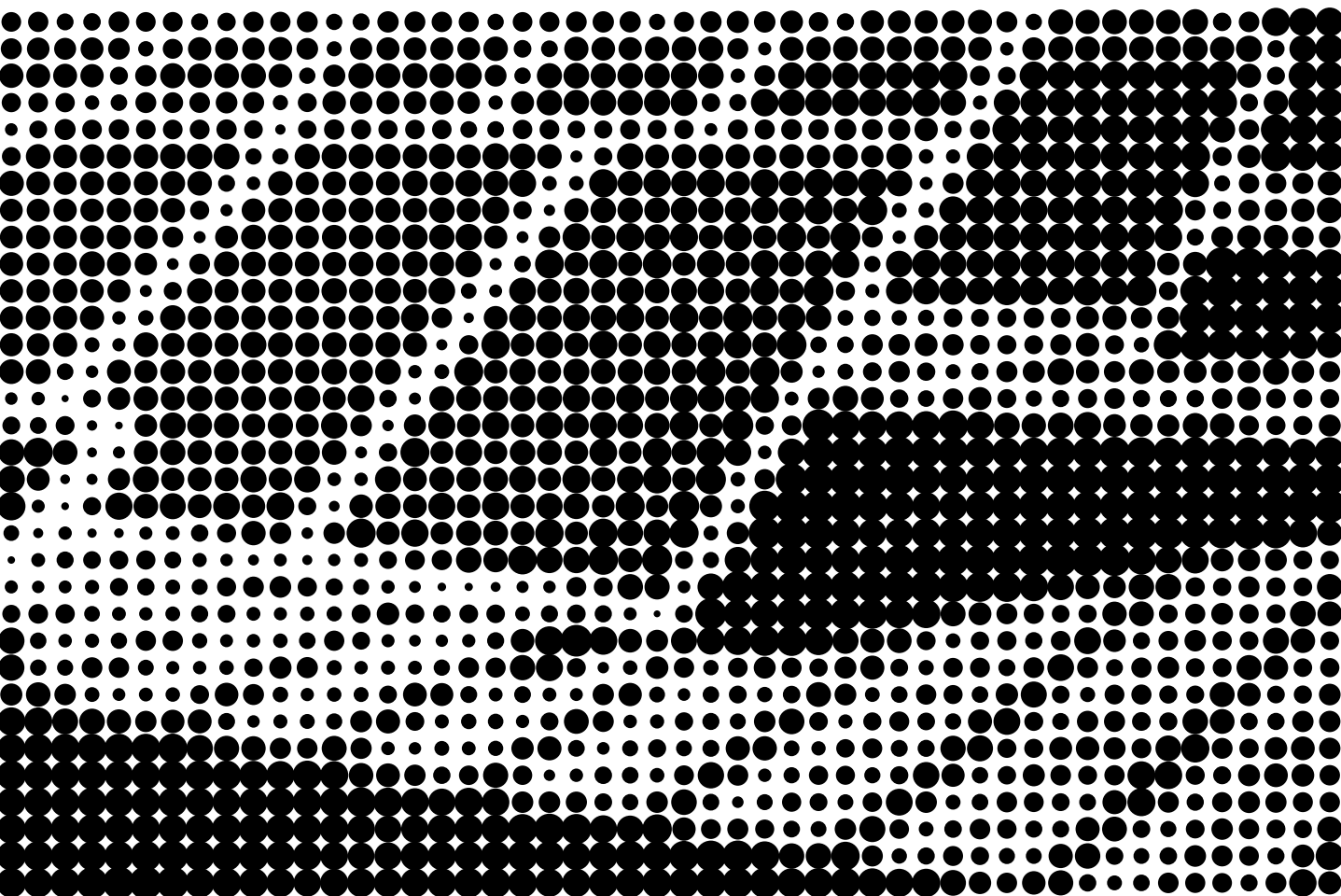


Energia solar fotovoltaica



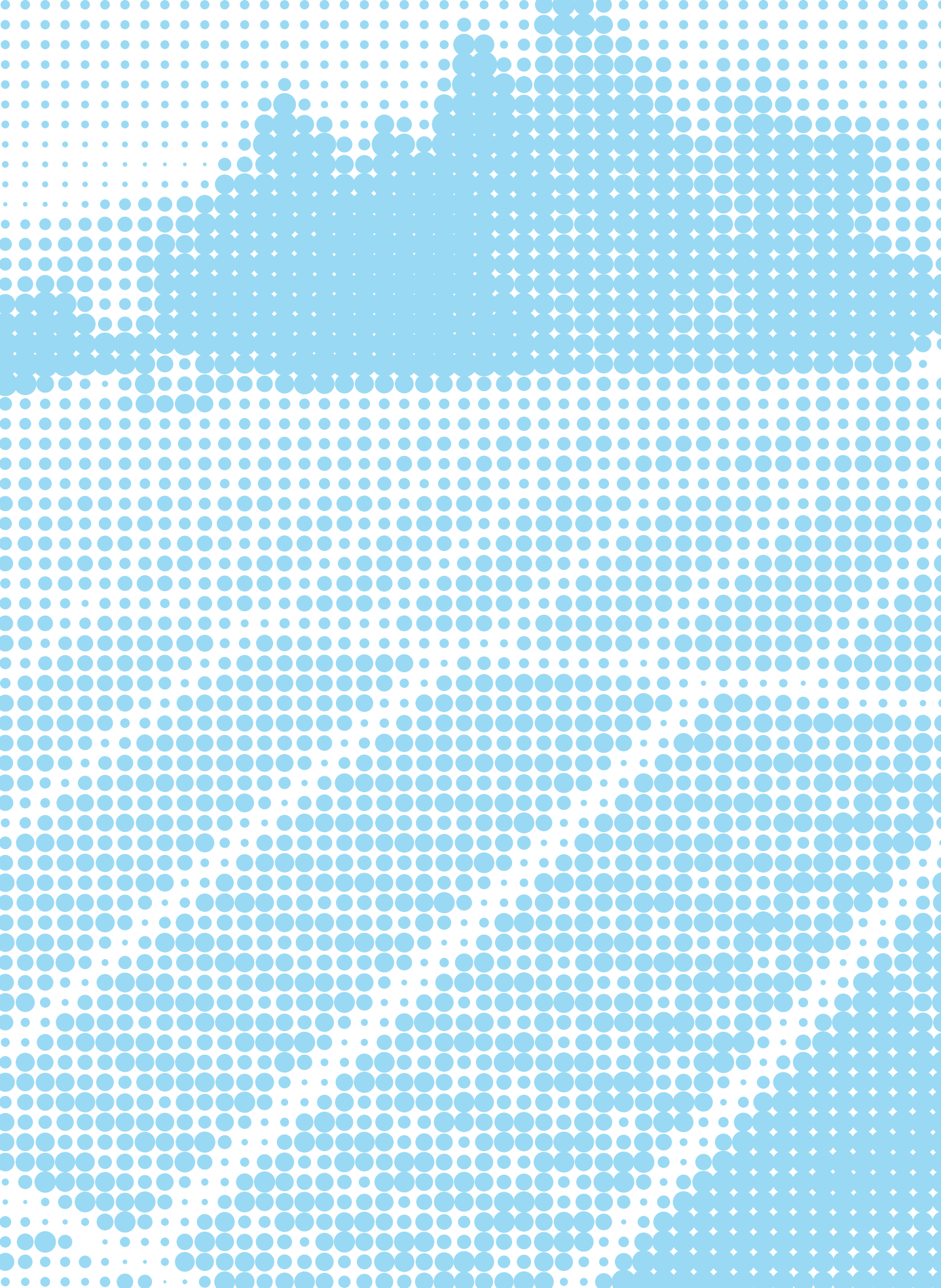
Col·lecció Quadern Pràctic
Número 4



Energia solar fotovoltaica



Col·lecció Quadern Pràctic
Número 4





Energia solar fotovoltaica



Col·lecció Quadern Pràctic
Número 4



Biblioteca de Catalunya - Dades CIP

Tudel, Marta

Energia solar fotovoltaica

(Col·lecció Quadern pràctic 4)

Bibliografia:

I. Masip, Guillem

II. Roca, Joan Francesc

III. Institut Català d'Energia

IV. Títol

V. Col·lecció: Col·lecció Quadern pràctic 4

1. Energia Solar Fotovoltaica

620.91

▶ © Generalitat de Catalunya

Institut Català d'Energia

www.gencat.cat/icaen

1a edició: Barcelona, maig de 2011

Contingut tècnic: Marta Tudel

i Guillem Masip. Institut Català d'Energia.

Joan Francesc Roca. Intiam Ruai.

Disseny i maquetació: Oxigen, comunicació gràfica



Aquesta obra està subjecte a una llicència de Reconeixement-No comercial-Sense obres derivades 3.0 de Creative Commons.

