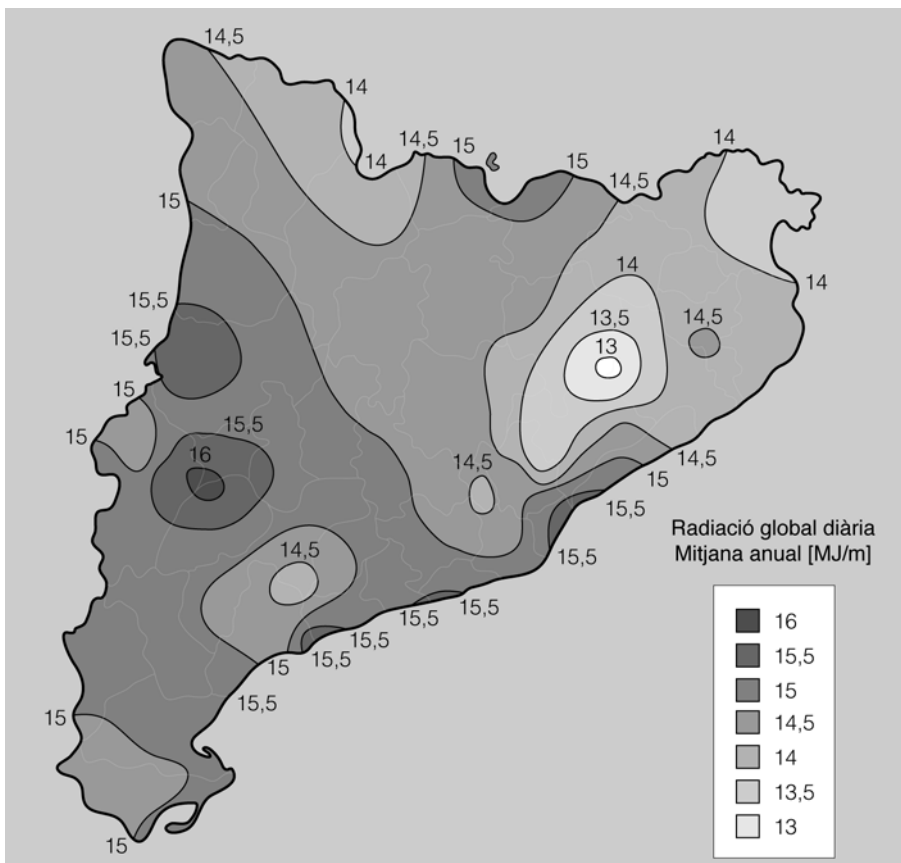


Central elèctrica fotovoltaica, que transforma directament la radiació solar en electricitat.

### Energies renovables

Són aquelles que circulen o que es generen de forma natural a partir de recursos amb cicles curts de renovació, de manera que utilitzar-les no hipoteca la disponibilitat futura.

Figura 1. Mapa de radiació solar mitjana a Catalunya (kWh/m<sup>2</sup>/dia)



- La utilització de l'energia solar com a recurs energètic **no presenta cap tipus d'emissió contaminant**, ni residus.
- L'energia solar és un **recurs energètic de llarga durada**. S'estima que al Sol li queden uns 5.000 milions d'anys de vida.

Tot i això, la utilització de l'energia solar com a font d'energia presenta certes dificultats, ja que la radiació solar és un recurs energètic dinàmic, que arriba a la Terra de forma discontinua (dia/nit) amb una intensitat variable en funció de l'estacionalitat (estiu/hivern) i un potencial variable en funció de la localització geogràfica i les condicions ambientals del receptor (usuari).

### 1.1. Conversió de l'energia solar en electricitat

La utilització directa de la radiació solar com a font d'energia primària per a producció d'electricitat adopta les següents configuracions:

- Sistemes solars termoelèctrics
- Sistemes solars fotovoltaïcs

#### 1.1.1. Sistemes solars termoelèctrics

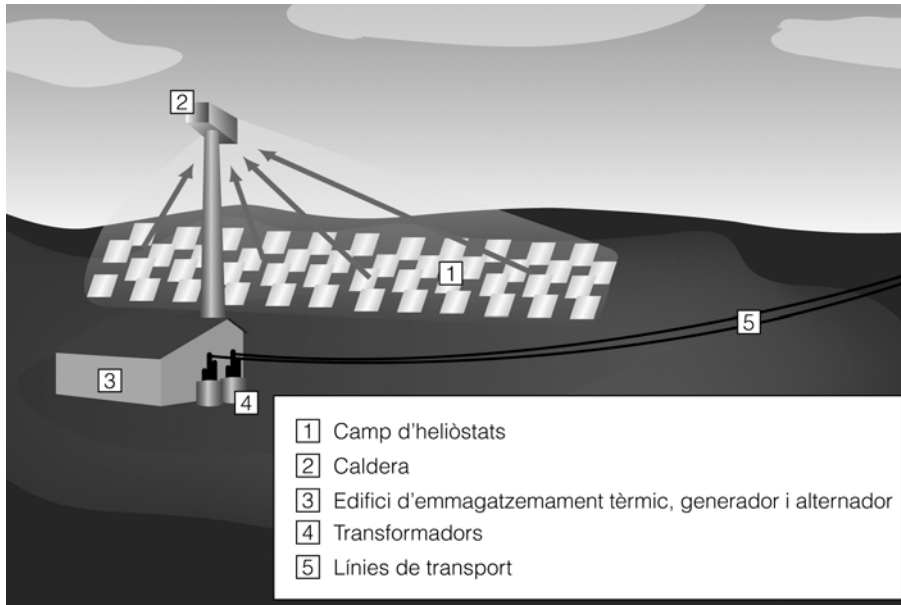
En els sistemes solars termoelèctrics, la radiació solar s'utilitza per a generar calor, que posteriorment es transformarà en corrent elèctric per mitjà de turbines de vapor, com en un cicle tèrmic convencional, malgrat que la font principal d'energia no són els combustibles fòssils ni l'energia nuclear, sinó el Sol.

Aquest tipus d'instal·lacions presenten les següents configuracions típiques:

- **Centrals de concentració de torre:** aquesta tecnologia s'està utilitzant des de la dècada dels anys setanta i té força implantació arreu del món. Les centrals termosolars de torre consten d'un sistema concentrador anomenat "camp d'heliòstats", que no és més que un seguit de miralls, dotats d'un sistema automàtic de seguiment de la posició solar, que reflecteix la radiació solar directa sobre un únic punt anomenat receptor i que està situat habitualment a la part superior d'una torre. En el concentrador es converteix l'energia solar en energia tèrmica, que serveix per a generar vapor. La figura 2 mostra els elements bàsics d'una central solar termoelèctrica de torre.

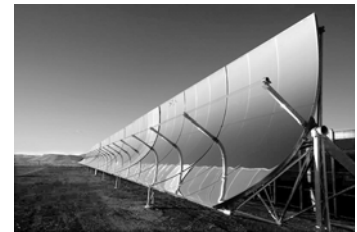


Figura 2. Representació gràfica dels elements d'una central de torre



Central termoelèctrica de torre PS10 d'11MW de potència i situada a Sanlúcar la Mayor (Sevilla)

- **Centrals solars termoelèctriques amb captadors cilindres parabòlics:** en aquests centrals, la radiació solar és reflectida per uns miralls cilindre parabòlics. Pel focus de la paràbola hi passa un tub que rep la radiació reflectida per la paràbola. Aquest tub s'escalfa fins a uns 400 °C, es fa circular un fluid (normalment algun oli tèrmic), que s'utilitzarà per produir vapor, amb el qual es produirà electricitat, com en el cas de les centrals de torre.

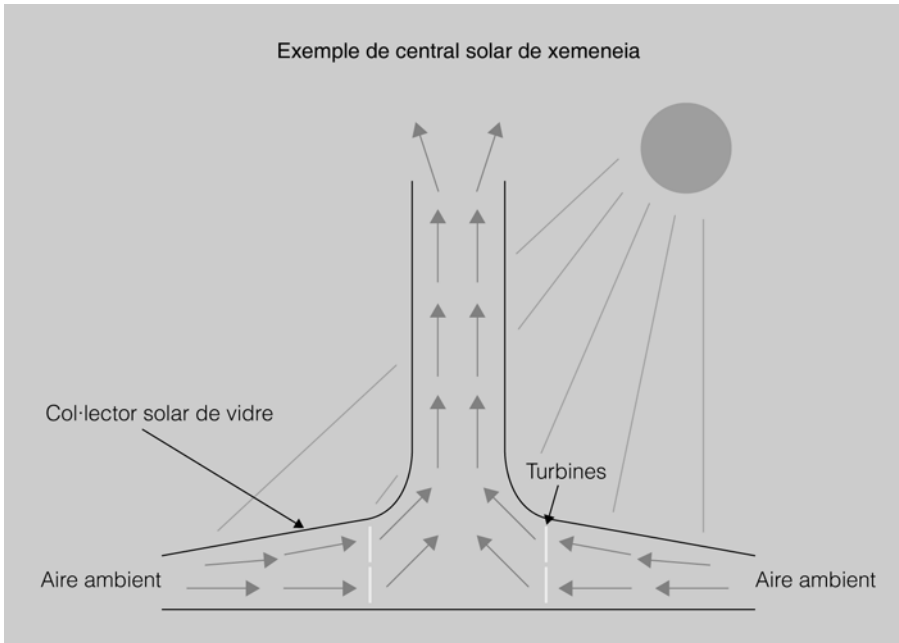


Central cilíndrica parabòlica de 14 MW situada en el desert de Mojave (Califòrnia).

- **Centrals solars de xemeneia:** una variant de les centrals solars termoelèctriques són les anomenades centrals de xemeneia, en les quals es genera electricitat mitjançant uns aerogeneradors accionats pels corrents d'aire ascendent d'una xemeneia de gran alçada que està adossada a una gran superfície transparent situada a la base de la xemeneia. En aquestes centrals, el Sol escalfa per efecte hivernacle l'aire situat per sota de la superfície transparent de la base de la xemeneia. L'aire per convenció natural es desplaça fins a l'exterior a través de la xemeneia, i crea un corrent d'aire ascendent que és suficient per a generar electricitat mitjançant els aerogeneradors situats a l'interior de la xemeneia, tal com es mostra a la figura 3.

En les centrals de xemeneia s'utilitzarà la base com a sistema d'emmagatzematge tèrmic per a reduir la fluctuació de la producció elèctrica; tot i això, aquestes centrals com la resta de centrals solars no funcionen sense radiació solar.

Figura 3. Representació gràfica del funcionament d'una central de xemeneia



#### Central solar de xemeneia

Central solar de xemeneia de 50 kW que funcionà de forma experimental durant els anys vuitanta a Manzanares (Ciudad Real). Aquesta central constava d'una xemeneia de 190 m d'alçada i 10 m de diàmetre adossada a una superfície de vidre de 240 m de diàmetre.

### 1.1.2. sistemes solars fotovoltaïcs

En els sistemes fotovoltaïcs, el Sol s'utilitza per a produir electricitat de forma directa, sense processos termodinàmics, únicament a través d'un dispositiu de silici semiconductor denominat cèl·lula fotovoltaïca. En aquesta transformació no existeixen elements mecànics ni tèrmics; tot funciona a nivell fotoquímic.

Els sistemes solars fotovoltaïcs són els més utilitzats per al subministrament elèctric, allà on el cost de manteniment i la instal·lació de les línies elèctriques no és rendible, és a dir, per a instal·lacions autònomes aïllades, així com per a centrals generadores de poca potència connectades a la xarxa elèctrica.



Instal·lació solar fotovoltaïca autònoma

## 1.2. Radiació solar

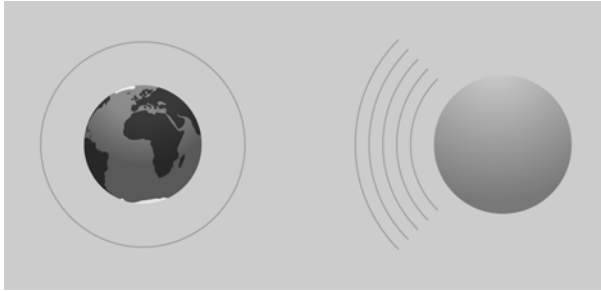
La radiació solar és la matèria primera de qualsevol sistema de producció d'electricitat amb energia solar. Per aquest motiu, per al correcte disseny i muntatge de les instal·lacions solars és imprescindible conèixer les peculiaritats d'aquest recurs i les tècniques adequades del seu aprofitament.

En aquest apartat descriurem els paràmetres determinants de la radiació solar incident, per tal establir els criteris bàsics a l'hora d'ubicar les plaques solars, així com determinar-ne el nivell de producció elèctrica.

### 1.2.1. Constant solar

L'energia solar és irradiada en forma concèntrica al focus (el Sol) i es desplaça per l'espai perdent intensitat proporcionalment a la distància en què se n'allunya. La pèrdua d'intensitat d'energia és deguda principalment a l'efecte de dispersió de l'energia, tal com es mostra a la figura 4.

Figura 4. Desplaçaments concèntrics de l'energia solar



D'acord amb aquest concepte podem establir que la intensitat de l'energia solar incident a l'exterior de l'atmosfera terrestre serà pràcticament constant a qualsevol punt perpendicular al Sol.

Aquest valor s'anomena **constant solar** i fa referència a la potència de radiació solar instantània rebuda sobre una unitat de superfície ( $m^2$ ), sobre un pla tangent a l'esfera imaginària formada per la capa externa de l'atmosfera.

El valor de la constant solar és de  $1.353 \text{ W/m}^2$

Encara que aquest valor s'anomeni "constant solar", no és un valor fix, sinó que varia aproximadament  $\pm 5\%$  en funció de les variacions de la distància Sol-Terra durant l'any.

### 1.2.2. Radiació incident a la superfície de la Terra

La radiació incident sobre la Terra és sensiblement inferior a la constant solar per l'efecte atmosfèric. Tot i aquesta accentuada variabilitat pel que fa a possibles valors de la radiació incident en un lloc i moment determinats sobre la Terra, la indústria ha trobat un valor de referència per a la prova d'equips, etc.

El valor d'irradiància estàndard de referència és de  $1.000 \text{ W/m}^2$ .

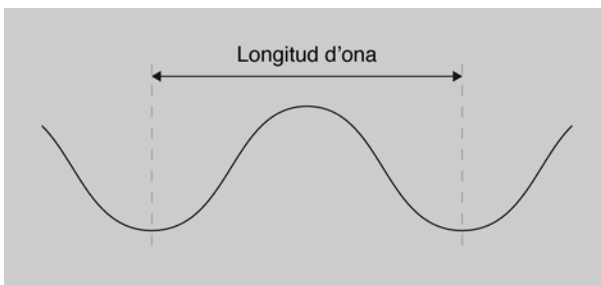
### 1.3. Distribució espectral de la radiació solar

L'energia solar arriba a la Terra en forma d'ones electromagnètiques que es desplacen per l'espai en totes les direccions sense cap suport material. Aquest efecte és el que coneixem com a radiació i fa referència a un fenomen físic vibratori que es representa en forma d'ones.

La freqüència de les vibracions ondulatories és el nombre de vegades que es repeteix la forma d'ona completa en la unitat de temps. La seva unitat és l'hertz (Hz) o també la inversa del temps ( $s^{-1}$ ).

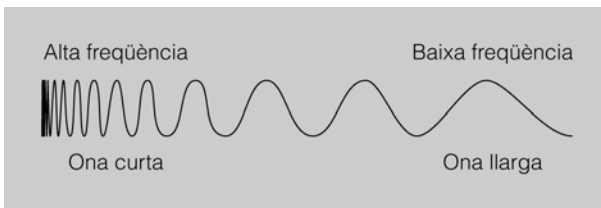
Un altre paràmetre característic de les radiacions és la **longitud de l'ona**, que és la distància que hi ha entre dos punts iguals d'una ona, per exemple, entre crestes o passos per zero, com es mostra en la figura 5.

Figura 5. Representació gràfica de la longitud d'ona



Per tant, com més petita sigui la longitud d'ona, més gran serà la freqüència, és a dir, més cops es repeteix l'ona en el temps i més energia pot ser transportada (figura 6).

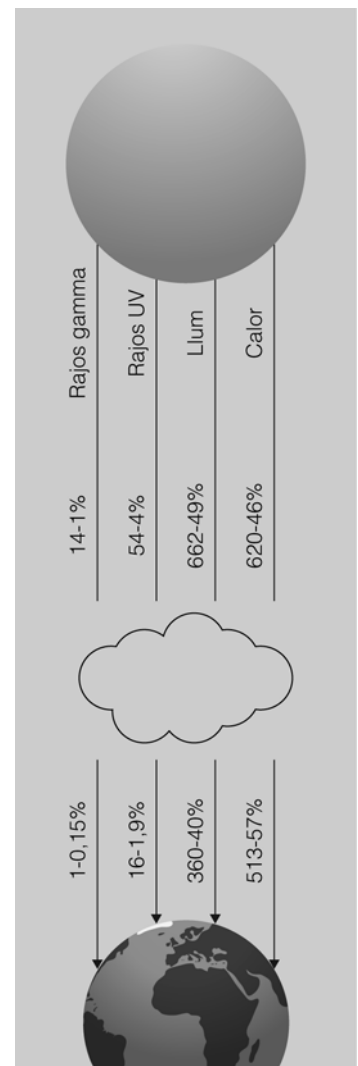
Figura 6. Representació gràfica d'ones electromagnètiques



Alhora, les radiacions, en funció de la seva freqüència, tenen més o menys capacitat de penetració en els materials. La llum visible (amb longituds d'ona entre les 0,4 i 0,7  $\mu\text{m}$ ) no pot travessar parets; en canvi, per a aturar els raigs gamma (de longitud d'ona deu mil vegades més petita), les centrals nuclears s'han de blindar amb parets de formigó i de plom d'1 m de gruix.

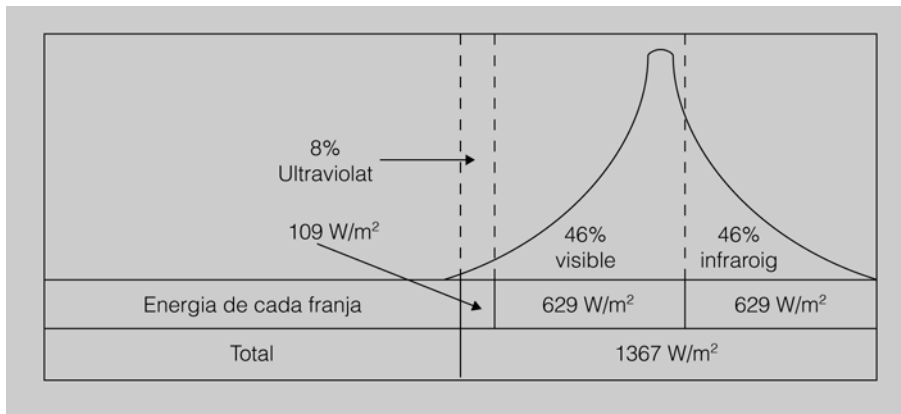
Taula 1. Distribució de l'espectre de radiació solar

Banda	Ultraviolat	Visible	Infraroig
Longitud d'ona ( $\mu\text{m}$ )	0,01 - 0,38	0,38 - 0,78	0,78 - 1.000
Percentatge energètic	8%	46%	46%
Potència de radiació ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	109	629	629



Pèrdues de radiació en l'atmosfera terrestre

Figura 7. Representació gràfica de la distribució de l'espectre de la radiació



Aproximadament, la meitat de la radiació solar incident en l'atmosfera terrestre correspon a la banda de freqüències de la llum visible per l'ull humà (de 0,38 a 0,78  $\mu\text{m}$ ). La resta pertany a bandes que no capten els nostres ulls, principalment infraroig (radiació associada a processos tèrmics i de longituds d'ona superiors a 0,78  $\mu\text{m}$ ) i un petit component de llum ultraviolada que presenta longituds d'ona una mica més petites que la visible (inferiors a 0,38  $\mu\text{m}$ ).