Índex

Presentació	13
1. Marc normatiu	15
1.1. Reglamentació aplicable	16
1.1.1. Qualificació professional	17
2. El sol com a recurs energètic	18
2.1. Radiació solar incident en la superfície de l'atmosfera	18
2.1.1. Constant solar	19
2.2. Radiació solar incident en la superfície de la Terra	20
2.2.1. Localització geogràfica	21
2.2.2. Factor estacional	22
2.2.3. Factor climatològic	22
2.2.4. Valor estàndard de referència "hora sol pic" (hsp)	23
2.3. Avaluació del recurs "radiació solar incident"	24
2.3.1. Paràmetres de la posició del Sol	25
2.3.2. Avaluació de la radiació incident	26
2.3.3. Taules de radiació	26
2.3.4. Radiació incident: "hora sol pic" (hsp)	29
3. Ubicació i ancoratge dels panells solars	30
3.1. Ubicació dels panells	30
3.1.1. La superfície disponible	30
3.1.2. Orientació i inclinació	30
3.2. Incidència d'ombres	31
3.2.1. Ombres properes	32
3.2.2. Ombres llunyanes	33
3.2.3. Separació entre fileres de panells	35
3.3. Ancoratges dels captadors	37
3.3.1. Sistema d'ancoratge	37
3.3.2. Càrrega estructural	39
3.3.3. Estructura de suport	40
3.3.4. Estructures mòbils	41
3.3.5. Càrregues de vent	43
4. El panell solar fotovoltaic	45
4.1. Característiques bàsiques de les cèl·lules fotovoltaïques	45
4.1.1. Efecte fotovoltaic	46
4.1.2. La cèl·lula fotovoltaica	48

4.1.3. Principi de funcionament de la cèl·lula	49
4.1.4. Corba I-V	50
4.1.5. Corrent de curtcircuit (I_{cc})	51
4.1.6. Voltatge de circuit obert (V_{co})	51
4.1.7. Punt de màxima potència (pmp)	52
4.1.8. Variacions amb la radiació incident	52
4.1.9. Variacions amb la temperatura de la cèl·lula	53
4.2. Tipus de cèl·lules	54
4.2.1. Sistemes de concentració	55
4.3. Característiques bàsiques dels panells fotovoltaics	56
4.3.1. Parts d'un mòdul fotovoltaic	56
4.3.2. Característiques bàsiques d'un mòdul fotovoltaic	57
4.3.3. Altres característiques elèctriques que cal ressaltar	59
4.3.4. Connexions de mòduls	59
4.3.5. Connexions en sèrie de mòduls FV	61
4.3.6. Connexions en paral·lel de mòduls FV	61
4.3.7. Connexions mixtes de mòduls FV	62
5. Elements de les instal·lacions fotovoltaïques	63
5.1. Components de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes	63
5.1.1. Acumuladors d'energia elèctrica	64
5.1.2. Reguladors de càrrega	70
5.1.3. Convertidors de CC/CA	74
5.2. Components de les instal·lacions fotovoltaïques de connexió a xarxa	76
5.2.1. Tensions de treball	77
5.2.2. Arquitectura dels inversors	77
5.2.3. Connectivitat elèctrica	79
5.2.4. Equipaments d'interconnexió	81
5.2.5. Punt de connexió a la xarxa	81
6. Esquemes bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques	83
6.1. Esquemes bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes	83
6.1.1. Elements bàsics (A)	84
6.1.2. Proteccions elèctriques (B)	86
6.2. Esquemes bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques connectades a xarxa	90
6.2.1. Elements bàsics (A)	91
6.2.2. Proteccions elèctriques (B)	93

6.3. Esquemes bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques de bombament directe	96
6.3.1. Elements bàsics (A)	97
6.3.2. Proteccions elèctriques (B)	98
7. Dimensionament d'instal·lacions fotovoltaïques autònomes	100
7.1. Demanda energètica	100
7.2. Necessitats a cobrir	101
7.3. Caracterització dels consums	103
7.4. Energia necessària	103
7.5. Radiació solar disponible	104
7.6. Nombre de mòduls fotovoltaïcs necessaris en una instal·lació autònoma	105
7.7. Capacitat de l'acumulador	107
7.8. Selecció del regulador de càrrega	109
7.9. Dimensionament del convertidor CC/CA	109
7.10. Dimensionament del grup electrogen	111
8. Dimensionament d'instal·lacions fotovoltaïques per a bombament d'aigua	112
8.1. Caracterització dels consums	112
8.2. Energia necessària per al bombament	112
8.3. Dimensionament d'equips solars per al bombament directe d'aigua	114
9. Dimensionament d'instal·lacions fotovoltaïques connectades a xarxa	119
9.1. Dimensionament d'una instal·lació	121
9.2. Radiació solar disponible	122
9.3. Pèrdues dels components	122
9.4. Càlcul de la producció energètica	123
9.5. Càlcul de l'aparellatge elèctric	124
9.6. Dispositius de protecció de CC	126
9.7. Secció dels conductors elèctrics des de l'inversor al punt de connexió	127
9.8. Dispositius de protecció de CA	128
9.9. Presa de terra	129