En la taula 1 i en la figura 7 podem observar les característiques i distribució de l'espectre de radiació incident en l'atmosfera extraterrestre.

#### 1.4. Posició del Sol

La radiació és força constant abans de la seva entrada en l'atmosfera. En canvi, un cop ha travessat la franja d'aire que ens envolta la radiació mesurada a nivell del mar, descendeix força en funció principalment de dos paràmetres: l'espessor d'atmosfera travessada (30% fix) i la climatologia regnant (fins a 100% variable).

Respecte de la climatologia, no podem fer prediccions a mitjà o llarg termini fiables que ens permetin avaluar la radiació incident per a qualsevol dia de l'any. En canvi, mitjançant l'estudi de la "geometria solar", podem conèixer amb força exactitud la posició del Sol qualsevol dia de l'any i en qualsevol moment del dia. Aquest fet ens permet avaluar els angles d'incidència de la radiació i, per tant, el comportament de les ombres projectades per objectes que, juntament amb les mitjanes de les mesures de radiació realitzades a les estacions meteorològiques, són la base dels càlculs solars.

##### 1.4.1. Posició d'un emplaçament a la Terra

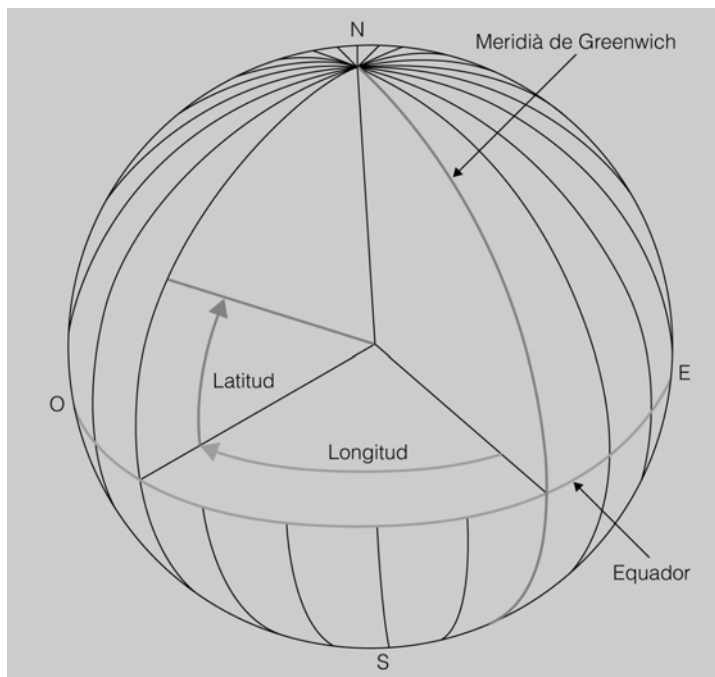
La localització d'un emplaçament en el planeta és un dels factors determinats per a establir el correcte posicionament de les plaques solars. En

aquest sentit, l'instal·lador solar necessita conèixer les mínimes referències que s'utilitzen per a ubicar un emplaçament sobre el planeta, per tal de determinar l'orientació i inclinació adequada de les plaques.

Aquestes referències bàsiques (figura 8) són:

- **Latitud ( $F$ ):** és l'angle que formen la vertical (perpendicular) del punt geogràfic que es consideri de la superfície terrestre (**emplaçament**) i el pla de l'equador. La dada de la latitud és bàsica per a poder conèixer, a través de complexes expressions matemàtiques o bé a través de taules, la resta de dades referents a la posició solar. A punts de latitud igual els corresponen valors iguals d'alçada solar.
- **Longitud ( $L$ ):** és l'angle que formen la vertical del punt geogràfic que es consideri de la superfície terrestre (**emplaçament**) i una projecció vertical a un punt geogràfic situat a una latitud igual, però sobre un eix de referència anomenat meridià de Greenwich. Els llocs situats a una latitud igual pertanyen a la mateixa franja horària i reben la radiació solar en igual desviació respecte del sud.

Figura 8. Paràmetres de posició geogràfica



- **Nord magnètic ( $N_m$ ):** és la direcció indicada per la part magnetitzada d'una brúixola, a causa de l'atracció que fa el pol magnètic (concentració de massa) del planeta.
- **Nord geogràfic ( $N$ ):** és la direcció que indicaria una brúixola si la concentració de massa del planeta fos simètrica (indica la direcció des del punt d'observació i l'extrem superior geomètric del planeta).
- **Declinació magnètica:** és l'angle que formen la direcció que indica la brúixola i el nord geogràfic. A causa de la deriva dels continents, la con-

centració de massa de la Terra va variant, de manera que cada any la declinació també varia. En els mapes dels serveis cartogràfics nacionals, sol estar referenciada la declinació magnètica absoluta de la darrera data en què va ser mesurada i un valor de variació anual a partir de la data indicada.

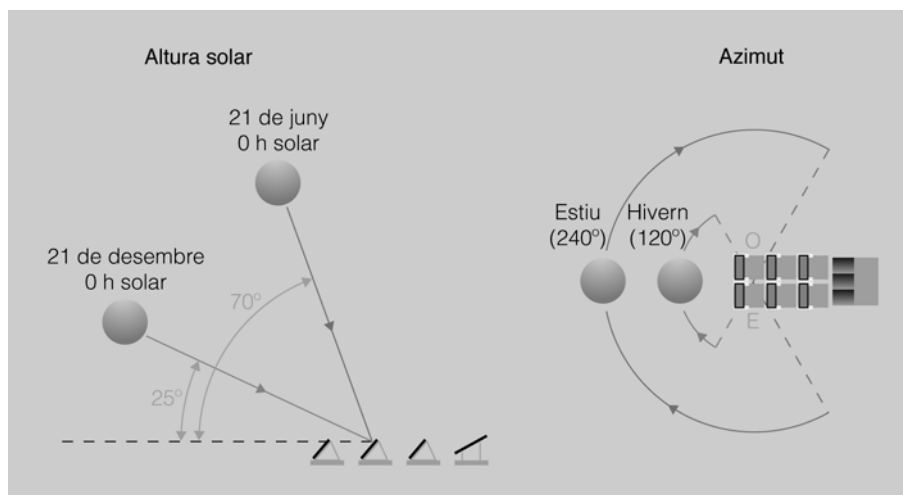
### 1.4.2. Principals paràmetres de la posició del Sol

La Terra fa una rotació completa sobre si mateixa cada 24 hores (aproximadament, 23 h 56 min 4 s). Aquest fet implica que, des de qualsevol emplaçament, una persona que observa té la sensació d'estar estàtica i que és l'Univers el que gira al seu voltant.

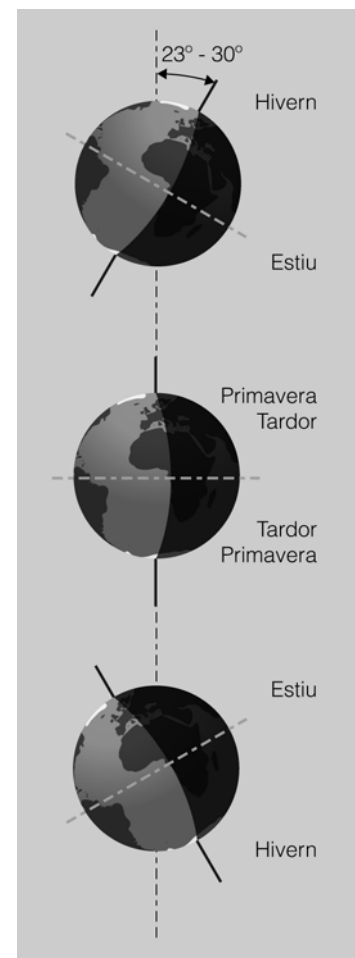
Per tant, tot i que la Terra gira, ens hem acostumat a dir que és el Sol el que surt al matí per l'est, puja fins a la màxima alçada al migdia i es pon a la tarda per l'oest. En aquest document donarem com a bona aquesta nomenclatura tradicional d'associar el moviment del sistema Sol-Terra només al Sol i identificarem els següents paràmetres de referència respecte al moviment del Sol:

- **Azimut (A):** com s'indica a la figura 9, és l'angle que forma la projecció dels raigs solars sobre el pla tangent a la superfície terrestre i el sud geogràfic (Azimut  $0^\circ$  correspondrà al moment en què el Sol està exactament sobre el sud geogràfic i indica el migdia 12:00 hora solar).

Figura 9. Paràmetres de la posició solar



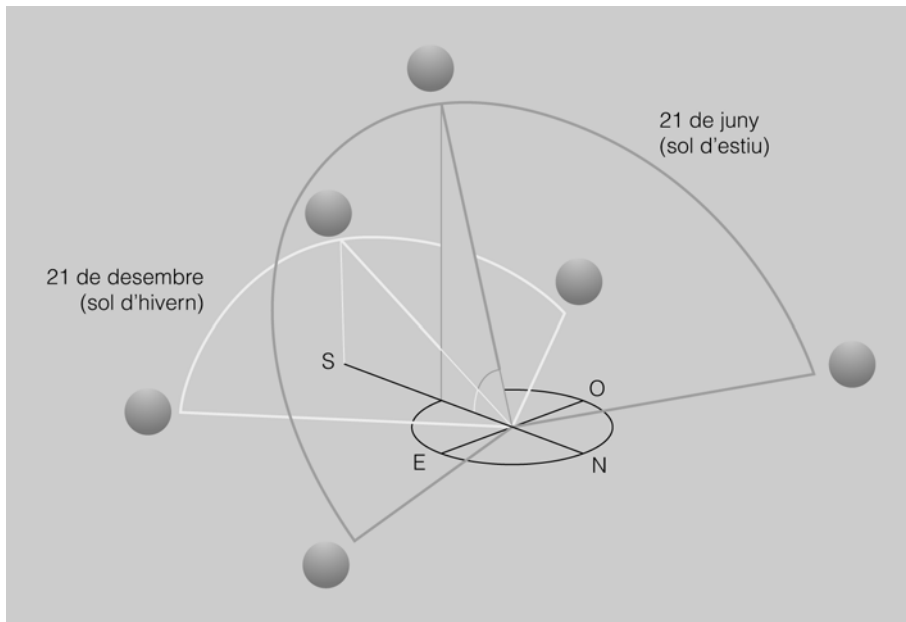
- **Alçada solar (h):** és l'angle que formen els raigs solars incidents amb el pla horitzontal quan arriben a la superfície de la Terra (figura 9). L'alçada solar varia durant el dia. El Sol surt molt baix, sobre l'horitzó, assoleix l'alçada màxima al migdia per a tornar a amagar-se a la tarda per l'oest. De la mateixa manera, cada dia de l'any el Sol arriba a una alçada



Representació gràfica de la declinació de la Terra en funció de l'estació de l'any

màxima diferent, de manera que a Catalunya el valor més alt és el dia del solstici d'estiu, proper a  $71^\circ$  i el mínim del solstici d'hivern, proper als  $25^\circ$  (figura 10).

Figura 10. Posició solar en els equinoccis

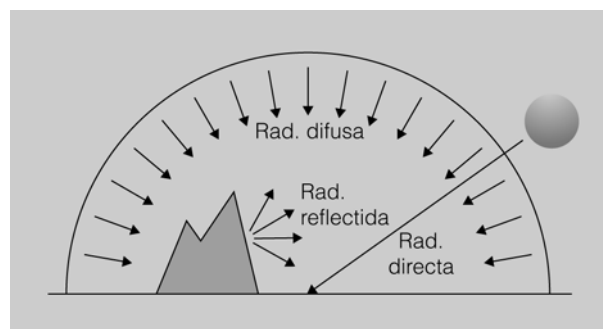


### 1.5. Insolació mitjana diària

Tot i que la radiació solar instantània (irradiància) és una dada força important a l'hora de poder avaluar el que està passant en una instal·lació que està en funcionament, en el moment de poder avaluar l'energia que produirà un sistema fotovoltaic o de dimensionar-lo, el que necessitem és saber la quantitat d'energia que aquesta radiació aporta al llarg d'un període de temps concret. Aquest valor és el que s'anomena habitualment "radiació solar diària".

Obtenir aquesta dada és una tasca laboriosa ja que requereix mesures al llarg de diversos anys (més de 10 anys) i un treball posterior de validació i correlacions matemàtiques per tal de poder extrapolar les dades al territori i a diferents orientacions i inclinacions.

Finalment, els resultats d'aquesta anàlisi es presenten en forma d'**atles de radiació solar**, com l'**Atles de radiació solar a Catalunya**, elaborat per l'Institut Català d'Energia i que permet obtenir dades de radiació global difusa de 83 estacions de mesura, distribuïdes arreu del territori català.



#### La radiació solar incident sobre una superfície...

... estarà formada per la **radiació directa**, que com el nom indica, és la radiació incident de forma directa i la **radiació difusa**. Aquest component de la radiació correspon a la radiació reflectida tant pels agents ambientals (núvols, boires, etc.) com per agents topogràfics (muntanyes, edificis, etc.).

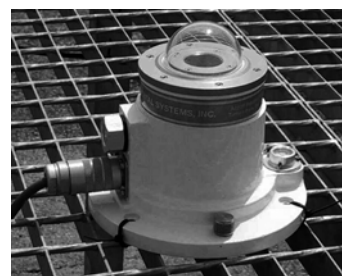


A tall d'exemple presentem la taula de la figura 11, en la qual es representen les dades obtingudes per a l'estació de Barcelona i ens indica els valors mitjans de **la radiació global diària ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$ )**, és a dir, la suma de tots els components de la radiació (directa, difusa i reflectida) que rebria una superfície d' $1 \text{ m}^2$  que estigués orientat al sud (azimut = 0) en funció de la seva inclinació, per cada un dels mesos de l'any i finalment a la columna de la dreta el valor mitjà anual.

Si observem els valors podrem identificar amb claredat les variacions estacionals i també algunes peculiaritats.

Per exemple: el mes de l'any amb menys radiació solar és en termes generals el desembre, però si es tracta d'analitzar la radiació solar que rebrà una façana (inclinació  $90^\circ$ ) veiem que el pitjor mes de l'any aleshores serà el juny (ja que el Sol està molt alt i, per tant, l'angle de visió de la superfície serà molt petit).

El valor màxim d'irradiació global anual al llarg de l'any es dona amb inclinació  $35^\circ$  amb  $17,73 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$ ; per tant, aquesta serà la millor inclinació en sistemes on l'important sigui la producció anual i no hi hagi cap època crítica a cobrir.




#### Mesurar la radiació total que rep una superfície

Per a mesurar la radiació total que rep una superfície en un determinat nombre de dies (o mesos), s'utilitzen uns aparells anomenats piranòmetres, els quals detecten la intensitat de la radiació incident en cada moment i que, acoblats a un ordinador, acumulen aquestes dades en el decurs del temps de presa de mesures.

Figura 11. Taula de radiació solar de l'Atlas de radiació solar de Catalunya

Orientació: $0^\circ$													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
$0^\circ$	6,80	9,65	13,88	18,54	22,25	24,03	23,37	20,42	16,05	11,40	7,73	6,04	15,04
$5^\circ$	7,70	10,56	14,72	19,15	22,58	24,21	23,63	20,93	16,85	12,32	8,66	6,94	15,71
$10^\circ$	8,56	11,41	15,47	19,67	22,78	24,25	23,74	21,31	17,54	13,17	9,55	7,80	16,29
$15^\circ$	9,37	12,19	16,14	20,07	22,84	24,13	23,70	21,59	18,13	13,95	10,38	8,61	16,78
$20^\circ$	10,12	12,90	16,70	20,35	22,76	23,87	23,52	21,76	18,61	14,63	11,15	9,37	17,17
$25^\circ$	10,81	13,52	17,17	20,51	22,60	23,48	23,24	21,80	18,98	15,23	11,85	10,07	17,46
$30^\circ$	11,43	14,07	17,52	20,54	22,32	23,02	22,86	21,71	19,23	15,73	12,47	10,71	17,65
$35^\circ$	11,97	14,52	17,77	20,45	21,90	22,43	22,34	21,48	19,36	16,13	13,01	11,28	17,73
$40^\circ$	12,44	14,88	17,91	20,23	21,35	21,70	21,69	21,12	19,37	16,43	13,47	11,77	17,71
$45^\circ$	12,83	15,15	17,94	19,89	20,67	20,84	20,90	20,63	19,26	16,63	13,85	12,19	17,58
$50^\circ$	13,14	15,32	17,86	19,43	19,87	19,86	20,00	20,02	19,03	16,72	14,13	12,53	17,33
$55^\circ$	13,36	15,40	17,67	18,85	18,95	18,77	18,97	19,29	18,68	16,71	14,32	12,78	16,98
$60^\circ$	13,49	15,37	17,36	18,16	17,92	17,60	17,84	18,44	18,22	16,59	14,42	12,95	16,53
$65^\circ$	13,53	15,25	16,95	17,36	16,83	16,41	16,71	17,48	17,65	16,36	14,42	13,04	16,00
$70^\circ$	13,49	15,03	16,44	16,46	15,70	15,14	15,48	16,43	16,97	16,03	14,33	13,03	15,38
$75^\circ$	13,35	14,72	15,83	15,47	14,48	13,78	14,18	15,35	16,19	15,60	14,14	12,94	14,67
$80^\circ$	13,13	14,31	15,12	14,41	13,18	12,36	12,80	14,17	15,31	15,08	13,86	12,77	13,87
$85^\circ$	12,82	13,81	14,32	13,29	11,82	10,93	11,35	12,93	14,34	14,45	13,50	12,51	13,00
$90^\circ$	12,43	13,23	13,44	12,11	10,41	9,57	9,99	11,62	13,30	13,74	13,04	12,16	12,08

Tot i que és a  $65^\circ$  que trobem la màxima insolació al mes de desembre, a  $50^\circ$  aquesta continua essent de més del 95% i, en canvi, permet obtenir millor aprofitament els mesos de primavera i tardor.

L'atles també ens presenta taules amb la irradiació per a superfícies desorientades del sud 30, 60 i 90°, amb independència de si la desorientació es troba en direcció est i oest. 

La unitat d'energia utilitzada a les taules de radiació és el mega-Joule (MJ), múltiple de la unitat internacionalment reconeguda com a unitat d'energia, el Joule.

$$1\text{MJ} = 0,27\text{ kWh}$$

Per tant, per a passar de MJ a kWh multiplicarem els MJ pel factor convers 0,27kWh/MJ i el resultat obtingut serà amb kWh (unitat d'energia elèctrica).



Vegeu l'annex *Atles de la radiació solar a Catalunya* en la secció "Annexos" del web del crèdit.

## 1.6. Efecte fotovoltaic

Els materials **semiconductors** (com per exemple el silici) tenen la particularitat de presentar un comportament diferent davant l'electricitat (conducció de càrregues) en funció d'una font energètica externa, com ara la radiació solar, que els excita o no.

Quan un fotó (partícula de llum radiant) impacta contra un electró de la darrera òrbita d'un àtom de silici (electró de valència), li proporciona l'energia amb què viatjava.

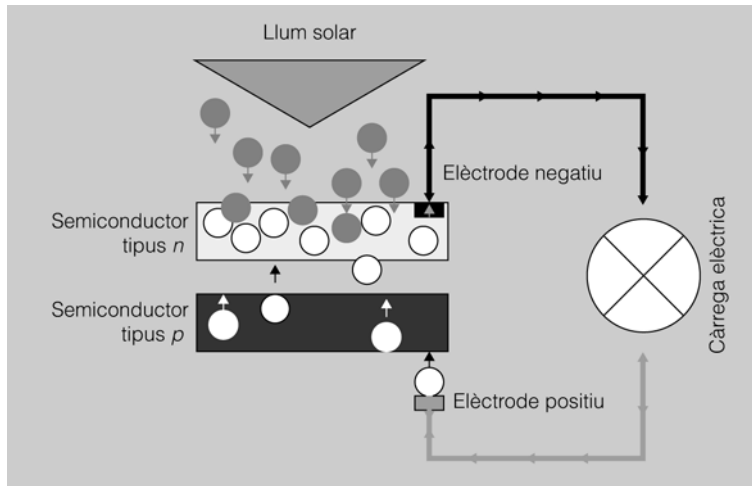
Si l'energia adquirida per aquest electró supera la força d'atracció del nucli (energia de valència), aquest surt de la seva òrbita i queda lliure de l'àtom; per tant, pot viatjar a través del material. En aquest moment, diríem que el silici s'ha fet conductor (banda de conducció) i, per a fer això, fa falta que la força d'impacte d'un fotó sigui almenys d'1,2 eV.

Cada electró "alliberat" deixa enrere seu un forat, o espai lliure, que pot romandre fins que un electró que ha saltat d'un altre àtom l'ocupi. Aquests moviments dels electrons alliberats o dels espais que deixen enrere és el que s'anomena càrregues elèctriques.

Aquest corrent de càrregues pot assolir els contactes i sortir del material a fi de realitzar un treball útil. Perquè això passi de forma constant i regular, fa falta que hi hagi la presència d'un camp elèctric de polaritat constant. Aquest camp polaritza les partícules i actua com una veritable bomba que impulsa els electrons en un sentit i els forats en l'oposada.

En les cèl·lules solars convencionals, el camp elèctric (0,5 V) es forma gràcies a una unió *P-N*, és a dir, una zona del material té excés d'electrons (càrrega negativa), mentre que l'altra en té mancança (càrrega positiva), de manera que en ser alliberat un electró és impulsat a través del material fins als conductes de plata, de baixa resistivitat (figura 12).

Figura 12. Representació gràfica de l'efecte fotovoltaic



### 1.6.1. Generació de portadors

Els fotons corresponents a longituds d'ona petites (radiació ultraviolada) són més energètics (de 2 a 3 electró-volt) que els corresponents a longituds d'ona més gran (radiació infraroja).

Cada material semiconductor té una energia mínima que permet l'alliberament d'electrons dels seus àtoms i, per tant, aquesta energia correspondrà a fotons d'una determinada banda de freqüències (gap) que anirà des dels associats a l'ultraviolat fins als colors visibles, tret del vermell, que ja té una energia associada inferior als 1,2 electró-volts.

A la figura 13, podeu observar les respostes espectrals de diferents materials semiconductors emprats en la fabricació de cèl·lules solars. S'hi pot observar com el germani (Ge) reacciona davant de radiacions de menor freqüència i major longitud d'ona (infraroig) i l'arsenur de gal·li (GaAs) requereix de radiació ultraviolada i visible, mentre que el silici té un comportament intermedi.

Figura 13. Gràfica de la resposta espectral de diferents materials

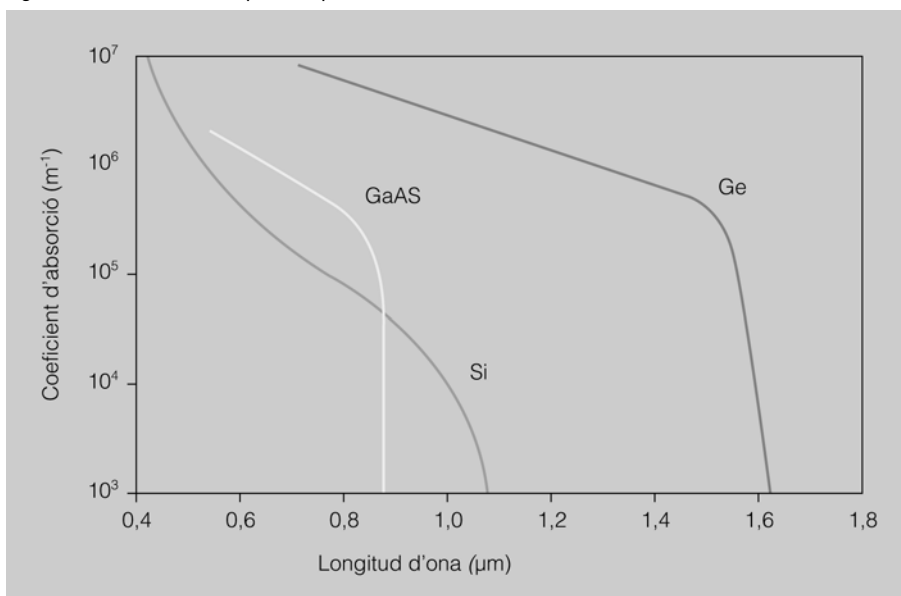
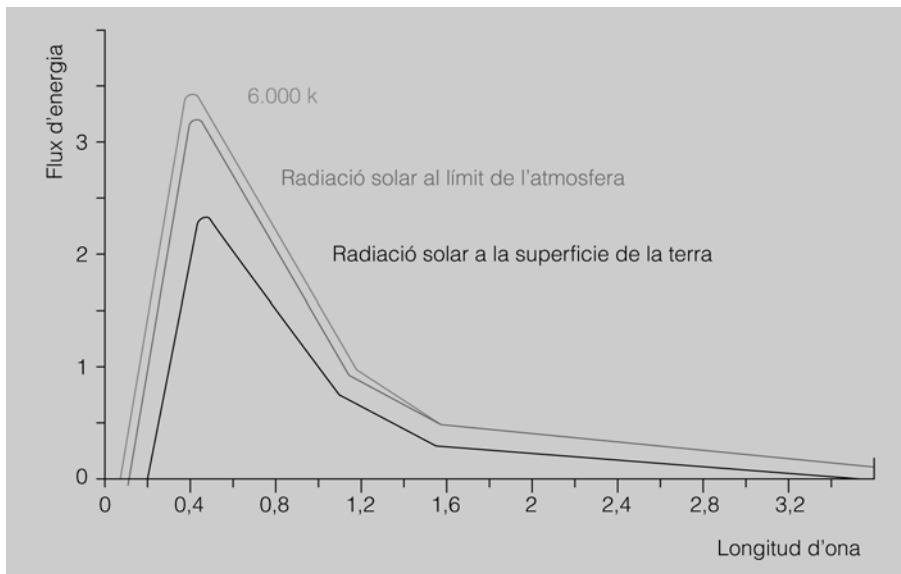


Figura 14. Banda de radiació solar amb suficient energia (1,2 electró-volts) per a desplaçar electrons dels àtoms de silici



Encara que no tots els fotons aconseguen l'objectiu de separar electrons, això es deu al fet que travessar el material suposa sempre una certa pèrdua energètica i, per tant, que en el moment de la col·lisió alguns fotons ja han quedat fora del llindar requerit per a desplaçar un electró. Aquestes pèrdues per no-absorció només depenen de les propietats del material i són inevitables.

Alhora, hi ha un percentatge de fotons que arriben a travessar la làmina de semiconductor sense topar amb cap electró i d'altres que il·luminen la superfície del material són reflectits (pèrdues per reflexió). Aquestes pèrdues es poden reduir a través de tractaments antireflexius de la superfície de la cèl·lula.

Només s'aconsegueix la generació d'un parell electró-forat per cada fotó amb energia cinètica superior a la mínima energia (gap) que aconseguixi penetrar en el material i topi amb un electró de valència.

## 1.7. La cèl·lula fotovoltaica

La cèl·lula solar més habitual és una làmina de silici cristal·lí d'un gruix d'aproximadament 0,5 mm. El procés d'elaboració és d'un nivell sofisticat i delicat per a poder aconseguir una homogeneïtat del material.

El camp elèctric es genera a partir de la diferent polarització de dues zones de la cèl·lula, generalment la part superior té un caràcter negatiu i la resta positiu per tal de crear la unió *p-n*.



Cèl·lula solar fotovoltaica

S'aconsegueix, així, que una de les seves zones tingui:

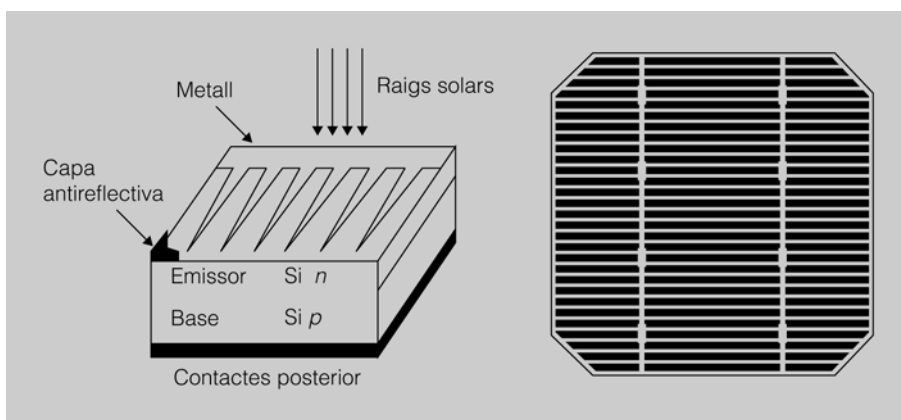
- Defecte d'electrons, anomenada zona  $p$  o positiva o ànode o receptor. Generalment, s'aconsegueix afegint al silici pur una petita part de bor que només té 3 electrons de valència.
- Excés d'electrons, anomenada  $n$  o negativa o càtode o emissor. Generalment formada per la difusió de fòsfor que té 5 electrons en la darre-ra òrbita.

A causa d'aquesta diferència de càrrega elèctrica en el material, es produeix el camp elèctric encarregat d'empènyer els electrons a sortir de la cèl·lula per la superfície de la capa  $N$ , fet que implica l'establiment d'un corrent elèctric.

La cèl·lula està dotada d'uns contactes elèctrics per a poder canalitzar l'energia que produeix quan se la il·lumina (figura 15). Aquests contactes estan dissenyats de forma ramificada (en la cara assolellada). N'hi ha dos de principals i, a més, hi ha les ramificacions que els uneixen per recaptar millor els electrons en tota la superfície de la cèl·lula. L'objectiu és de combinar alhora un bon contacte elèctric, de baixa resistivitat i fer l'ombra mínima per tal que els fotons arribin al material actiu de la cèl·lula.

A la cara posterior, els contactes solen formar una trama atapeïda o, fins i tot, una làmina contínua que permet la reducció del valor de la resistència interna.

Figura 15. Visió augmentada de les parts físiques d'una cèl·lula fotovoltaïca



Sobre la capa  $n$  de només unes dècimes de micra d'espessor; sobre la base de tipus  $p$  que predomina, també es poden observar els contactes elèctrics.

### 1.7.1. Principi de funcionament de la cèl·lula

Quan una cèl·lula solar fotovoltaïca es connecta a una càrrega o consum i, alhora, és il·luminada pel Sol, genera una diferència de potencial en-

tre els seus contactes que provoca la circulació dels electrons a través de la càrrega.

En aquestes condicions, la cèl·lula funciona com un generador de corrent.

### 1.7.2. Corba I-V

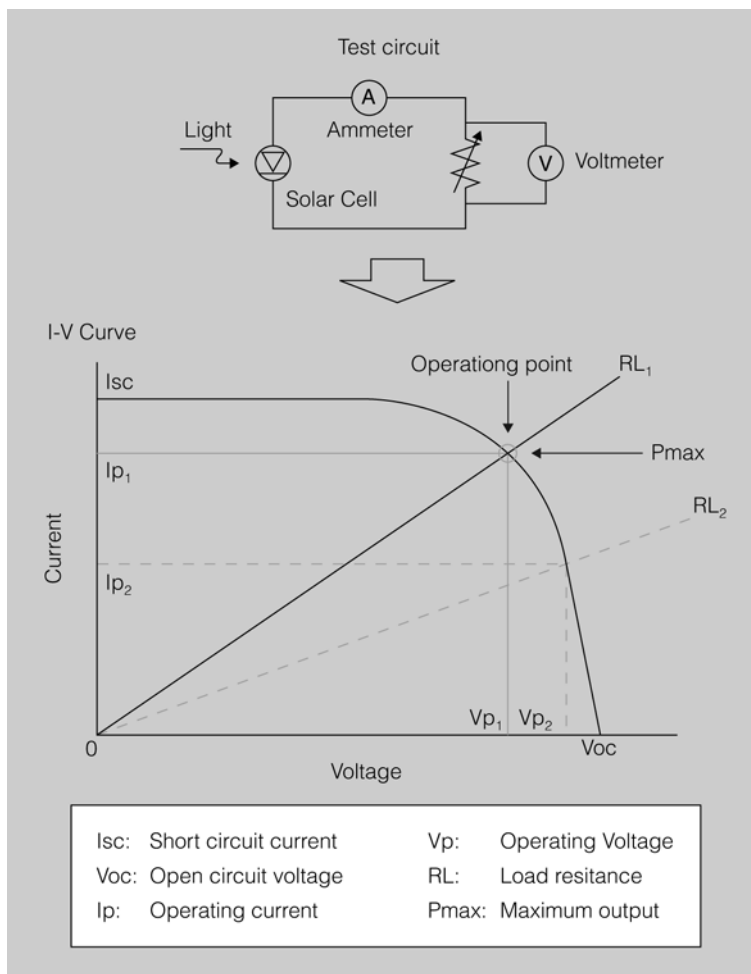
Un cop analitzat el principi físic del perquè de la generació d'electricitat i de les seves característiques, cal recordar el següent:

La cèl·lula solar és un generador de corrent i no pas de voltatge.

Aquest principi és molt important a l'hora d'entendre com es comporta la cèl·lula davant de les variacions dels principals paràmetres que l'afecten:

- Radiació solar incident
- Voltatge de treball
- Temperatura de treball

Figura 16. Gràfica representativa dels paràmetres elèctrics d'una cèl·lula fotovoltaïca



L'expressió més habitual i clara de mostrar el comportament de la cèl·lula solar és la potència elèctrica que pot generar a una radiació solar donada, generalment  $1.000 \text{ W/m}^2$  i en funció del voltatge al qual permeti treballar la càrrega, és a dir, en funció de la impedància que hagi d'alimentar.

Aquesta corba (figura 16) ens permet descriure alguns punts característics per tal de catalogar, definir i comparar cèl·lules de diferents materials i/o fabricants.

A la figura anterior, es representa la corba  $I$ - $V$  representativa d'una cèl·lula fotovoltaïca, en aquesta corba es poden observar diversos paràmetres.

### **Corrent de curtcircuit ( $I_{cc}$ )**

Definim com a *curtcircuit* quan entren en contacte elèctric directe els dos pols d'un generador. Aleshores, la resistència es fa mínima i aplicant la llei d'Ohm el corrent es fa màxim.

$$I = \frac{V}{R}$$

En el cas de les cèl·lules fotovoltaïques, la cosa canvia, ja que són generadores de corrent (portadors). Tot i que la unió  $p$ - $n$  genera un potencial elèctric que permet la circulació d'electrons. Aquest potencial no és permanent i pot variar segons les condicions de la càrrega connectada.

En el cas del curtcircuit, el potencial de la cèl·lula cau a quasi  $0V$ ; per tant, la recombinació de portadors es fa mínima i el corrent generat s'aproxima al màxim possible en funció de la radiació solar incident.

Aquesta intensitat és perfectament suportable tant per al material com per a les connexions de la cèl·lula. Aquest valor correspon al tall de la corba  $I$ - $V$  amb l'eix de les ordenades, és a dir, la intensitat quan el voltatge és  $0$ .

Aquest valor s'identifica normalment com a  $I_{cc}$  o  $I_{sc}$ , de l'anglès *short circuit*.

### **Voltatge de circuit obert ( $V_{co}$ )**

Si la cèl·lula queda en circuit obert, és a dir, sense cap consum o càrrega per a alimentar, aleshores no hi ha circulació de corrent cap a l'exterior d'aquesta cèl·lula. Per tant:

$$I = 0A$$

Això implica que el valor de la intensitat d'obscuritat de la cèl·lula, referida a les recombinacions de portadors, s'iguala al corrent total generat.

En resum, quan la cèl·lula solar no té cap càrrega connectada i roman il·luminada, tots els portadors generats es recombinen en l'interior de la mateixa cèl·lula. Aquest efecte fa que la zona de transició entre el material  $p$  i  $n$  s'eixampli i, en conseqüència, el voltatge augmenti fins a un valor característic anomenat voltatge en circuit obert.

El valor de voltatge de circuit obert se simbolitza com a  $V_{co}$  o  $V_{oc}$  de l'anglès *open circuit*.

### **Punt de màxima potència (*pmp*)**

Observant el gràfic  $I-V$ , ens podem adonar fàcilment que a cada valor de voltatge de treball li correspon una intensitat de sortida. Si tenim en compte que treballem en corrent continu, aleshores podem definir la potència elèctrica lliurada per la cèl·lula com:

$$P = V \cdot I$$

Si expressem el voltatge en volts i la intensitat en ampers, aleshores el resultat vindrà donat en [W] watts.

Cada punt de la corba té un parell de valors  $I-V$  que li confereixen un valor diferent de potència instantània.

Geomètricament, cada valor de potència representa la superfície del rectangle format per les dimensions  $I-V$ . Entès això, és força senzill determinar que dels infinits rectangles que es poden traçar, n'hi ha un de superfície màxima. Aquest correspon al punt de treball anomenat **punt de potència màxima** i és clau a l'hora d'obtenir el màxim rendiment dels dispositius fotovoltaïcs.

Aquest punt també s'anomena **potència pic** quan fa referència als valors elèctrics obtinguts amb:

#### **Condicions estàndard:**

- $I$ : Radiació incident de  $1.000 \text{ W/m}^2$ .
- $tc$ : com a temperatura de la cèl·lula  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- **AM1.5**: és a dir, l'espectre radiomètric que s'obté del traspàs de la radiació per un volum d'aire equivalent a un cop i mig l'atmosfera perpendicular al Sol.



Aleshores, es diferencia indicant el valor i afegint a la unitat el subíndex  $p(W_p)$ .