Presentació

El nou Pla de l'energia i del canvi climàtic de Catalunya 2012-2020 avança cap a un model de baixa intensitat energètica i de baixa emissió en carboni, amb una aposta molt ferma i intensa per la utilització, entre d'altres, de les energies renovables. Del seu conjunt, l'energia solar representa a Catalunya una font d'energia renovable rellevant, ja que la radiació solar que tenim disponible és una de les més elevades d'Europa.

L'aprofitament fotovoltaic d'aquesta radiació solar ha experimentat un creixement exponencial a Espanya en els darrers anys, arrel de l'aprovació d'un marc retributiu favorable al quilowatt hora produït i connectat a la xarxa elèctrica. En aquest context, a Catalunya, l'any 2008 ja es va superar àmpliament la potència objectiu de 100 MW inicialment establerta al primer Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015, motivant-ne la revisió a l'alça fins als 500 MW.

La disminució notable dels preus dels mòduls i, en conseqüència, de les despeses d'inversió de les instal·lacions fotovoltaïques, juntament amb la gran adaptabilitat que aquests sistemes presenten, n'ha facilitat la integració en l'àmbit de l'edificació (cobertes de naus industrials, teulades d'edificis, façanes, marquesines, etc).

Aquesta generació distribuïda constitueix una aposta en la política energètica en matèria de renovables del Govern de la Generalitat de Catalunya, que es veurà reforçada per l'aplicació de la Directiva 2010/31/UE del Parlament Europeu i del Consell, de 19 de maig, relativa a l'eficiència energètica en edificis. En aquest sentit, la Directiva obliga a que tots els edificis nous o amb reformes importants tinguin un "consum d'energia quasi nul" a partir del 31 de desembre de 2020, i que aquesta quantitat d'energia necessària es cobreixi mitjançant fonts renovables, un àmbit en què la fotovoltaica, per la seva versatilitat, serà una de les més utilitzades.

La publicació que teniu a les mans s'insereix en aquesta realitat. Amb la finalitat de formar professionals en la tecnologia fotovoltaica, tot mostrant els components, els esquemes bàsics i el dimensionat d'instal·lacions tant les autònomes com les connectades a la xarxa, hi ha també el desig de contribuir a difondre les virtuts d'una manera senzilla de generar electricitat, neta, segura i inesgotable i, a un cost cada cop més competitiu.

Esperem que llegir-la us resulti profitós.



1. Marc normatiu

Les instal·lacions solars fotovoltaïques són instal·lacions generadores d'electricitat en baixa tensió que, normativament, no presenten diferències significatives respecte a les instal·lacions generadores que utilitzen altres fonts d'energia com el gas, el gasoil, etc.

Les instal·lacions solars fotovoltaïques estan subjectes al marc normatiu establert per les instal·lacions elèctriques de baixa tensió RBT (*Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*) i més específicament la instrucció tècnica ITC-BT 40 *Instalaciones Generadoras de Baja Tensión*. En aquesta norma s'hi identifiquen únicament les tipologies següents de generadors en baixa tensió:

- **Instal·lacions generadores aïllades de la xarxa elèctrica.** Aquestes instal·lacions no presenten cap tipus de connexió amb la xarxa elèctrica i corresponen a sistemes autònoms de generació d'electricitat.
- **Instal·lacions generadores assistides.** Aquesta configuració correspon a equips de recolzament que actuen en cas de fallada de subministrament elèctric i/o manca de potència elèctrica. En tot cas, no es permet que el generador elèctric treballi en paral·lel amb la xarxa de distribució elèctrica.
- **Instal·lacions generadores interconnexionades a la xarxa elèctrica.** Són instal·lacions que habitualment estan interconnexionades amb la xarxa elèctrica, treballant-hi en paral·lel.