El punt de màxima potència té, òbviament, associats uns valors d'intensitat i de voltatge específics i que designem com a:

- $I_{pmp}$ : Intensitat del punt de màxima potència
- $V_{pmp}$ : Voltatge del punt de màxima potència
- $W_p$ : Potència màxima o pic

Aquest valor de potència, igual que la corba  $I-V$ , varia a mesura que ho fa la radiació incident i la temperatura en la cèl·lula.

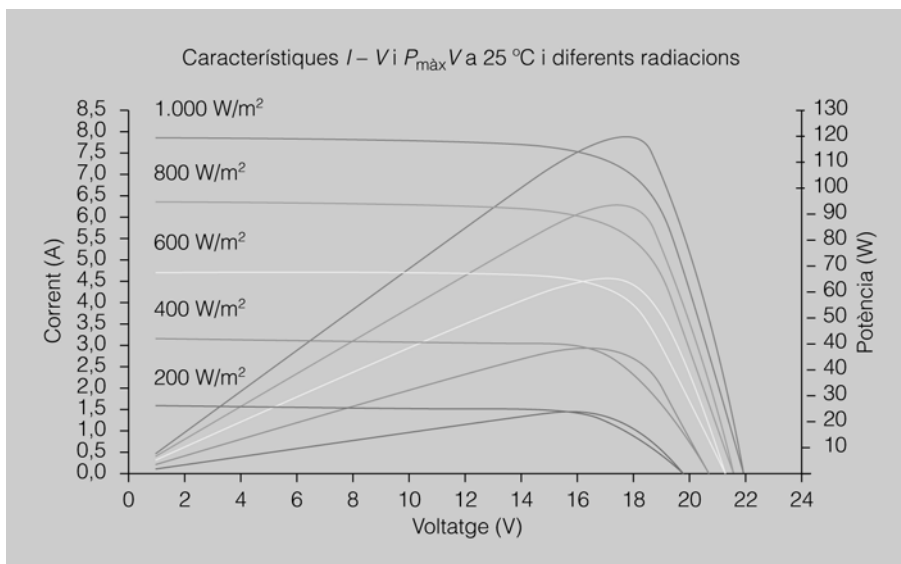
La potència lliurada és màxima de la cèl·lula i té associats uns valors d'intensitat i de voltatge únics i diferents als valors màxims absoluts que són la intensitat de curtcircuit i del voltatge en circuit obert.

### 1.7.3. Variacions de la corba en funció de la radiació incident

Per a un ampli rang de radiació solar, el corrent elèctric generat a les cèl·lules solars és directament proporcional a la intensitat de la radiació incident, com es pot observar a la figura 17.

En canvi, el voltatge de circuit obert es redueix lleugerament amb la radiació i augmenta també lleugerament quan aquesta ho fa. Aquesta variació és tan petita que, a efectes pràctics, podem menysprear-la.

Figura 17. La potència és pràcticament proporcional a la radiació incident, ja que la intensitat és proporcional i el voltatge és pràcticament estable.

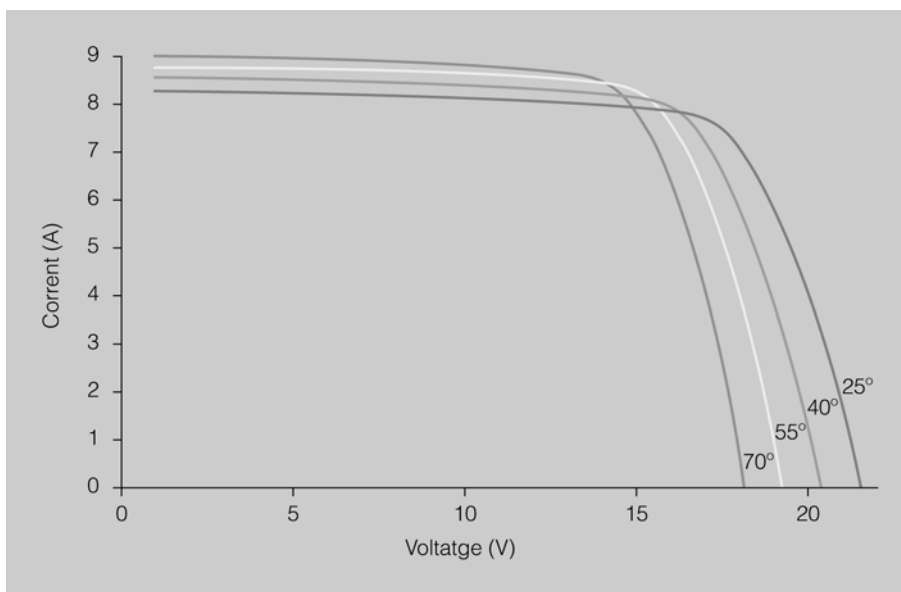


### 1.7.4. Variacions de la corba en funció de la temperatura de la cèl·lula

La temperatura és la mesura de l'activitat o d'agitació molecular dels cossos: com més temperatura, més mobilitat de partícules i, per tant, més facilitat d'alliberament dels electrons. Aquest fenomen físic fa que el voltatge de circuit obert disminueixi proporcionalment a un ritme aproximat de  $-2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ .

Aquesta caiguda del voltatge supera amb facilitat la recuperació d'intensitat; per tant, lluny del que intuïtivament la majoria de les persones pensen, a temperatures elevades, els mòduls fotovoltaïcs experimenten una forta caiguda del rendiment –com es pot observar en la figura 18, que mostra com amb l'augment de la temperatura disminueix la tensió del pànel i, en conseqüència, ho fa la potència generada. Aquest és un fenomen a tenir molt en compte a l'hora dels dissenys tant de les cèl·lules com de la seva col·locació.

Figura 18. Característiques I-V per a radiació de  $1.000 \text{ W/m}^2$  i diferents temperatures de cèl·lula



### 1.8. Tipologia de cèl·lules fotovoltaïques més esteses

Segons la naturalesa i les característiques dels materials usats, tenim diferents tipus de cèl·lules. El tipus més comú és la cèl·lula de silici cristal·lí (Si). Aquest material es talla en làmines molt fines anomenades oblies monocristal·lines o policristal·lines, en funció del procés de fabricació de la barra de silici.

La primera cèl·lula cristal·lina que es va fabricar en l'àmbit industrial és la de silici pur monocristal·lí. Aquestes cèl·lules presenten un bon rendiment energètic, però tenen un cost superior a la resta de tipologies. Per aquest motiu, en l'actualitat tenen un nivell d'implantació moderat.

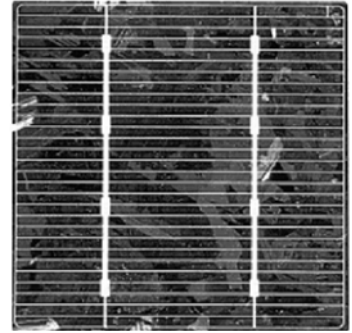


Cèl·lula monocristal·lina

Les cèl·lules monocristal·lines acostumen a presentar una forma quadrada, amb els cantells arrodonits. Antigament tenien forma circular. Això es deu al procés de creixement del cristall de silici monocristal·lí, que presenta una forma cilíndrica.

En el procés de fabricació del silici policristal·lí, el silici es deixa solidificar lentament en un motlle rectangular i se n'obté un sòlid rectangular amb molts cristalls, cosa que dóna lloc a les cèl·lules policristal·lines. Aquest tipus de cèl·lules tenen un rendiment inferior a les monocristal·lines, però actualment presenten una forta implantació perquè tenen un cost inferior al monocristal·lí.

En menys quantia, podem trobar en el mercat plaques fotovoltaïques anomenades de "capa fina". Aquestes no es fabriquen amb cèl·lules individuals, sinó que es fabriquen en forma de bandes contínues en què es disposa sobre un substrat apropiat (vidre o resines sintètiques) una capa fina de silici amorf (a-Si), d'1 o 2  $\mu\text{m}$  de gruix, i se'n fa una placa contínua que no necessita interconnexions interiors.



Cèl·lula policristal·lina

## 2. Elements de les instal·lacions fotovoltaïques

Les plaques fotovoltaïques en les instal·lacions fotovoltaïques és l'element captador de la radiació solar i l'encarregat de transformar l'energia solar en electricitat mitjançant l'efecte fotovoltaic.

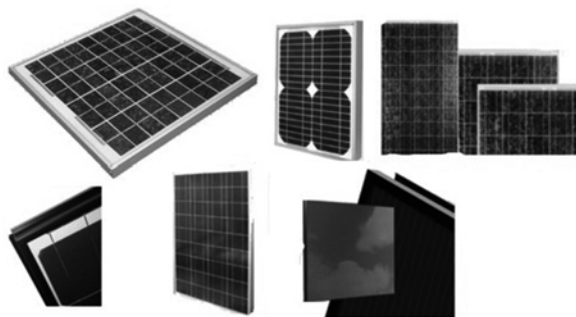
Tot i així, les instal·lacions fotovoltaïques requereixen tot un seguit d'elements complementaris, que són necessaris per a garantir la funcionalitat de la instal·lació, així com el control i la durabilitat d'aquesta.

### 2.1. Placa fotovoltaica

La cèl·lula solar només és capaç de generar una tensió d'unes dècimes de volt (+/-0,5V) i una potència màxima d'1 o 2 watts. Per tant, és necessari connectar en sèrie diverses cèl·lules (que es comporten com petits generadors de corrent) per a aconseguir tensions i potències adequades a les necessitats de les instal·lacions.

En aquest sentit les cèl·lules s'agrupen en configuracions majoritàriament en sèries, convenientment encaixades i protegides, que constitueixen la **placa fotovoltaica**, element de la instal·lació solar fotovoltaica encarregat de transformar d'una manera directa l'energia de la radiació solar en electricitat en forma de corrent continu.

Les característiques d'un mòdul fotovoltaic quedaran determinades per la tipologia de la cèl·lula, la superfície del mòdul i la connexió de les cèl·lules entre elles.



#### 2.1.1. Característiques elèctriques de la placa fotovoltaica

Les característiques elèctriques de la placa fotovoltaica, com en el cas de la cèl·lula, s'estableixen a partir d'unes condicions universals de treball

anomenades “condicions estàndards de mesura (CEM)”, concretades en els següents paràmetres:

- Irradiància solar  $1000 \text{ W/m}^2$
- Distribució espectral: AM 1,5 G
- Temperatura de la cèl·lula  $25^\circ\text{C}$

Basant-se en aquestes condicions de mesura, s'estableix la **potència nominal o pic de la placa** i alhora es descriu la corba característica del mòdul intensitat-tensió ( $I$ - $V$ ), dades que s'han de reflectir en l'etiqueta de característiques de la placa.

Com en la cèl·lula fotovoltaica podem identificar els següents paràmetres elèctrics bàsics de la placa fotovoltaica:

- **Potència nominal del mòdul:** La potència nominal de la placa quedarà determinada pel punt de màxima potència amb una radiació de  $1000 \text{ W/m}^2$ , de manera que aquest valor és el valor estàndard de prova i d'homologació de les plaques.
- **Intensitat de màxima potència ( $I_{max}$ ):** És el valor de la intensitat que pot oferir el mòdul quan les condicions de càrrega li permeten treballar a la seva màxima potència.
- **Tensió de màxima potència ( $V_{max}$ ):** És el valor de la tensió que pot oferir el mòdul a la seva màxima potència.
- **Intensitat de curtcircuit ( $I_{sc}$ ):** És el corrent que produeix el mòdul quan és forçat a treballar a un voltatge zero, és a dir, amb un curtcircuit en els seus contactes elèctrics. A nivell experimental, es mesura amb un amperímetre connectat a la sortida dels borns del mòdul. El valor varia de forma proporcional en funció de la radiació solar a la qual està exposat. És important saber que aquesta mesura no és destructiva, ja que la intensitat resultant és la màxima que poden produir les cèl·lules i per a la qual estan preparades.
- **Tensió de circuit obert ( $V_{oc}$ ):** És la tensió màxima que pot donar el mòdul, obtinguda quan no hi ha cap càrrega connectada (circuit obert, corrent zero). Aquest valor s'obté amb un voltímetre en els seus terminals quan no hi ha un altre element connectat. El valor obtingut pot ser més gran que el valor de la tensió nominal del mòdul i, per tant, cal usar una escala adequada.

### 2.1.2. Connexions de plaques

Tenint en compte que la potència d'una placa FV té un valor fix, quan es calculen les potències d'una instal·lació, sovint cal fer servir un determi-

nat nombre de plaques solars fotovoltaïques per assolir la potència i tensió necessària.

En aquest cas les connexions d'aquestes plaques segueixen les normes bàsiques de les connexions elèctriques: es poden connectar en sèrie, en paral·lel i combinant les dues per tal d'aconseguir sumar la potència dels mòduls connectats i adaptar el funcionament al voltatge del circuit de consum.

### 2.1.3. Connexions en sèrie de plaques FV

En aquest tipus de connexió, es connecta el terminal positiu d'un mòdul al terminal negatiu del mòdul següent i així successivament fins a acabar la sèrie completa. La sortida del conjunt serà entre el terminal positiu del darrer mòdul i el negatiu del primer.

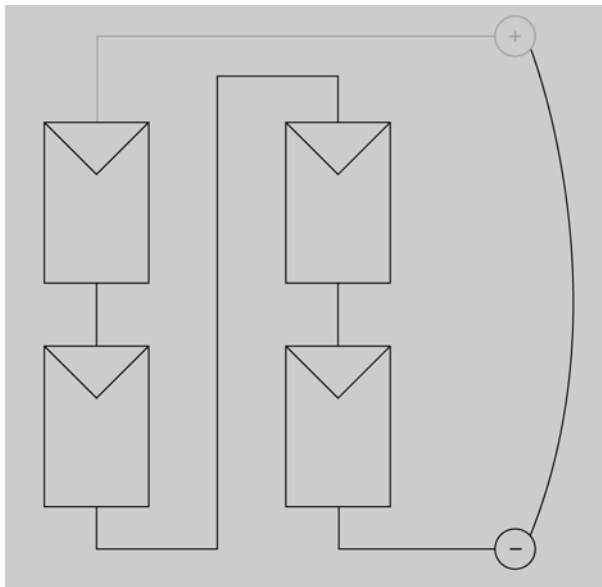
La intensitat de corrent d'aquesta connexió es manté constant i igual a la d'un mòdul, de manera que l'augment de potència s'aconsegueix mantenint la intensitat que pot donar un mòdul i augmentant la tensió. Aquesta és igual a la suma de totes les tensions dels mòduls connectats (figura 19).

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

$$I_{total} = I_1 = I_2 = I_3 = I_4$$

Figura 19. Connexió de 4 plaques en sèrie



### 2.1.4. Connexions en paral·lel de plaques FV

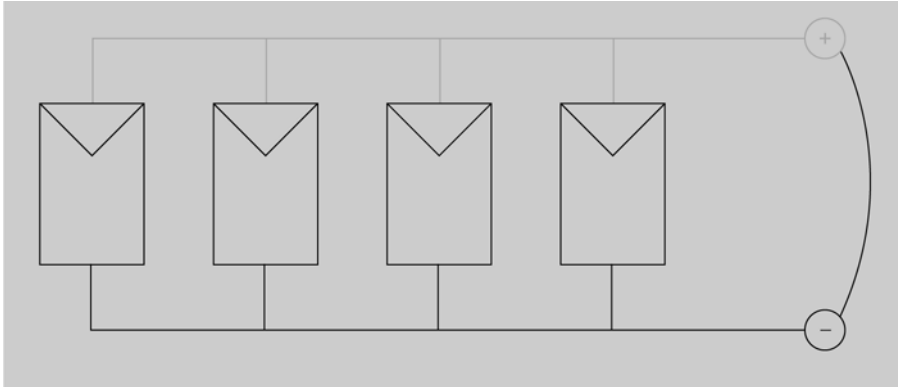
Consisteix a connectar, d'una banda, els terminals positius de tots els mòduls i, de l'altra, tots els terminals negatius. La sortida del conjunt serà entre el terminal positiu i el negatiu de qualsevol mòdul.

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$V_{total} = V_1 = V_2 = V_3 = V_4$$

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

Figura 20. Connexió de quatre plaques en paral·lel



En la connexió en paral·lel (figura 20) la intensitat elèctrica generada en el mòdul fotovoltaic se suma a la generada pels altres mòduls, de manera que l'augment de potència es basa en el manteniment del voltatge que pot donar un mòdul i la suma d'intensitats generades pel voltatge dels mòduls connectats.

Cal destacar que l'augment d'intensitat produeix un augment de les pèrdues per efecte Joule (escalfor dels conductors), fet que obliga a muntar conductors de molta secció per tal que puguin suportar intensitats elevades.

### 2.1.5. Connexions mixtes de plaques FV

Sovint fem connexions mixtes sèrie-paral·lel, atès que hem de treballar a un voltatge determinat i tindrem un nombre concret de mòduls. En aquest cas, connectem en sèrie el nombre de mòduls que ens generi el voltatge de funcionament i connectarem en paral·lel el nombre de grups que faci falta per a assolir la potència necessària, amb una configuració com la que podeu observar en la figura 21.

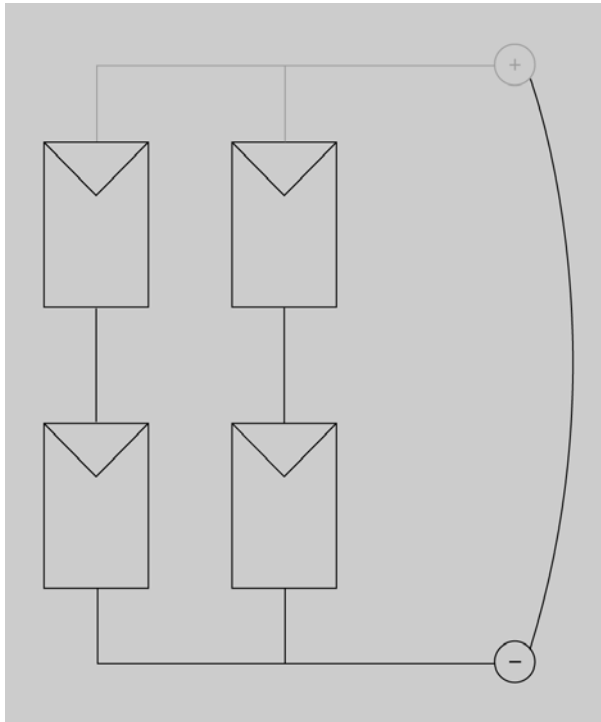
$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$V_{total} = (V_1 + V_2) = (V_3 + V_4)$$

$$I_{total} = (I_1 = I_2) + (I_3 = I_4)$$

Cal destacar que el fet d'agrupar grups de plaques en sèrie fa que si alguna de les plaques té menor producció que la resta, tota la seva línia es veurà afectada.