En aquest context, les instal·lacions solars fotovoltaïques -per costos i pels requisits normatius descrits anteriorment- quedaran restringides als àmbits següents:

- **Instal·lacions fotovoltaïques autònomes.** Instal·lacions de subministrament elèctric en zones aïllades de les xarxes de distribució elèctrica; aquestes instal·lacions no presenten cap tipus de connexió amb la xarxa elèctrica.
- **Instal·lacions fotovoltaïques d'interconnexió a la xarxa.** Petits o grans generadors fotovoltaïcs connectats a la xarxa elèctrica i que venen tota la producció elèctrica a les comercialitzadores d'electricitat mitjançant un contracte regulat per l'organisme administratiu competent.

1.1. Reglamentació aplicable

Totes les instal·lacions solars fotovoltaïques estan subjectes a l'RBT (*Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*) pel que fa als requisits de seguretat elèctrica i no presenten diferències significatives respecte a les normes aplicables a la resta d'instal·lacions elèctriques.

En referència al dimensionament i als muntatges dels equips específics de les instal·lacions fotovoltaïques, únicament cal ressaltar el *Código Técnico de la Edificación*, Apartat HE 5, que és on es descriu l'obligatorietat d'incorporar energia solar fotovoltaïca als grans edificis de nova construcció (hotels, hospitals, centres comercials, etc.) aplicable a tot l'Estat. En aquest document es fa esment dels paràmetres bàsics de dimensionament de les instal·lacions fotovoltaïques subjectes a aquesta norma.

Per a la resta d'instal·lacions fotovoltaïques, cal tenir en compte el compliment de les normes UNE-EN elaborades pel Comitè Tècnic de Normalització, les AEN/CTN/206/GT82, que corresponen a sistemes d'energia solar fotovoltaïca i que defineixen els paràmetres mínims exigibles als equips i instal·lacions fotovoltaïques.

Pel que fa estrictament al dimensionament de les instal·lacions fora de l'àmbit del *Código Técnico* no hi ha cap norma que sigui obligatori complir i només ens podem referir al *Pliego de Condiciones Técnicas* publicat per l'IDAE com a document guia per al dimensionament de les instal·lacions fotovoltaïques, tot i que aquest document no és cap norma; únicament és una guia tècnica de referència.

Complementàriament a tot això i referit únicament a les instal·lacions fotovoltaïques de connexió a la xarxa, les companyies elèctriques estableixen els requisits tècnics que han de complir totes les instal·lacions fotovoltaïques que vulguin operar a través de la seva xarxa elèctrica.

A la taula 1.1 es presenta un recull de les normes i recomanacions tècniques aplicables a les instal·lacions fotovoltaïques.

Normatives que és obligatori que compleixin les instal·lacions fotovoltaïques
<ul style="list-style-type: none">• REBT <i>Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión</i>.• Reial decret 1663/2000, de 29 de setembre, sobre connexió d'instal·lacions fotovoltaïques a la xarxa de baixa tensió.• <i>Código Técnico de la Edificación</i> (CTE), Apartat HE 5, en què s'estableixen les bases reglamentàries per a la instal·lació de sistemes solars fotovoltaïcs.• Normes UNE-EN elaborades pel Comitè Tècnic de Normalització, les AEN/CTN/206/GT82.
Recomanacions tècniques per a instal·lacions solars fotovoltaïques autònomes
<ul style="list-style-type: none">• <i>Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Aisladas de Red</i> (IDAE).• <i>Norma Técnica Universal para Sistemas Fotovoltaicos Domésticos Thermie B</i>: SUP-995-96.
Recomanacions tècniques per a instal·lacions solars fotovoltaïques connectades a xarxa
<ul style="list-style-type: none">• <i>Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a la Red</i> (IDAE).• Condicions Tècniques que han de complir les Instal·lacions Fotovoltaïques per a la Connexió a la Xarxa de Distribució de FECSA ENHER.

Taula 1.1. Relació de normes bàsiques referides a l'energia solar fotovoltaïca.

* Complementàriament, és necessari conèixer i aplicar les normatives urbanístiques i/o ordenances solars específiques del municipi en què s'executi la instal·lació.

1.1.1. Qualificació professional

Segons la normativa vigent, els tècnics qualificats per a executar les instal·lacions fotovoltaïques seran els instal·ladors elèctrics de baixa tensió amb categoria d'especialista IBTE, que habilita l'instal·lador/a per a executar i dissenyar les instal·lacions generadores d'electricitat en baixa tensió.

Aquest és l'únic requisit oficial necessari per a poder dur a terme aquesta activitat professional.

En el cas de les instal·lacions fotovoltaïques connectades a la xarxa d'una potència superior a 5 kW, cal la intervenció de l'enginyeria en el disseny i seguiment de l'execució de la instal·lació, certificada mitjançant un projecte visat pel Col·legi d'Enginyers.



2. El Sol com a recurs energètic

És un estel de la seqüència principal, de classe espectral G2, que significa que és una mica més gran i calent que un estel mitjà. És una immensa bola de plasma formada, majoritàriament, per hidrogen i per heli. Radia una gran quantitat d'energia a l'espai mitjançant processos nuclears de fusió. Es va formar fa uns 4.500 milions d'anys, al mateix temps que el sistema solar, i arribarà al final de la seva vida d'aquí a uns 5.000 milions d'anys més. Quan arribi aquest moment, es convertirà en un gegant vermell i després en un nan blanc.

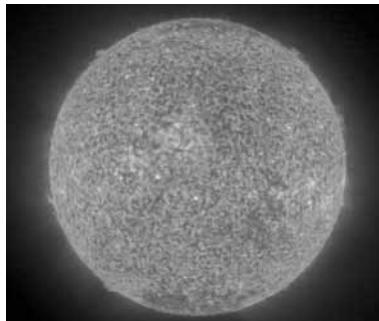
Per tant, és la principal font d'energia de la vida. També aporta l'energia que manté en funcionament els processos climàtics.

2.1. Radiació solar incident en la superfície de l'atmosfera

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 anomenem radiació solar i fa referència a un fenomen físic vibratori que es representa en forma d'ones.

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

Figura 2.1.
Imatge del Sol.



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

Taula 2.1. Distribució espectral de radiació extraterrestre.

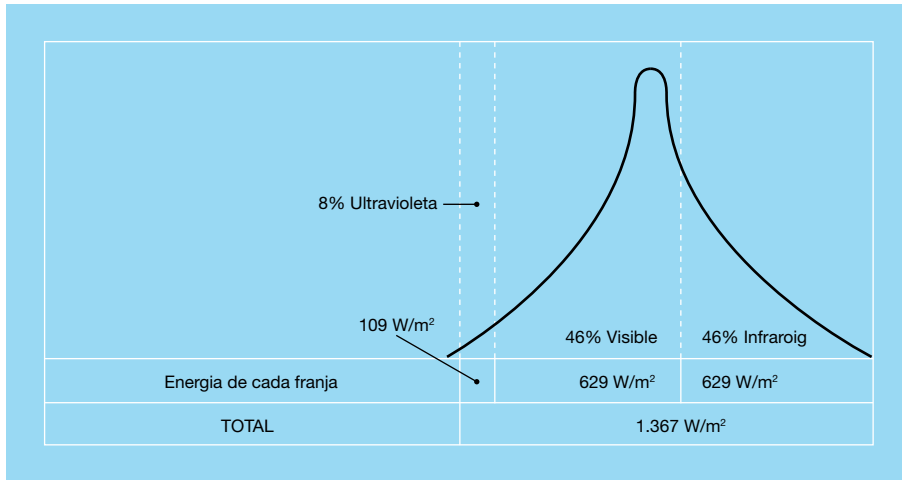


Figura 2.2. Representació gràfica de la distribució en termes de potència i de percentatge de l'espectre electromagnètic.

2.1.1. Constant solar

La potència de la radiació solar rebuda sobre una unitat de superfície (m^2), sobre un pla tangent a l'esfera imaginària formada per la capa externa de l'atmosfera, s'anomena constant solar.

El valor d'aquesta constant és de: $1.353 \text{ W}/\text{m}^2$.

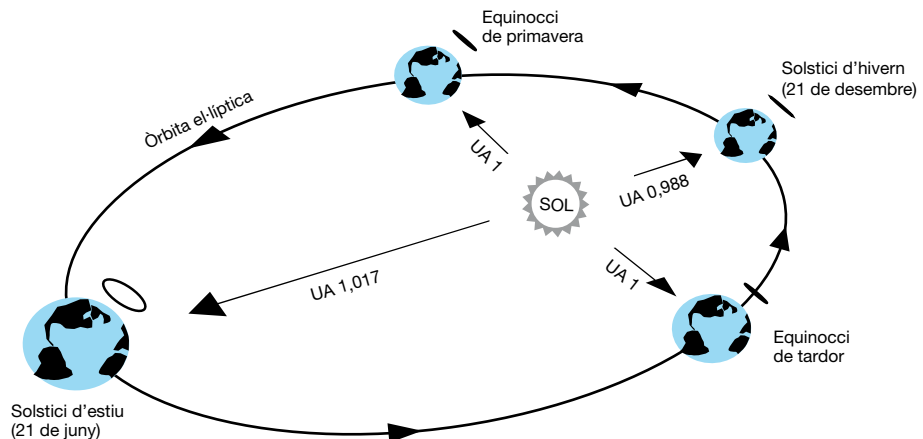
Encara que aquest valor s'anomeni "constant solar", no és un valor fix, sinó que varia aproximadament $\pm 3\%$ en funció de les variacions de la distància Sol-Terra durant l'any.