Figura 21. Connexió de quatre plaques mixta



### 2.1.6. Díodes de pas a les plaques fotovoltaïques

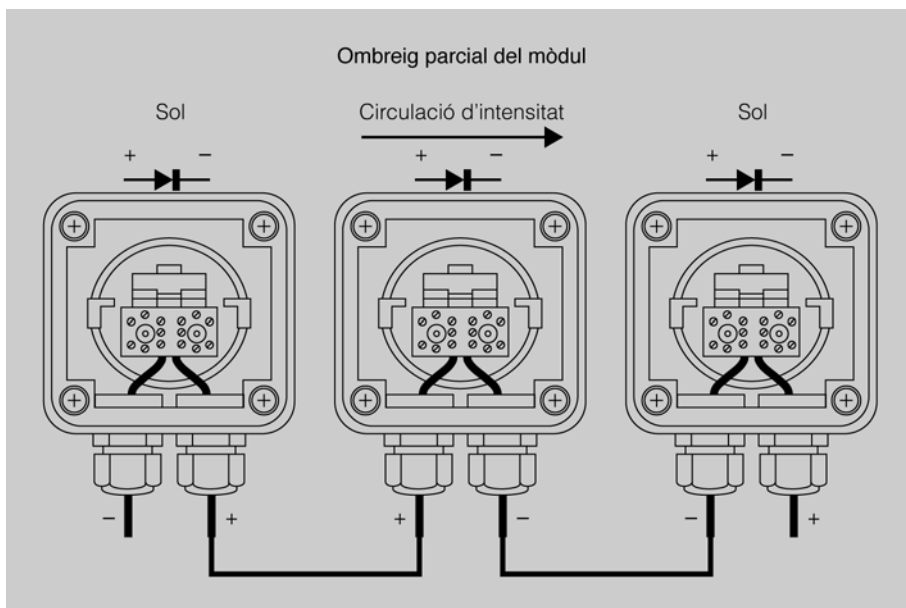
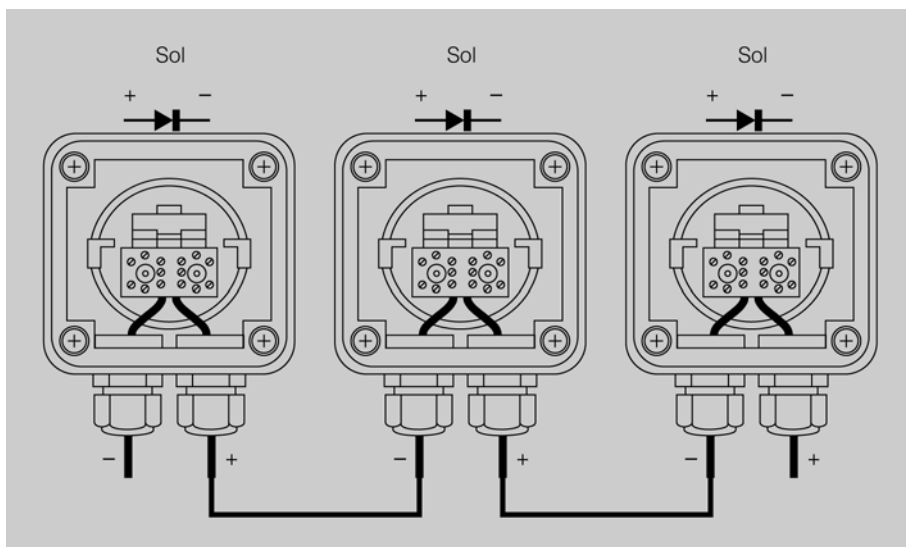
Les caixes de connexions dels mòduls disposen d'un **díode (*bypass*)**, connectat antiparal·lel entre els seus borns. Aquest díode dona un pas alternatiu al corrent generat pels mòduls connectats en sèrie en cas de fallada d'aquest, ja sigui per avaria o perquè li toca l'ombra.

En situacions d'ombrejament les cèl·lules o plaques es converteixen en una càrrega resistiva que dificulta el pas del corrent generat per les altres plaques o cèl·lules de la sèrie. Tota la filera en sèrie queda fora de servei o en baixa producció, cosa que perjudica el rendiment de la instal·lació en consumir energia per efecte Joule.

Per exemple en el cas d'ombrejament d'una placa connectada en una sèrie de plaques, aquesta passaria a ser consumidora i, per tant, restaria voltatge en comptes de sumar a la sèrie. Aleshores, el díode de la placa afectada quedarà polaritzat i serveix de pont al pas del corrent elèctric, tal com s'indica a la figura 22.

Quan la placa és alliberada són il·luminats pel Sol, el flux de corrent elèctric passa a través de les cèl·lules que integren el mòdul. No pot passar a través del díode, ja que la seva polaritat és inversa i té l'ànode (+) a un voltatge inferior al càtode (-), tal com es mostra en la figura 23.



Figura 22. Díode *bypass* actuantFigura 23. Díode *bypass* inversament polaritzat

## 2.2. Estructures de suport de les plaques

L'estructura de suport de les plaques és un dels elements de la instal·lació que estarà sotmès a importants esforços mecànics i a un alt nivell d'agressió ambiental. Per això cal que aquests factors es considerin en el disseny i en el muntatge d'una instal·lació solar fotovoltaica, per tal de reduir la fatiga mecànica i la degradació de l'estructura.

En aquest sentit es poden utilitzar una sèrie de materials força específics per a les estructures de suport, entre els quals cal destacar: l'acer inoxidable, l'alumini, el ferro galvanitzat amb una capa protectora de com a mínim 80 micres, fusta tractada, etc. Però el cargolam haurà de

ser d'acer inoxidable, que haurà de complir la norma MV-106. En el cas que l'estructura sigui galvanitzada, s'admetran cargols galvanitzats, exceptuant la subjecció dels mòduls a la mateixa estructura, que seran d'acer inoxidable.

Pel que fa al tipus d'ancoratge per a una estructura de suport, aquest dependrà del format de la base de què disposem (coberta, terrat, façana o sobre un tub). També dependrà de les forces que hi actuïn a sobre com a conseqüència de la pressió del vent a què es trobi sotmès.

En cas de muntatge sobre cobertes planes l'opció més segura es basa en la utilització de peces de formigó prefabricat per a l'ancoratge. Aquestes peces donen estabilitat a l'estructura a causa del seu pes únicament; per tant, no serà necessari perforar la coberta.

Per a instal·lacions petites, el mercat ofereix unes solucions senzilles, pràctiques i barates, que consisteixen en *calaixos de plàstic* que s'omplen de material pesant (runa, sorra, pedres, blocs de ciment...) a sobre dels quals es fixen les plaques.

En els casos en què les cobertes siguin d'uralita o bé siguin cobertes metàl·liques, s'haurà d'estudiar la possibilitat d'incorporar una estructura autosuportant subjectada sobre les columnes laterals o les bigues transversals.

### 2.2.1. Estructures mòbils

Les estructures mòbils amb accionament manual estan totalment desaconsellades perquè necessiten un seguiment intensiu per part de l'usuari i això s'ha demostrat del tot ineficaç.

D'altra banda, hi ha sistemes de suport mòbils d'accionament automàtic que permeten el seguiment continu de la trajectòria solar mitjançant posicionadors electromecànics.

Aquests sistemes tenen una bona implantació en grans instal·lacions fotovoltaïques de connexió a la xarxa perquè poden augmentar la producció energètica fins a un 35%, sempre que l'estructura i el mecanisme de seguiment garanteixin una bona solidesa mecànica, siguin robustes i ofereixin fiabilitat.

Però en aquest cas, caldrà avaluar altres factors en la implantació d'aquestes estructures com poden ser: l'augment del cost global de la instal·lació



Plaques fotovoltaïques, ancorades sobre lloses de formigó sobreposades a la coberta



Estructures muntades sobre coberta sandvitx

i l'augment d'ocupació d'espai, que en el cas del muntatge de diverses unitats la projecció d'ombres d'aquests equips augmentarà entre un 30% i 70% respecte a la projecció d'ombra de les estructures fixes.

Per aquest motiu, tot i que els sistemes de seguiment solar permeten un augment de la producció només seran recomanables en les instal·lacions en què el balanç econòmic cost instal·lació-producció energètica sigui veritablement favorable als sistemes amb seguiment o en els casos que el seguiment sigui un requeriment del tipus de placa a utilitzar.

Pel que fa a tipologies de seguidors solars, podem diferenciar bàsicament:

- Els seguidors d'un eix
- Els seguidors a dos eixos



Seguidor solar de dos eixos

Per a identificar la resta d'elements de les instal·lacions fotovoltaïques caldrà diferenciar clarament les següents aplicacions fotovoltaïques:

- Instal·lacions fotovoltaïques autònomes
- Instal·lacions fotovoltaïques connectades a la xarxa

Cada una d'aquestes tipologies cobreix un tipus de necessitats ben diferenciades i requerint elements força diferenciats.

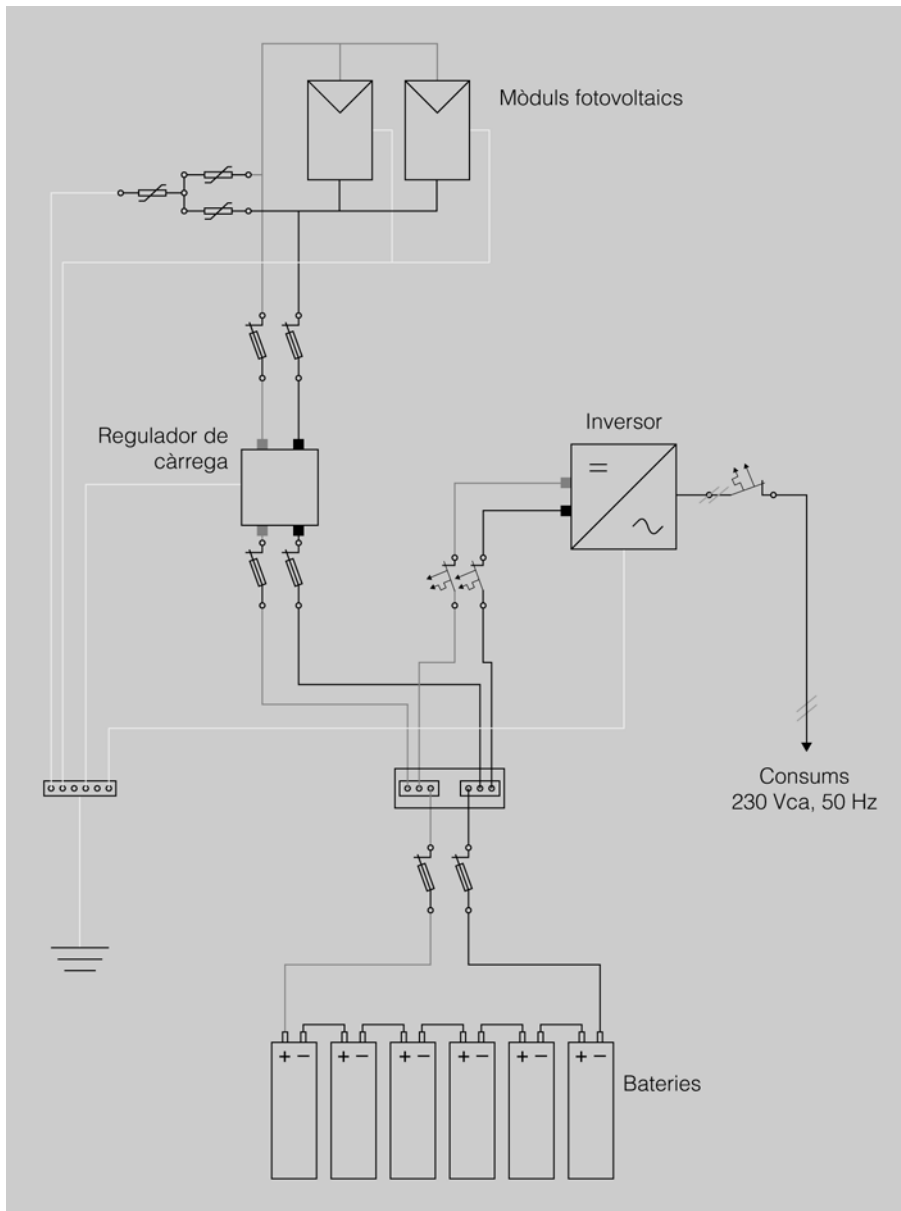
### **2.3. Elements específics de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes**

Les instal·lacions fotovoltaïques autònomes estaran destinades al subministrament elèctric allà on el cost del manteniment i instal·lació de les línies elèctriques no és rendible, és a dir, per a instal·lacions aïllades de la xarxa elèctrica.

Les instal·lacions solars fotovoltaïques autònomes (figura 24) disposaran dels següents elements bàsics:

- Acumuladors d'energia elèctrica
- Reguladors de càrrega
- Convertidors d'energia elèctrica per a aplicacions autònomes

Figura 24. Esquema de referència d'una instal·lació fotovoltaica autònoma



### 2.3.1. Acumuladors d'energia elèctrica o bateries

En les instal·lacions fotovoltaïques autònomes, cal emmagatzemar l'energia captada durant les hores de radiació solar a fi de poder cobrir el subministrament durant les hores que no n'hi ha (cicle diari i cicle estacional).

Per això les instal·lacions fotovoltaïques autònomes requereixen sistemes d'acumulació d'energia que:

- **Subministraran energia en absència de radiació:** nits i dies amb núvols, cicle diari i cicle estacional.
- **Mantindran estable de voltatge la instal·lació:** La tensió a la sortida de les plaques varia en funció de la radiació incident i la càrrega connectada.

da, per la qual cosa la connexió directa a plaques no és massa viable en la major part de les ocasions.

- **Subministraran una potència instantània**, o durant un temps limitat, superior a la que el camp de plaques podria generar encara en el millor dels casos. És el cas de l'engegada de motors, com per exemple pot ser el motor d'una nevera.

### Tipus d'acumuladors

Tot i que hi ha acumuladors de diferents tecnologies, com ara, les bateries alcalines de Níquel-Cadmi, Redox, etc., per raons econòmiques, els acumuladors emprats en energia solar fotovoltaica són en un 99% del tipus plom-àcid, és a dir que són formats per uns elèctrodes (plaques) de plom com a material bàsic immersos en una solució electrolítica (aigua amb àcid sulfúric).

D'entre els acumuladors electroquímics de plom àcid disponibles en el mercat cal destacar dues tipologies:

- **Acumuladors compactes o tipus monobloc** (figura 25) (semblants a les bateries d'engegada): cal evitar la utilització de bateries d'engegada tret d'instal·lacions petites i sempre que sigui possible rebaixar la densitat de l'electròlit, perdent capacitat, però disminuint la corrosió en l'ànode (pol +) i per tant guanyant durabilitat.

Figura 25. Bateries compactes



- **Acumuladors estacionaris** (figura 26) (construïts amb plaques tubulars i reixes amb baix contingut d'antimoni): són els ideals per a instal·laci-

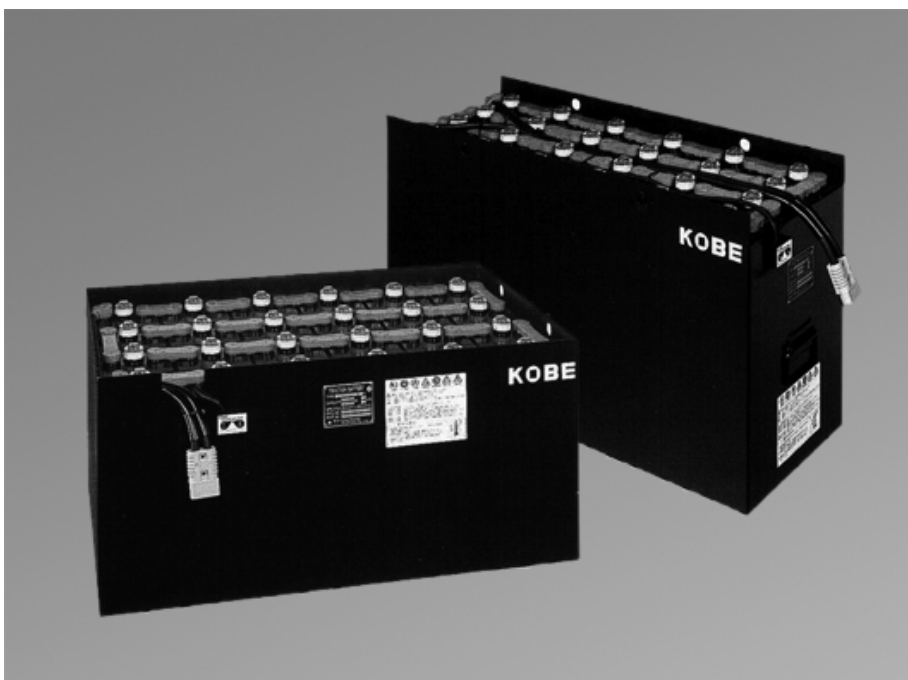
ons solars, atès que han estat dissenyades per a ser descarregades lentament i recarregades quan hi hagi disponibilitat d'energia.

Figura 26. Bateria estacionària de gran capacitat per a una instal·lació solar



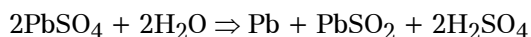
- **Les bateries de tracció** (figura 27) (estan pensades per a moure vehicles i carretons elèctrics): són més econòmiques que les estacionàries i poden donar un bon servei en instal·lacions fotovoltaïques, sempre que es tingui en compte que requereixen un manteniment més freqüent.

Figura 27. Bateries de tracció muntades en un rac metàl·lic



## Principi bàsic de funcionament de la bateria de plom àcid

Quan un acumulador de plom-àcid rep corrent elèctric, el sulfat de plom adherit a les plaques es transforma en plom que continua en les plaques i en àcid sulfúric que passa a l'electròlit, tal com reflecteix la següent fórmula de procés.



En el moment de la descàrrega el procés s'inverteix; per tant, l'àcid sulfúric es combina amb el plom de les plaques fins a formar sulfat de plom.

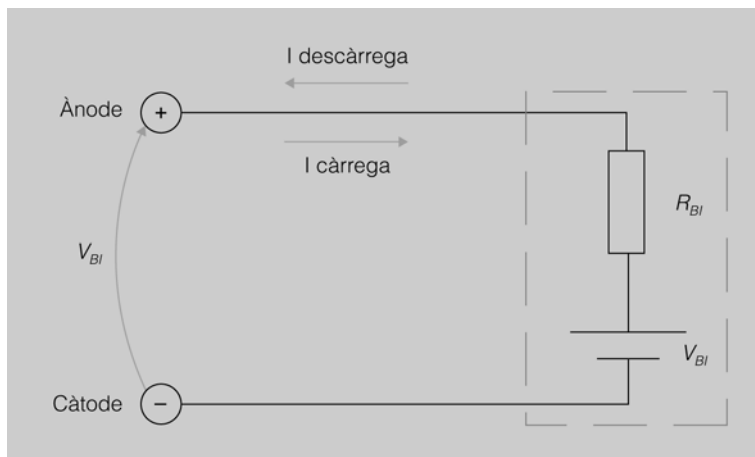


## Circuit equivalent

Al conjunt format per una parella d'elèctrodes (ànode o positiu fet de diòxid de plom,  $\text{PbO}_2$ ) i (càtode o negatiu fet de plom) en bany electrolític (aigua destil·lada amb una concentració d'1/3 d'àcid sulfúric) se l'anomena **cel·la** o **vas de bateria** i té com a característica principal la capacitat de mantenir una diferència de potencial elèctric nominal de 2 V (variable en un cert rang en funció del seu estat de càrrega, 1,85 a 2,40 V).