L'òrbita terrestre

La Terra gira al voltant del Sol formant una el·líptica en la qual el Sol és el focus, amb una separació màxima el 21 de juny (afeli) i una distància mínima el 21 de desembre (periheli), mentre que la distància mitjana entre els dos astres (UA) és de 149.600.000 km.

D'altra banda, la Terra gira sobre un eix imaginari que està inclinat $23^\circ 30'$ respecte del pla de l'eclíptica (pla de l'òrbita terrestre al voltant del Sol) o sigui que l'eix de la Terra no és perpendicular a la seva òrbita. La ruta aparent del Sol a través del cel porta el nom d'eclíptica.

Figura 2.3. Representació gràfica del desplaçament de la Terra al voltant del Sol.



2.2. Radiació solar incident en la superfície de la Terra

La radiació solar és força constant abans d'entrar a l'atmosfera; en canvi, un cop ha travessat la franja d'aire que ens envolta, la radiació solar experimenta tot un seguit de processos d'interacció amb la matèria (gasos, pols en suspensió, vapor d'aigua, etc.) que forma l'atmosfera. En aquest procés, la radiació solar s'alterarà a causa dels fenòmens físics següents:

1. **Reflexió:** una part de la radiació no penetra, sinó que es desvia cap a l'exterior com si es tractés d'un mirall.
2. **Transmissió:** una part de la radiació travessa l'atmosfera terrestre, de manera que aquesta radiació pot patir més o menys canvis de direcció i/o velocitat (refracció).
3. **Absorció:** una part de la radiació és absorbida per l'atmosfera, cosa que produeix un escalfament per l'impacte sobre els àtoms que componen l'atmosfera terrestre.

A causa dels fenòmens descrits anteriorment, només una part de l'energia disponible es podrà aprofitar a nivell del mar. Aquest filtrat es dona no només en quantitat, sinó també en composició: l'energia que incideix, es distribueix al llarg de les diferents bandes de radiació, tal com podem observar en el gràfic següent.

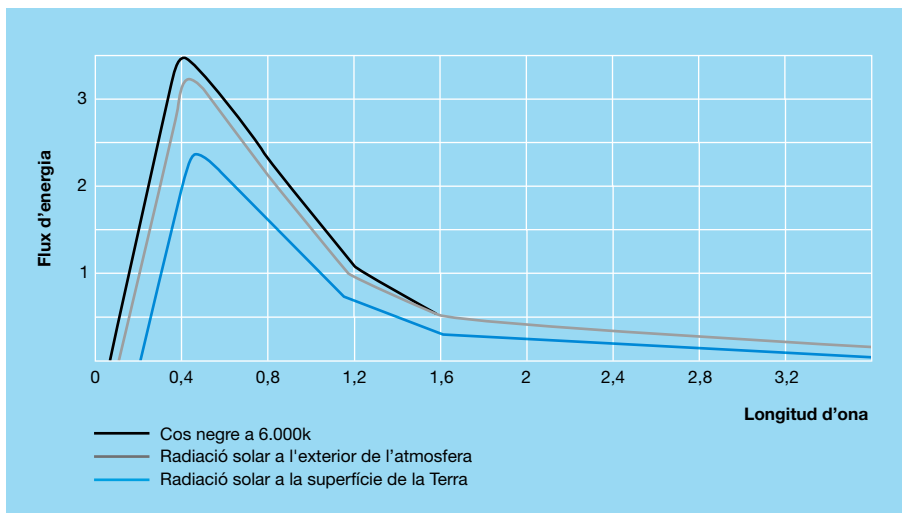


Figura 2.4. Representació gràfica de la diferència de l'energia incident en la superfície de l'atmosfera i la superfície de la Terra.

D'altra banda, la radiació solar incident en la superfície de la Terra està condicionada pels factors que descriurem a continuació.

2.2.1. Localització geogràfica

La radiació incident variarà en funció de la localització geogràfica. Com més allunyats de l'equador ens situem, menys nivell de radiació incident per unitat de superfície (W/m^2) tindrem.