La bateria és, doncs, un generador de voltatge, a diferència de la cèl·lula solar, que ho és d'intensitat. Les bateries reals es diferencien de les ideals o teòriques, en què porten associada una resistència en sèrie amb el generador de voltatge, tal com es pot apreciar en la figura 28.

Figura 28. Circuit equivalent d'una bateria



Aquesta resistència sèrie, interna, provoca caigudes de tensió segons la llei d'Ohm quan és travessada pel corrent, tant en el procés de càrrega com de descàrrega.

De manera que podem definir el voltatge de la bateria en funció de l'estat en què es trobi de la següent manera:

- **Voltatge en repòs:** és el voltatge en el moment en què la bateria no rep càrrega ni tampoc alimenta consums, aleshores  $V_B$  serà igual al  $V_{BI}$ , ja que en no passar intensitat no hi ha caiguda de tensió per efecte de la resistència sèrie.
- **Voltatge en càrrega:** és el voltatge quan la bateria rep corrent dels mòduls solars, aleshores  $V_B$  és igual al  $V_{BI}$  més la caiguda de tensió en la resistència sèrie; per tant, aquest valor sempre serà superior al voltatge de repòs.
- **Voltatge en descàrrega:** és el voltatge de la bateria quan aquesta alimenta els consums, aleshores  $V_B$  serà igual a  $V_{BI}$  menys la caiguda de tensió en la resistència interna; per tant, sempre serà inferior a la de repòs.

A mesura que anem carregant la bateria, hi ha més concentració d'àcid de sulfúric en l'electròlit i, per tant, augmenta el valor de  $V_{BI}$ , mentre que baixa el valor de la resistència interna.

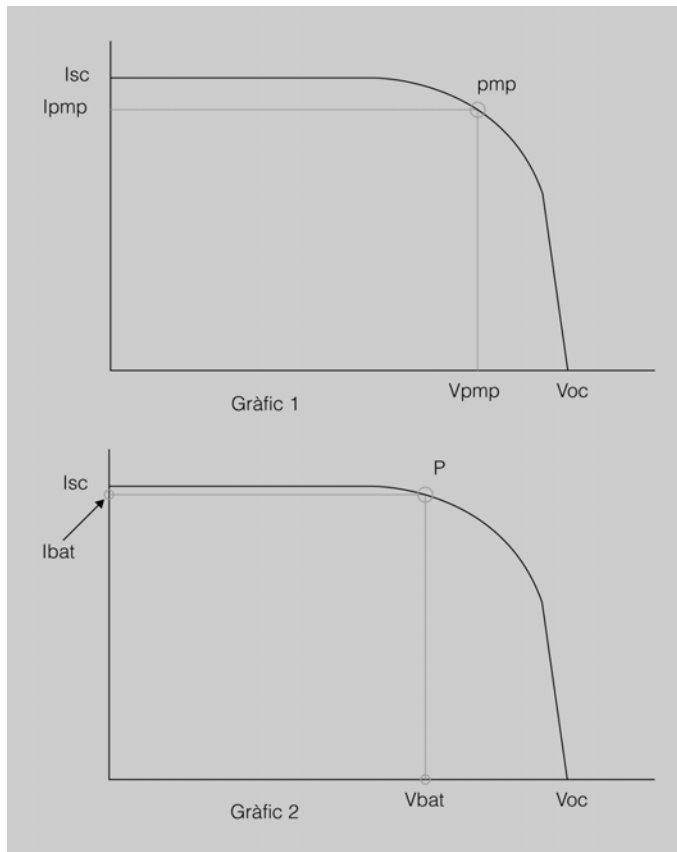
Quan la bateria s'està descarregant, aleshores el procés s'inverteix, cada cop hi ha més sulfat adherit a les plaques de plom i menys àcid dissolt, baixa el valor de  $V_{BI}$ , mentre que augmenta la resistència interna al pas del corrent.

En aquest sentit és important conèixer que, quan es connecta l'acumulador als mòduls FV, el voltatge de l'acumulador determina el voltatge de funcionament dels mòduls. Així, doncs, la corba de funcionament dels mòduls tindrà un punt de funcionament condicionat per la tensió de l'acumulador i no a l'inrevés, de manera que el valor de la potència que dona el mòdul s'ajusta en funció de la tensió de l'acumulador connectat.

El primer gràfic de la figura 29 mostra una corba  $I-V$  típica d'una placa fotovoltaica indicant el punt de màxima potència, mentre que en el segon gràfic es mostra la corba de la mateixa placa però s'indica la potència de treball de la placa amb una tensió condicionada per l'acoblament sobre una bateria. Com es pot observar, la potència emesa per la placa acoblada a la bateria és inferior a la que es pot obtenir si es treballen en el punt de màxima potència.



Figura 29.



### Paràmetres identificatius d'una bateria

Un cop establerta la tipologia i format de l'acumulador, cal identificar els paràmetres característics d'aquest, que permetran definir el funcionament de l'equip en la instal·lació i els requeriments de manteniment.

Podem resumir com a paràmetres més significatius:

- **Capacitat (Ah):** màxima quantitat d'electricitat que pot emmagatzemar. En la pràctica, i per a evitar danys irreversibles a la bateria, tan sols pot proporcionar una part de la capacitat total, que anomenem **capacitat útil**. La capacitat útil depèn del tipus d'acumulador i de les condicions de treball, però sol tenir valors des del 40% fins al 80% de la capacitat màxima.

La quantitat d'electricitat que pot proporcionar un acumulador també depèn del temps de descàrrega, de manera que la capacitat serà més gran com més lentament es produeixi la descàrrega.

La capacitat de la bateria s'expressa en **ampers hora (Ah)**. Valors associats a C5, C25, C100, que representa els temps de descàrrega sobre el qual s'ha establert la capacitat de la bateria (C5 = descàrrega en 5 hores).

- **Profunditat de descàrrega:** és el tant per cent sobre la capacitat màxima de l'acumulador que es pot extreure de la bateria en condicions normals. És un terme molt variable que depèn molt del tipus d'acumulador i que influeix en la seva vida útil.
- **Vida útil:** se sol mesurar en cicles (més que en anys), de manera que un cicle és un procés complet de càrrega-descàrrega (fins a arribar a la profunditat de descàrrega recomanada). Si suposem un cicle mitjà d'un cicle per dia i un acumulador ben mantingut, hauria de durar un mínim de 10 anys.
- **Autodescàrrega:** és un fenomen pel qual un acumulador, per causes diverses, es descarrega lentament però de manera contínua i sense estar connectat a un circuit extern.

### 2.3.2. Regulador de càrrega

A primera vista sembla que una instal·lació solar fotovoltaica només necessiti mòduls fotovoltaics (per a la generació del corrent elèctric) i d'acumuladors (per a emmagatzemar l'electricitat fins al moment que calgui consumir-la). Tot i que aquest concepte intuïtiu podria ser vàlid, hi ha un element clau en les instal·lacions, que és l'encarregat que tant el procés de càrrega com descàrrega dels acumuladors es realitzi de manera que l'acumulador estigui sempre dins de les condicions correctes de funcionament. Aquest element és el regulador de càrrega.

Cal considerar que les plaques solars es dissenyen perquè puguin donar una tensió més elevada que la tensió de final de càrrega de les bateries. Així, s'assegura que les plaques sempre estan en condicions de carregar la bateria, fins i tot quan la temperatura de les cel·les de la bateria sigui alta i es produeixi una disminució del voltatge generat.

Aquesta sobretensió té **dos inconvenients:**

- 1) D'una banda, es perd una petita part de l'energia màxima teòrica, que pot donar la placa (10%), que s'obtidria si treballés a tensions una mica més altes que les que imposa la bateria.
- 2) D'altra banda, quan la bateria arribi al seu estat de plena càrrega, la placa seguirà aportant energia a la bateria, cosa que produirà una sobrecàrrega que perjudicarà la bateria i que la pot fer malbé.

El regulador de càrrega (figura 30) s'encarrega de regular el corrent que absorbeix la bateria per tal que mai se sobrecarregui perillosament. Per aquest motiu, detecta i mesura constantment el voltatge de la bateria, me-

sura el seu estat de càrrega i, si aquest arriba a un valor de consigna prèviament establert corresponent al valor de tensió màxima admesa, actua tallant el flux de corrent cap a la bateria o bé deixa que en passi tan sols una part per mantenir-la en estat de plena càrrega, sense sobrepassar-se. Aquest corrent mínim s'anomena **de flotació** i es dona quan la bateria està a plena càrrega i rep només l'energia suficient per a mantenir-la en aquest estat (que en períodes llargs compensarà l'autodescàrrega).

Figura 30. Regulador de càrrega per a instal·lacions fotovoltaïques



La funcionalitat bàsica del regulador en una instal·lació fotovoltaica es concretarà en:

- **Protecció contra sobrecàrregues de l'acumulador (tall per alta):** aquesta és la funció bàsica del regulador. Evita que la bateria s'escalfi, que es perdi aigua de l'electròlit per evaporació.
- **Desconnexió per bateria baixa (tall per baixa):** aquesta funció fa que el regulador talli el subministrament de corrent cap als consums en corrent continu si el nivell de càrrega de l'acumulador és massa baix; per tant, corre el perill d'una descàrrega profunda, fet que originaria problemes de sulfatació.
- **Protecció contra curtcircuits:** aquesta funció permet, mitjançant un fusible, protegir el regulador mateix, així com la sortida de l'acumulador de patir intensitats elevades en cas de curtcircuit en algun dels circuits de consum de la instal·lació.
- **Díode de bloqueig,** que permet el pas de corrent en un sol sentit des de les plaques a la bateria i no en sentit contrari. Aquest díode és necessari quan la radiació és baixa i la tensió de la bateria és superior a la de

les plaques, així s'evita que la bateria es descarregui per les plaques solars. És important no confondre aquest díode de bloqueig amb el díode de *bypass* (variant) de les plaques, ja que les funcions que realitzen són ben diferents.

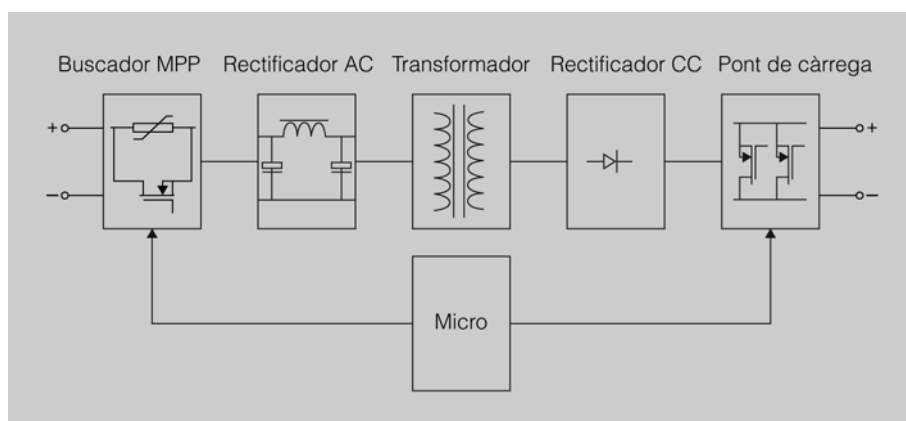
- **Visualització de funcions:** la majoria de reguladors tenen algun sistema visual que permet obtenir informació sobre l'estat de la instal·lació, bé sigui simplement amb uns indicadors dient que les plaques estan donant corrent, si la bateria està carregada o descarregada, o bé més acuradament per mitjà d'indicadors dels nivells actuals de càrrega, voltatge de bateries...

## Tipus de reguladors

Tot i que hi ha reguladors de diferents tecnologies, per raons d'adaptació del mercat, actualment predominen les dues tecnologies següents:

- **Reguladors tipus sèrie:** Aquest tipus de reguladors basen el seu funcionament en la interrupció del corrent cap a la bateria, segons el seu voltatge. Actualment, gràcies als microprocessadors, aquest interruptor és progressiu, de manera que es pot comandar per a poder tenir diferents nivells de càrrega. El corrent de flotació es pot fer mantenint un nivell baix d'intensitat de càrrega o bé commutant moments de càrrega i moments de no-càrrega per tal d'afavorir la gasació de la bateria. Aquest tipus de reguladors es connecten en sèrie entre les plaques i la bateria i, com que no dissipen calor, poden ser més aviat petits i poden anar muntats en llocs tancats si fos necessari.
- **Reguladors amb seguiment de màxima potència** (figura 31): Aquesta és la versió més sofisticada dels reguladors que hi ha al mercat, ja que incorpora un convertidor DC/DC a la sortida dels mòduls solars, cosa que permet aïllar el voltatge de treball dels mòduls del voltatge de les bateries. D'aquesta manera, els mòduls poden treballar en el seu punt de màxima potència i, per tant, al màxim rendiment possible.

Figura 31. Circuit equivalent d'un regulador amb seguiment de màxima potència



### 2.3.3. Convertidors d'energia elèctrica cc/ca per a aplicacions autònomes

En les instal·lacions fotovoltaïques autònomes que requereixen un subministrament d'energia elèctrica en corrent altern, caldrà incorporar-hi equips que transformin el corrent continu amb valors baixos de tensió subministrats per les bateries en corrents alterns de valors de tensió normalitzats en baixa tensió (230 V monofàsics o 400 V trifàsics). Aquests equips són els **inversors** (també coneguts com a **onduladors**).

Figura 32. Convertidor cc/ac per a instal·lacions autònomes



#### Requeriments bàsics del convertidor per a instal·lacions autònomes

En les instal·lacions fotovoltaïques els convertidors (figura 32) han de garantir un subministrament d'energia elèctrica en AC, d'una qualitat equivalent a la que s'exigeix a la xarxa elèctrica convencional. Per això cal que en la selecció dels convertidors es considerin els següents paràmetres com a imprescindibles per al bon funcionament de la instal·lació:

**1) Estabilitat del voltatge de sortida/entrada:** s'admeten variacions de fins al 10% per a convertidors d'ona quadrada i del 5% per a convertidors d'ona sinodal. Són valors que les normes admeten per al voltatge de les xarxes elèctriques convencionals, independentment de la potència demanada per al consum. D'altra banda, en instal·lacions amb acumuladors, la tensió d'entrada no podrà ser mai superior al 125% ni inferior al 85% de la tensió nominal d'entrada del convertidor.

**2) Tipus d'ona:** normalitzat amb una *ona sinodal pura*.

**3) Capacitat de sobrecàrrega (potències punta) i de protecció tèrmica:** molt útil en instal·lacions amb motors, ja que en el moment d'engegada es pot duplicar la potència necessària per al funcionament nominal, encara que només durant uns segons. Cal tenir en compte que qualsevol motor, a l'hora d'engagar, pot consumir un corrent fins a cinc vegades la intensitat nominal i que, per regla general, aproximadament és de tres vegades.

**4) Eficiència energètica o rendiment del convertidor:** és la relació entre l'energia que facilita el convertidor als consums en corrent altern i l'energia que necessita aquest convertidor d'entrada (de la bateria). Si el convertidor dissenyat per a una potència determinada treballa en una fracció d'aquesta potència, el rendiment baixarà. S'ha d'exigir **a un convertidor sinodal un rendiment del 70% treballant a un 20% de la potència nominal i del 85% quan treballi a una potència superior al 40% de la nominal.**

**5) Engedada automàtica i estat en espera:** permet que les parts de potència del mateix convertidor es disconnectin en absència de consums i es tornin a connectar en el moment que detectin una demanda energètica per sobre d'un nivell llindar prèviament fixat.

**6) Protecció contra la inversió de polaritat i curtcircuits:** opcions bàsiques, ateses les possibilitats d'error o de funcionament defectuós dels circuits de consum que són elevades durant la vida del convertidor.

**7) Baixa distorsió harmònica:** paràmetre relacionat amb la qualitat de l'ona generada. Els harmònics normalment s'eliminen per mitjà de filtres, encara que això comporti pèrdues. La variació de la freqüència de la tensió de sortida serà inferior al 3% de la nominal.

**8) Possibilitat de ser combinat en paral·lel:** permetrà un possible creixement de la instal·lació i de la potència de consum.

**9) Bon comportament amb la variació de la temperatura:** marge d'operació entre  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

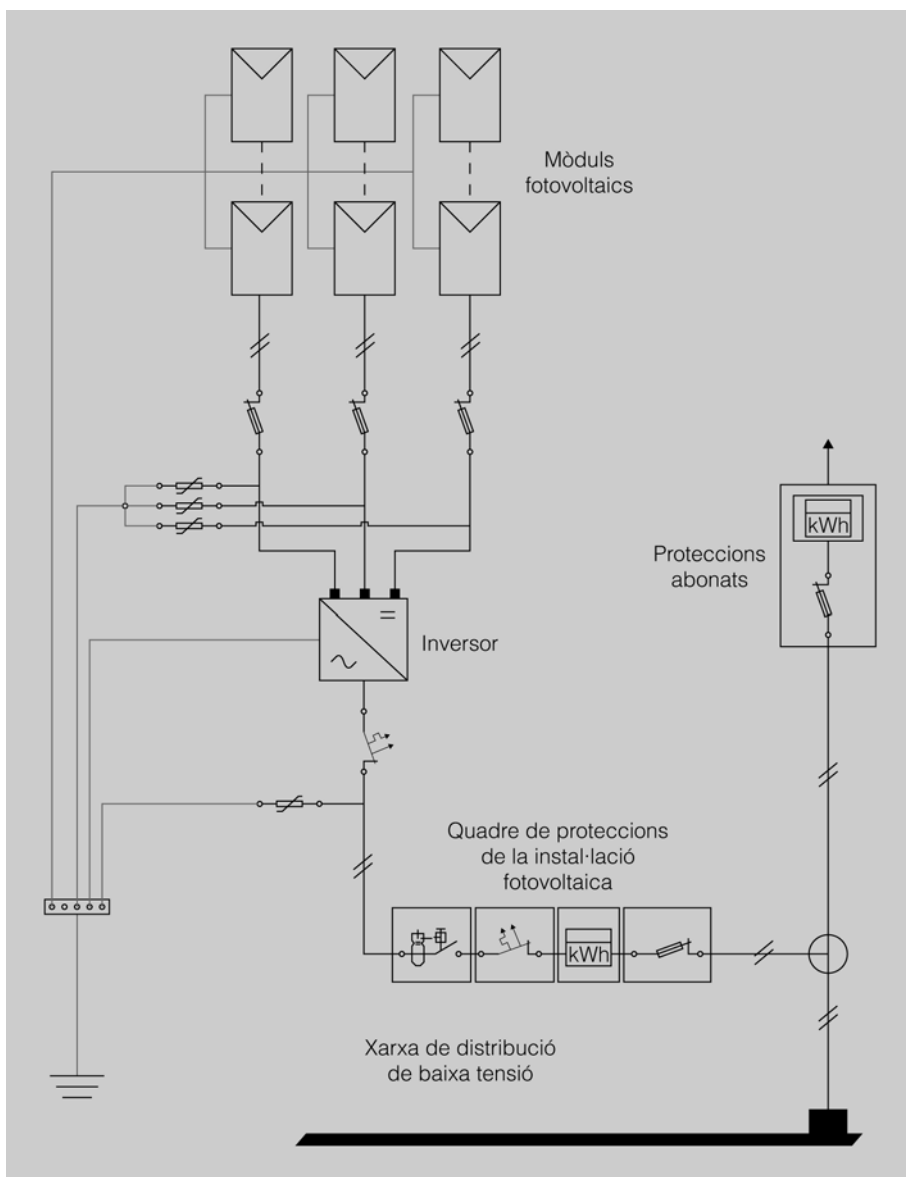
Evidentment aquestes instal·lacions hauran d'incorporar totes les proteccions elèctriques normalitzades per a aquest tipus d'instal·lacions, tal com es recull en les ITC corresponents.

## **2.4. Elements específics de les instal·lacions fotovoltaïques connectades a la xarxa**

Aquesta tipologia d'instal·lació fotovoltaïca fa referència a petites centrals generadores d'electricitat en baixa tensió que estan connectades a la xarxa de distribució d'electricitat.

Les instal·lacions solars fotovoltaïques connectades a la xarxa de distribució disposaran dels elements bàsics que es mostren en la figura 33.

Figura 33. Esquema de referència d'una instal·lació fotovoltaïca de connexió a la xarxa



#### 2.4.1. Convertidor de connexió a la xarxa

En qualsevol instal·lació fotovoltaïca de connexió a la xarxa, l'inversor és la base del sistema. És molt important tenir-ne clares les característiques tècniques d'aquest: potència, rangs de treball, tensió DC-AC, freqüència i potència màxima assolida. Aquests paràmetres determinaran la configuració de la resta d'elements, així com la de la instal·lació fotovoltaïca.

En general en el mercat podem trobar un ampli ventall de convertidors (figura 34) amb multitud d'opcions, però en aquest cas és necessari priorit-

zar que els equips a seleccionar han d'estar homologats i hauran de complir com a mínim les característiques següents:

- **Funcions bàsiques requerides:**

- Transformar la CC del generador fotovoltaic en CA en BT, sincronitzant-la amb la xarxa.
- Regular el punt de treball del generador fotovoltaic (tensió i corrent) per a seguir el punt de màxima potència, que varia en funció de les condicions de radiació i temperatura.

- **Característiques mínimes requerides:**

- Rendiment mínim del 90% en condicions de funcionament nominals.
- Capacitat de suportar la tensió de circuit obert i la intensitat de curt circuit del generador fotovoltaic.
- Factor de potència no inferior al 95% i baix nivell d'harmònics.
- Compliment de la reglamentació sobre les limitacions en les emissions electromagnètiques.
- Homologació i marcatge CE compliment de les directives (DC 89/336/CEE) i (DC 73/23/CEE).

- **Proteccions mínimes necessàries:**

- Desconnexió de la xarxa per fallades de tensió, freqüència o fase amb un retard a la connexió de 5 min.

Tensió:	$U < 0,85 U \text{ nominal}$ $U > 1,1 U \text{ nominal}$
Freqüència :	51 i 49 Hz

- Protecció per sobre intensitat i sobre tensió.
- Interruptor de desconnexió en càrrega.
- Transformador d'aïllament o algun altre sistema de separació galvànica entre la xarxa i la instal·lació fotovoltaica. Amb una rigidesa dielèctrica de com a mínim 2.500 V.

Encara que no ho especifiqui la normativa, és força interessant per al manteniment i seguiment de les instal·lacions que els convertidors incorporin sistemes de visualització, monitorització i control de les dades i paràmetres de funcionament de tota la instal·lació. La pantalla de visualització en els equips i el programari per a monitorització en l'ordinador són cada vegada més importants per al manteniment preventiu de les instal·lacions.



Figura 34. Convertidor de connexió a la xarxa elèctrica



#### 2.4.2. Punt de connexió a la xarxa

Les companyies elèctriques estableixen punts d'interconnexió amb la xarxa. En aquest tipus de sistemes, amb bastanta potència, normalment estaran definits i situats en paral·lel amb la connexió ja instal·lada per al consum de l'edifici o de la construcció establerta –on normalment ja es troben els comptadors de consums– i/o per a un punt localitzat per la mateixa companyia.

Aquesta connexió a la companyia distribuïdora la verificarà la companyia pertinent, de manera que hi ha la possibilitat de canvis en la connexió cap a altres punts de la mateixa línia si així es determinés. D'aquesta forma, a vegades pot haver-hi una certa distància (centenars de metres) des del quadre fins al punt que especifiqui la companyia.

#### Normes generals d'aplicació en la unió a la xarxa

La potència màxima de la planta no pot excedir més del 50% de la potència nominal del transformador de la subestació elèctrica o de la capacitat de la mateixa xarxa definida en la zona de la connexió.

No s'acceptaran connexions d'instal·lacions que produeixin caigudes de tensió provocades per la connexió-desconnexió superiors al 2%.

Evidentment, aquests punts d'unió a la xarxa comercial s'han de dissenyar de forma que les pèrdues de rendiment acumulades per la planta solar amb tot el periple que es pot produir des que es genera un kWh fins que s'injecta a la xarxa elèctrica siguin minimitzats. L'elecció d'equips inversors, cables i escomeses, transformadors i control en la reducció de les hores de paralització de la planta per diversos factors han d'estar ben gestionats i informats.

Els armaris de proteccions i/o quadre de connexions tenen la funció d'incloure els instruments de mesura de l'energia produïda i consumida, així com les proteccions elèctriques (seccionador automàtic, contactor magnetotèrmic i diferencial) que demana la normativa vigent. Aquests elements de protecció poden ser redundants en relació amb els que ja adopten els mateixos inversors en el seu disseny per tal d'evitar tant la pertorbació de la xarxa elèctrica a causa d'una mala qualitat com la pertorbació de la producció solar envers els danys que el mateix sistema pugui produir a l'equipament interconnectat com a la resta d'usuaris de la xarxa.



Punt de connexió d'una instal·lació monofàsica

### 3. Dimensionament i càlculs de les instal·lacions

Qualsevol implantació d'un sistema solar fotovoltaic porta implícita l'optimització dels recursos energètics a utilitzar "la radiació solar". Aquesta és la base del disseny i del muntatge de les instal·lacions solars.

Per a aconseguir, de forma senzilla, l'aprofitament del Sol com a recurs energètic, és imprescindible el coneixement de la trajectòria solar, el perfil de les necessitats i dels condicionants de la ubicació. D'acord amb tot això, és determinarà l'orientació i la inclinació de les plaques en instal·lacions fixes per tal d'aconseguir el mínim cost del kWh solar (en aquest document només treballarem el dimensionament d'instal·lacions amb estructures fixes).



Vegeu en la figura 10 (pàgina 15) la trajectòria solar a Catalunya en l'equinocci d'estiu i hivern.

#### 3.1. Orientació i inclinació de les plaques

Per a determinar el posicionament de les plaques fotovoltaïques caldrà considerar com a criteri de partida que la posició de les plaques haurà de permetre el màxim aprofitament de la radiació incident en tot l'arc de la trajectòria solar.

Sota aquest criteri i d'acord amb l'observació de la trajectòria solar, podem establir que l'orientació òptima de les plaques serà una orientació perpendicular a la línia de l'equador.

En l'hemisferi nord l'orientació òptima serà el sud. En l'hemisferi sud l'orientació òptima serà el nord.



Vegeu en la figura 8 (pàgina 16) els paràmetres bàsics de posicionament sobre la Terra.

Per tant, a Catalunya l'orientació òptima de les plaques serà **sud**.

Mantenint el criteri inicial, la inclinació de les plaques quedarà determinada per aquella posició que permeti la màxima radiació incident en l'època d'utilització predominant. Aquesta inclinació correspondrà a l'angle complementari de l'angle de l'alçada solar del migdia del mes més desfavorable de l'època d'utilització predominant.

Com que la trajectòria de l'alçada solar té una relació directa amb la latitud de la ubicació, podem establir uns criteris generals per a definir la inclinació de les plaques (taula 2).

Taula 2. Criteris generals per a definir la inclinació de les plaques

Aplicació	Inclinació recomanada
Instal·lacions d'ús d'hivern	latitud del lloc +20 °
Instal·lacions d'ús continuat tot l'any sense grup electrogen de suport	latitud del lloc +5 °
Instal·lacions d'ús continuat tot l'any amb grup electrogen de suport	latitud del lloc +10 °
Instal·lacions d'ús principal a l'estiu	latitud del lloc -10 °
Instal·lacions d'ús estacional	angle complementari a l'altura solar de l'època d'ús
Instal·lacions amb connexió a xarxa	latitud del lloc -10 °

### 3.2. Incidència d'ombres

Per a assolir el màxim aprofitament d'un sistema d'energia solar, s'haurà de tenir cura de la incidència de possibles ombres sobre les plaques, tant les properes (objectes que tapen momentàniament la radiació directa del Sol) com les ombres llunyanes (elements de l'orografia i/o paisatge que oculten el Sol de la zona on se situa la instal·lació solar).

L'efecte de les ombres s'ha d'avaluar amb força cura a l'hora de determinar la ubicació de les plaques, ja que les ombres a les plaques produeixen una minva important de la producció, sobretot si es produeixen a les hores centrals del dia (màxima insolació).

Per tal d'avaluar la incidència d'ombres d'obstacles pròxims, s'observarà l'entorn pròxim comprès en la franja **est-oest**, en què no ha d'haver-hi cap obstacle que pugui produir ombres sobre les plaques solars per un període mínim de **4 hores de Sol entorn al migdia del solstici d'hivern**.

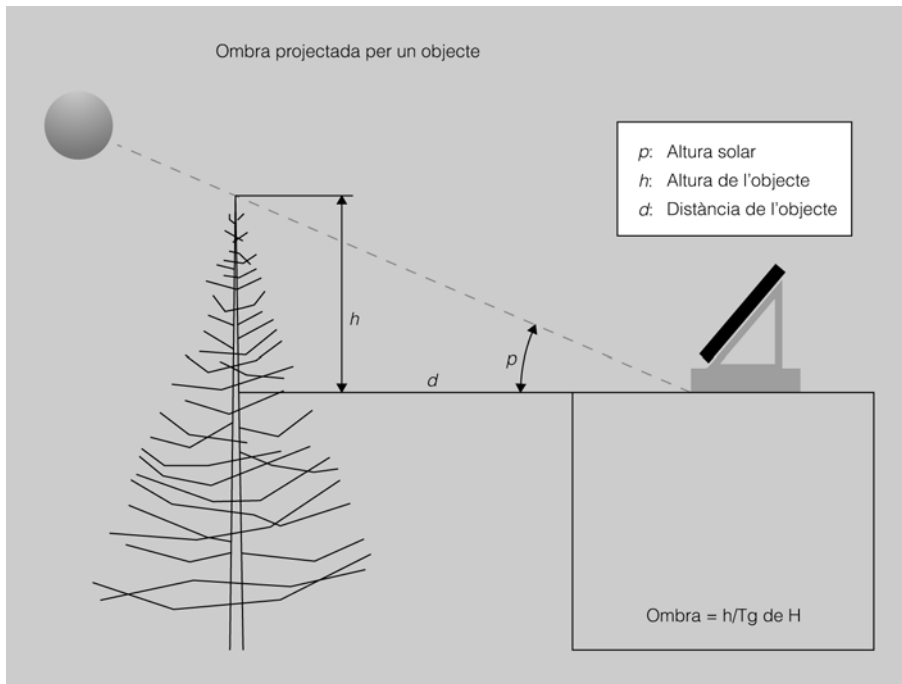
Per tal de garantir això, les plaques s'hauran d'instal·lar a una distància mínima dels obstacles propers (figura 35), determinada per l'expressió següent:

$$d = \left( \frac{h}{\operatorname{tg} h \text{ solar}} \right) \cdot \cos a \text{ solar}$$

On:

- **d**: distància mínima entre l'obstacle i la placa.
- **h**: altura de l'obstacle.
- **tg<sub>h solar</sub>**: tangent de l'altura solar en el mes més desfavorable (desembre) en la nostra latitud.
- **cos<sub>a solar</sub>**: cosinus de l'azimut solar en el mes més desfavorable (desembre) a les 10 h solar.

Figura 35. Representació gràfica dels paràmetres de càlcul per determinar la longitud de l'ombra d'un obstacle



### 3.2.1. Separació entre fileres de plaques

La separació entre fileres de plaques ha de garantir la no-superposició d'ombres entre les fileres de plaques en el solstici d'hivern/estiu.

Aquesta distància (figura 36) quedarà determinada per la següent expressió, en el cas de plaques amb disposició horitzontal (sobre un pla).

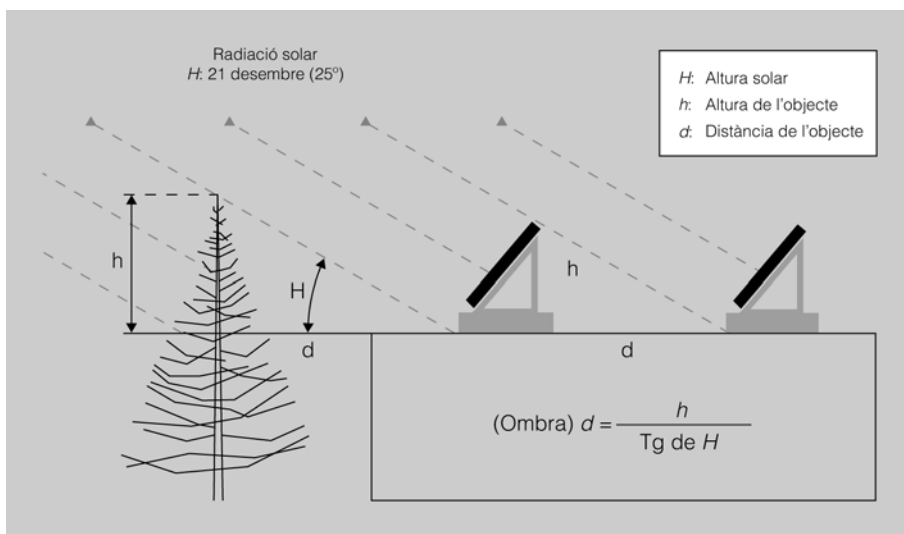
$$d = \left( \frac{h}{\operatorname{tg} de H} \right) \cdot \cos d$$

On:

- **d**: distància mínima entre línies de plaques.
- **h**: altura de la posterior línia de plaques.
- **tg de H**: tangent de l'altura solar en el mes més desfavorable (desembre) en la nostra latitud.
- **cos δ<sub>r</sub>**: cosinus de l'azimut solar en el mes més desfavorable (desembre) a les 10 h solar.

Pel dimensionament de la resta d'elements de les instal·lacions fotovoltaïques caldrà diferenciar clarament el tipus d'aplicació (autònomes o connectades a la xarxa).

Figura 36. Representació gràfica dels paràmetres de càlcul per a determinar la distància entre fileres de plaques



### 3.3. Dimensionament d'elements bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes

Aquest tipus d'instal·lacions s'han de dissenyar per tal de garantir el subministrament d'energia elèctrica d'acord amb una demanda d'energia preestablerta. Com a guió per al dimensionament de la instal·lació establirem els següents paràmetres:

#### a) Dades d'entrada

- Característiques de les necessitats a cobrir
- Energia diària necessària
- Radiació solar incident

#### b) Dades a calcular

- Nombre de plaques necessàries
- Capacitat i voltatge de l'acumulador
- Intensitat del regulador
- Potència de l'inversor
- Tipus d'equips auxiliars necessaris

En aquest sentit, a continuació desenvoluparem cada un d'aquests apartats.

#### 3.3.1. Característiques de les necessitats a cobrir

Per a determinar les necessitats energètiques d'un usuari caldrà establir quins són els condicionants de partida de la demanda energètica i perfil d'utilització, i per a això determinarem com a mínim els següents paràmetres:

- Tipus d'utilització: caps de setmana/diària



Vegeu un exemple de dimensionament dels elements bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes en la secció "Annexos" del web del crèdit.

- Estacionalitat de la utilització: estiu/hivern
- Disponibilitat de sistema auxiliar de subministrament elèctric

### 3.3.2. Energia diària necessària

Un cop determinat el perfil de la demanda energètica, caldrà elaborar una taula de consum, tenint en compte la potència (W) i el temps (h) d'utilització dels diversos equips, per tal d'establir la demanda energètica total diària en Wh/dia.

Cal recordar que en termes elèctrics l'energia és igual a una potència per un temps d'aplicació.

$$E \text{ (Wh)} = P \text{ (W)} \cdot t \text{ (h)}$$

Al valor del consum diari previst (Wh/dia), li aplicarem un factor global de rendiment de la instal·lació fotovoltaïca que engloba els autoconsums i rendiments particulars dels elements que la integren: regulador, acumulador i convertidor cc/ca de manera que el resultat, que anomenem energia necessària, és l'energia bruta que cal produir en els mòduls per a satisfer amb efectivitat els consums nets previstos. Aquest valor serà sempre superior a l'energia neta que es vol subministrar als consums.

El rendiment global ( $\eta$ ) que emprarem en els nostres càlculs és de:

- 0,75 per a instal·lacions amb subministrament en CA
- 0,80 per a instal·lacions amb subministrament en CC

Dividint el valor d'energia requerida pels consums ( $E$ ), de la taula de consums, pel rendiment global de la instal·lació ( $\eta$ ), obtenim l'energia necessària que cal subministrar ( $E_1$ ), tal com mostra la següent expressió.

$$E_1 \text{ (Wh/dia)} = \frac{E \text{ (Wh/dia)}}{\eta}$$

Com a recomanació important a l'hora de determinar la demanda energètica per a habitatges, caldrà limitar la utilització d'equips amb escalfament elèctric, com per exemple forns elèctrics, radiadors elèctrics, rentadores d'aigua calenta, assecadores, escalfadors d'aigua elèctrics, etc. Aquests electrodomèstics tenen un elevat consum i hi ha possibilitats de substitució per a aplicacions tèrmiques amb millor eficiència energètica global.

D'altra banda, en les instal·lacions fotovoltaïques es recomana d'utilitzar en tots els casos electrodomèstics de baix consum, ja que, en reduir el consum, reduïrem la dimensió i inversió en l'equip fotovoltaic.

### 3.3.3. Radiació incident "hora sol pic" (*hsp*)

Un cop concretada la ubicació de les plaques i la posició que tenen, per a determinar la radiació incident farem servir les taules de radiació, que ens diran la radiació incident segons el lloc d'ubicació de la instal·lació, la inclinació i l'orientació de les plaques que hem determinat.

Com que els fabricants de les plaques fotovoltaïques expressen la potència en unes condicions de radiació solar  $1000 \text{ w/m}^2$ , farem un canvi d'unitats per a passar els  $\text{Mj/m}^2/\text{dia}$  de les taules de radiació a  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ , multiplicant el valor de la taula de radiació per  $0,27 \text{ kWh/MJ}$ .

Un cop disposem de la radiació en  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ , ho dividim entre valor de la radiació estàndard ( $1 \text{ kW/m}^2$ ), que es fa servir per a calibrar els mòduls i obtenim el valor **d'hores pic equivalents, *hsp***, valor que vindria a expressar les hores de llum solar al dia amb una intensitat fixa de  $1.000 \text{ W/m}^2$ , que produïrien la mateixa energia que el dia mitjà del dia escollit (tot i que sabem que, en realitat, el Sol varia d'intensitat contínuament durant el dia).

$$hsp = \text{radiació solar en kWh/m}^2$$

A efectes de càlculs energètics, és el mateix suposar que el mòdul està rebent una intensitat de radiació de  $1.000 \text{ W/m}^2$  durant un temps igual al nombre d'*hsp*, que el que rep en condicions normals durant tot el dia. És a dir, amb valors que varien al llarg del dia, ja que coincideixen el nombre d'*hsp* amb el nombre de kWh d'energia incident durant tot el dia.

Podríem dir que, si per exemple, en un lloc reben en un mes determinat una radiació mitjana diària de  $12,7 \text{ MJ/m}^2/\text{dia}$  (l'equivalent a  $3,527 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ ), el resultat és el mateix que si incidís una intensitat de  $1.000 \text{ W/m}^2/\text{dia}$  durant  $3,527$  hores i es diu que les *hsp* d'aquest mes és de  $3,527 \text{ hsp}$ .

### 3.3.4. Nombre de plaques necessàries

El nombre de plaques fotovoltaïques necessàries en una instal·lació és la dada més important a calcular en una instal·lació, ja que, generalment, serveix com a referència a l'hora de calcular altres components del sistema, fins i tot per a fer una aproximació al cost final de la instal·lació.



El càlcul dels mòduls necessaris en una instal·lació autònoma quedarà determinat per la següent expressió:

**1) Instal·lacions d'ús diari:**

$$\text{Número de mòduls} = \frac{E_{\text{necessària}} [\text{Wh/dia}]}{\text{Potència pic mòdul} [\text{Wp}] \cdot \eta_{\text{camp}} \cdot \text{Radiació solar} [\text{hsp/dia}]}$$

**2) Instal·lacions de cap de setmana:**

$$\text{Número de mòduls} = \frac{3 \cdot E_{\text{necessària}} [\text{Wh/dia}]}{\text{Potència pic mòdul} [\text{Wp}] \cdot \eta_{\text{camp}} \cdot 7 \cdot \text{Radiació solar} [\text{hsp/dia}]}$$

La potència pic del mòdul ens serà subministrada pel fabricant i sol integrar la pròpia nomenclatura o referència de model dels fabricants.

El rendiment de camp ( $\eta_{\text{camp}}$ ) inclou les pèrdues degudes a la brutícia dels mòduls i als efectes negatius que té el fet d'utilitzar mòduls que, a causa de la tolerància del fabricant, no són exactament d'igual potència.

En instal·lacions autònomes, aquest rendiment serà normalment de 0,65.

Cal tenir en compte que si l'època de càlcul és l'hivern, la pèrdua de rendiment en els mòduls per efecte de la temperatura serà pràcticament inexistència i que les pèrdues per brutícia també seran molt petites, atès que la pluja neteja sovint els mòduls a l'hivern i la pols en suspensió és menor que a l'estiu.

La radiació solar serà la corresponent al mes de pitjor relació entre irradiació i consum, generalment el mes de desembre, quan es tracta d'electrificacions d'habitatges d'utilització continuada.

### 3.3.5. Voltatge i capacitat de l'acumulador

El voltatge de l'acumulador haurà de ser escollit, de manera que sigui prou elevat per a garantir corrents de càrrega/descàrrega raonables ( $I < 100 \text{ A}$ ), així com un correcte acoblament amb el voltatge del grup de plaques fotovoltaïques (12, 24, 48 V...).

Un cop establert el voltatge de treball de la instal·lació, cal considerar que la bateria és el magatzem d'energia; per tant, la seva capacitat estarà determinada pel consum diari i pel nivell d'autonomia que vulguem obtenir, variable en funció del tipus d'instal·lació. Aquestes variables les podem concretar en:

- **Dies d'autonomia:** Instal·lacions totalment autònomes i de difícil accés (equips de telecomunicacions, boies, etc.) aplicar tants dies d'autonomia com dies núvols seguits mostrin les estadístiques meteorològiques més properes al lloc d'ubicació (de 3 a 10 dies).

Electrificació rural d'ús diari (de 4 a 6 dies). Aquest valor es pot reduir a tres si existeix un grup electrogen de suport amb engegada automàtica.

Electrificació d'habitatges de cap de setmana (de 2 a 3 dies).

- **La profunditat de descàrrega** mitjana d'una bateria que tindrem en compte en el càlcul depèn del tipus emprat:
  - 0,6 a 0,8 per a acumuladors estacionaris d'alt volum d'electròlit.
  - 0,4 a 0,5 per a acumuladors del tipus monobloc.
  - 0,2 a 0,3 per a acumuladors d'engegada (automòbil).

Un cop determinada l'autonomia podem calcular la capacitat de la bateria amb la següent expressió:

$$\text{Capacitat de la bateria (Ah)} = \frac{\text{Energia necessària (Wh/dia)} \cdot \text{Dies d'autonomia}}{\text{Voltatge} \cdot \text{Profunditat de descàrrega de la bateria}}$$

### 3.3.6. Intensitat del regulador

Els reguladors de càrrega es caracteritzen per la intensitat màxima que poden suportar, així com pel voltatge nominal de treball. Podem definir com a valors estàndards d'intensitat de control dels models en el mercat els 8A, 11A, 15A, 30A i 50A. I pel que fa a voltatges: 12V, 24V o 48V.

El model de regulador necessari en cada instal·lació quedarà determinat per la potència màxima del camp de mòduls, tenint en compte que aquesta intensitat serà igual a la suma d'intensitats de tots els mòduls connectats en paral·lel.

$$I_{max} \text{ del regulador} > 1,10 \cdot \text{Intensitat curtcircuit}$$

### 3.3.7. Potència de l'inversor

La potència nominal del convertidor adient serà la resultant de la suma de totes les potències nominals dels equips consumidors multiplicat per un coeficient de simultaneïtat d'entre 0,5 a 0,75 en funció de la tipologia i quantitat de consums, ja que, a la pràctica, mai no funcionen tots els equips de consum alhora.

$$\begin{aligned} & (\text{suma de la potència nominal de tots els aparells de consum}) \\ & \times 0,75 < P_{\text{convertidor}} > \\ & (\text{suma de la potència nominal de tots els aparells de consum}) \times 0,5 \end{aligned}$$

El resultat d'aquesta operació ens determinarà la potència nominal del convertidor, amb l'excepció que la potència nominal d'algun dels aparells de consum sigui superior a aquest valor i que, per tant, aquest aparell ens determinarà la potència mínima del convertidor. En aquest sentit cal tenir en compte que alguns electrodomèstics que incorporen motor demanen puntes de potència d'engegada superiors a les nominals (fins a 4 vegades més); per exemple, els televisors en color i les neveres.

### 3.3.8. Tipus d'equips auxiliars necessaris

En el dimensionament del sistema auxiliar (grup electrogen) s'han de tenir en compte els següents modes d'operació:

- Quan el grup electrogen alimenti exclusivament a consum, la potència del grup serà, com a mínim, la potència total de l'habitatge. Aquest mode d'operació el podem anomenar *mode d'emergència*, pel fet que l'inversor de la instal·lació fotovoltaïca s'ha pogut espavillar i resta pendent de reparació o substitució.
- Quan s'utilitza un inversor-carregador, la potència del grup electrogen serà la suma de potències de l'habitatge més la del carregador de l'inversor. En aquest mode de funcionament, l'inversor reparteix la potència que li arriba del grup electrogen entre la fase de carregador a bateries i l'abastament del consum, realitzant aquesta operació de manera automàtica.
- Carregador independent de bateries. En aquest cas el grup electrogen alimenta al carregador i aquest carrega les bateries. El subministrament a consum queda cobert per l'inversor, que ha d'estar connectat. En aquest cas s'entén que l'inversor no és carregador. La potència del grup serà, com a mínim, la potència CA del carregador.

### 3.4. Dimensionament d'elements bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques connectades a la xarxa

Com que les instal·lacions fotovoltaïques connectades a la xarxa elèctrica no han de garantir el subministrament energètic de l'usuari, en el dimensionament dels sistemes s'utilitza algun dels següents criteris:

- Producció elèctrica anual
- Màxima superfície disponible
- Acompliment del CTE - HE 5 en grans edificis (hotels, centres comercials, etc.)

Cal tenir en compte, però, que la potència màxima de la instal·lació fotovoltaïca no pot excedir més del 50% de la capacitat de la mateixa xarxa elèctrica, definida en la zona de la connexió o, en lloc seu, la potència nominal del transformador de la subestació elèctrica.

#### 3.4.1. Nombre de plaques necessàries

Pel que fa al primer criteri, cal tenir en compte la productivitat dels sistemes de connexió a xarxa, és a dir, l'energia total que podem injectar en xarxa al llarg de l'any per unitat de potència pic fotovoltaïca instal·lada.

En aquest sentit i a partir de seguiments empírics d'instal·lacions en servei, es poden establir per a Catalunya valors de 900 a 1.350 kWh anuals per cada kWp instal·lat com a valor realista de la producció estimada quan no existeix cap sistema de seguiment de la posició del Sol al llarg del dia.

Pel que fa a la superfície disponible, s'ha de tenir en compte la potència específica del mòdul fotovoltaïc (WP/m<sup>2</sup>) de les dues tecnologies que actualment estan disponibles en el mercat: el silici cristal·lí (150 WP/m<sup>2</sup>) i la capa prima (60 WP/m<sup>2</sup>).

#### 3.4.2. Potència del convertidor

A partir de la potència del camp de mòduls, per a trobar la potència del convertidor caldrà aplicar simplement el factor de relació indicat pels fabricants i que és aproximadament el següent:

$$\text{Potència del convertidor} = \frac{\text{Potència pic del camp}}{1,25}$$



Trobareu una còpia del CTE- HE 5 en la secció "Adreces d'interès" del web d'aquest crèdit.

Aquesta relació és deguda al fet que el camp generador operarà sempre amb un rendiment màxim del 75% per efectes de la brutícia, els desequilibris de producció entre mòduls o la reflexió de llum per desviacions de la trajectòria del Sol.

### 3.4.3. Radiació incident “hora sol pic” (*hsp*)

Com en el cas de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes, per a determinar la radiació incident farem servir les taules de radiació, que ens determinaran la radiació incident segons el lloc d'ubicació de la instal·lació, la inclinació i l'orientació de les plaques que hem determinat.

Com que els fabricants de les plaques fotovoltaïques expressen la potència en unes condicions de radiació solar  $1000 \text{ w/m}^2$ , farem un canvi d'unitats per a passar els  $\text{Mj/m}^2/\text{dia}$  de les taules de radiació a  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ , multiplicant el valor de la taula de radiació per **0,27 kWh/MJ**.

Un cop disposem de la radiació en  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ , ho dividim entre valor de la radiació estàndard ( $1 \text{ kW/m}^2$ ), que es fa servir per a calibrar els mòduls i obtenim el valor **d'hores pic equivalents, *hsp***, valor que vindria a expressar les hores de llum solar al dia amb una intensitat fixa de  $1.000 \text{ W/m}^2$ , que produirien la mateixa energia que el dia mitjà del dia escollit (tot i que sabem que, en realitat, el Sol varia d'intensitat contínuament durant el dia).

$$hsp = \text{radiació solar en kWh/m}^2$$

### 3.4.4. Pèrdues de rendiment dels components “PR”

Per a l'avaluació correcta de la producció solar estimada d'una instal·lació fotovoltaïca de connexió a la xarxa, cal tenir en compte els diferents factors de pèrdues energètiques que es produeixen en la cadena d'equips de la instal·lació. En aquest bloc descriurem els factors de pèrdues més significatius assignant un valor empíric obtingut de les instal·lacions que s'han posat en servei en els darrers anys.

- Generador fotovoltaïc

Les pèrdues en els mòduls fotovoltaïcs, de manera resumida, són degudes als efectes de la temperatura, a la brutícia del vidre. Aquestes pèrdues poden adoptar un valor al voltant del 9% (0,91).

- Inversor

Tenint en compte la bona qualitat dels inversors fotovoltaïcs de connexió a xarxa avui dia, amb uns rendiments que oscil·len del 92% fins al 96%, les pèrdues de transformació en aquests equips les assumiren en un valor del 8% (0,92).

- Cablatge i dispersió de paràmetres

En aquests casos és molt normal establir unes pèrdues del 5% (0,95).

- Interrupcions de servei

Es refereix al coeficient de funcionament real de la instal·lació fotovoltaïca descomptant les aturades del sistema per valors fora de rang o problemes en la xarxa, etc.

Aquest coeficient pot assumir un valor del 0,93, és a dir, un 7% del temps teòric de funcionament es perd.

La multiplicació dels coeficients definits determina, de manera aproximada, el rendiment global de la instal·lació o *PR* (Performance Ratio) i que és un paràmetre determinant en el càlcul de la productivitat energètica d'una instal·lació fotovoltaïca connectada a xarxa.

$$PR = 0,91 \cdot 0,92 \cdot 0,95 \cdot 0,93 = 0,74$$

### 3.4.5. Producció energètica estimada

L'energia elèctrica injectada a la xarxa per a una instal·lació fotovoltaïca en un any serà la resultant d'aplicar la següent expressió:

$$EAC = P_{GFV} \cdot \left( \frac{G_{da}}{G^*} \right) \cdot FS \cdot PR$$

On:

- $E_{AC}$ : Energia anual injectada a xarxa (kWh)
- $P_{GFV}$ : Potència pic del generador fotovoltaïc (kWp)
- $G_{da}$ : Radiació anual (kWh/m<sup>2</sup>)
- $G^*$ : Irradiància estàndard (1000 W/m<sup>2</sup>)
- $FS$ : Factor d'ombres
- $PR$ : Rendiment global instal·lació

### 3.5. Elements elèctrics bàsics en les instal·lacions fotovoltaïques

Les instal·lacions fotovoltaïques són en general instal·lacions generadores de baixa tensió i com a tal estan subjectes al compliment de l'actual reglament electrotècnic de baixa tensió i específicament la ITC-BT 40 "Instal·lacions generadores de baixa tensió" regula i determina els elements elèctrics preceptius per a aquestes instal·lacions.

Sota aquest concepte establirem que tot l'equipament elèctric en aquestes instal·lacions està regulat i definit pel "Reglament Electrotècnic per a Baixa Tensió".

#### 3.5.1. Proteccions elèctriques bàsiques en les instal·lacions fotovoltaïques

Les instal·lacions elèctriques, incloses les instal·lacions solars fotovoltaïques autònomes i de connexió a xarxa, han de disposar de les següents proteccions:

- Protecció contra sobreintensitats (sobrecàrregues) ITC-BT-22
- Protecció contra sobreintensitats (curtcircuits) ITC-BT-22
- Protecció contra sobretensions ITC-BT-23
- Protecció contra contactes directes ITC-BT-24
- Protecció contra contactes indirectes ITC-BT-24
- Presa de terra ITC-BT-18, 19 , 26

En les instal·lacions fotovoltaïques autònomes és necessari tenir especial atenció en la protecció elèctrica de la bateria a causa del potencial risc de cremades o explosió que presenta aquest element de la instal·lació.

En cas de rehabilitació d'instal·lacions, serà necessari revisar i/o incorporar els elements de seguretat elèctrica preceptius que garantissin la seguretat de les persones, instal·lacions i equips.

#### 3.5.2. Secció dels conductors

Una secció adequada del cable serà bàsica per a obtenir un bon rendiment global de la instal·lació. Els conductors elèctrics de coure tenen per funció el transport de l'electricitat, però malauradament ofereixen una resistència al pas de l'energia.

Aquesta resistència elèctrica depèn de la llargada del traçat i de la secció i es manifesta en dos efectes:

1) Caiguda de tensió en el mateix conductor. Aquest efecte fa que la càrrega alimentada tingui un voltatge inferior al de la font alimentadora.

2) Pèrdues energètiques per efecte Joule, escalfament del conductor. Aquestes pèrdues són una funció quadràtica de la intensitat: si es dobla la intensitat, les pèrdues creixen 4 vegades. Si la calor és massa forta el conductor es deteriora i es pot arribar a situacions perilloses, com ara incendi o deteriorament de l'aïllament.

Per a evitar aquests dos problemes calcularem els conductors amb els següents objectius:

- **Selecció del conductor per la caiguda de tensió màxima:** en les línies de CC de les plaques/acumuladors fins al convertidor, s'establirà un valor màxim de caiguda de tensió d'un **1,5% per a instal·lacions connectades a la xarxa**, i un **3% per a instal·lacions autònomes**. En les línies de connexió en CA de sortida del convertidor s'establirà un **valor màxim de caiguda de tensió d'un 1,5%**. En les instal·lacions de connexió a la xarxa elèctrica, aquest paràmetre estarà calculat sobre el 125% de la potència nominal del convertidor, tal com s'indica en l'RBT. ITC-BT-40.

#### RBT. ITC-BT-40

"Los cables de conexión deberán estar dimensionados para una intensidad no inferior al 125% de la máxima intensidad del generador y la caída de tensión entre el generador y el punto de interconexión a la Red de Distribución Pública o a la instalación interior, no será superior al 1,5%, para la intensidad nominal."

Per al càlcul de la secció de conductor adequada utilitzarem les expressions que es mostren a la taula 3.

Taula 3. Expressions per a determinar la secció mínima del conductor

	Línies monofàsiques	Línies trifàsiques
En funció de la intensitat	$s = \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \text{Cos}(\varphi)}{c \cdot u}$	$s = \frac{\sqrt{3} \cdot L \cdot I_L \cdot \text{Cos}(\varphi)}{c \cdot u}$
En funció de la potència	$s = \frac{2 \cdot L \cdot P}{c \cdot u \cdot V}$	$s = \frac{L \cdot P}{c \cdot u \cdot V_L}$

On:

- $s$ : Secció conductor ( $\text{mm}^2$ )
- $L$ : Longitud del tram simple (m)
- $I$ : Intensitat eficaç (A); ( $I_L$  = Intensitat de línia)
- $V$ : Tensió de la línia (V); ( $V_L$  = Tensió de línia)
- $\text{Cos}(\varphi)$ : Factor de potència (En línies elèctriques de CC;  $\text{Cos}(\varphi)=1$ )
- $P$ : Potència elèctrica (W)
- $u$ : Caiguda de tensió en la línia (V)  $\rightarrow u = V \cdot \frac{cdt(\%)}{100}$
- $c$ : Conductivitat del conductor:
  - Per al coure, a 20 °C  $c = 56 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$
  - Per a l'alumini, a 20 °C  $c = 35 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$



L'expressió anterior ens dóna la secció del conductor mínima a muntar expressada en  $\text{mm}^2$  per tal de complir el requisit que la caiguda de tensió sigui menor al percentatge escollit en funció del tram.

- **Selecció del conductor per criteri tèrmic**

Un cop determinem la secció mínima del conductor comprovarem que es compleix la següent expressió:

$$I_B < I_Z$$

On:

- $I_B$ : Intensitat d'utilització (A).
- $I_Z$ : Intensitat màxima admissible en el conductor (A).

Per tant, es garantirà que la intensitat de circulació és menor que el màxim admissible per aquesta secció de conductor, segons s'indica en les taules de referència de la ITC-BT-19 en les quals s'estableix la intensitat màxima admissible per a conductors elèctrics en funció de la secció del conductor, el material de l'aïllament, disposició de la instal·lació. Tot això amb una temperatura de servei de 40 °C.

En el cas de dimensionar instal·lacions soterrades, caldrà utilitzar les taules de referència incloses en la RITC-BT-07.