Això és a causa, principalment, de l'angle d'incidència de la radiació sobre la Terra, que és menys perpendicular al Sol i, alhora, la radiació solar ha de travessar més atmosfera, més "massa d'aire", que actua de filtre de la radiació solar.

La radiació solar incident pot variar fins a un 30% per aquest concepte.

L'alçada respecte al nivell del mar serà un altre dels factors que afectarà directament la quantitat de radiació incident. L'espessor d'atmosfera que ha de travessar la radiació solar varia en funció de la distància que hi ha entre el punt d'ubicació i de l'estratosfera.

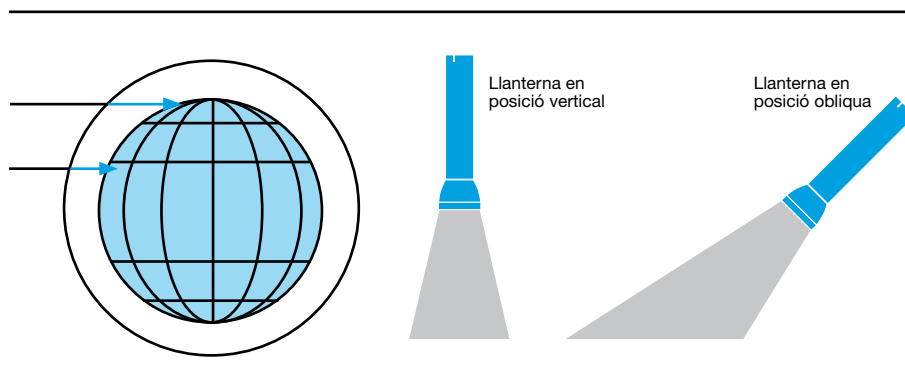


Figura 2.5. Amb una il·luminació obliqua, s'ocupa més superfície d'il·luminació, però incideix menys llum per unitat de superfície. Passa el mateix amb la radiació solar: com més ens allunyem de l'equador, menys perpendicular és la radiació solar i, per tant, hi ha menys energia incident per unitat de superfície (W/m^2).

Taula 2.2. Variació de la radiació en funció de l'alçada sobre el nivell del mar.

Alçada sobre el nivell del mar (m)	0	900	1.500	2.250
Intensitat màxima de radiació (W/m ²)	950	1.050	1.100	1.150

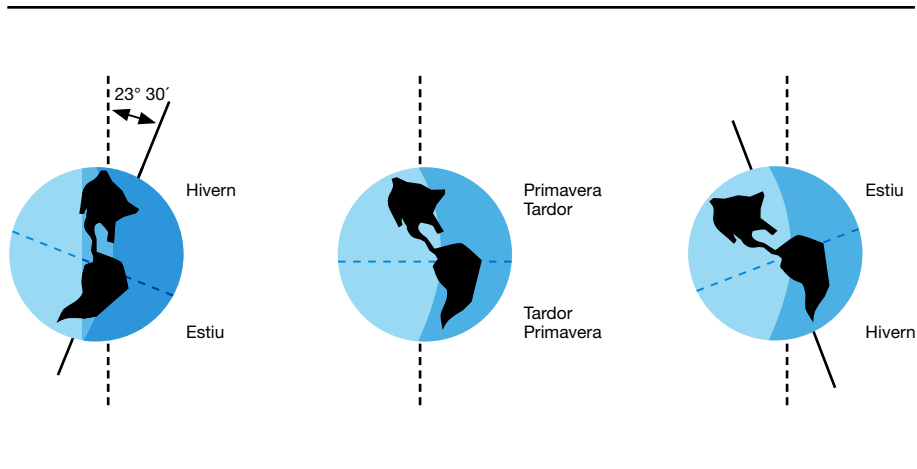
2.2.2. Factor estacional

Les estacions de l'any vénen determinades per la declinació de la Terra respecte al Sol, cosa que incideix directament sobre el temps d'exposició diària a la radiació solar, tal com podem observar a la figura 2.6.

Com a conseqüència d'aquesta inclinació, a cada punt de l'òrbita terrestre variarà la geometria de la situació d'un emplaçament respecte del Sol.

Aquest fet fa variar l'angle d'incidència i el temps d'exposició a la radiació solar, que dóna pas a les estacions meteorològiques, que són oposades en dates entre els dos hemisferis perquè la radiació solar hi incideix amb angles diferents.

Figura 2.6. Representació gràfica de la declinació de la Terra en funció de l'estació de l'any.



2.2.3. Factor climatològic

De l'energia solar que travessa l'atmosfera i que incideix sobre l'escorça de la Terra, una part principal arriba en forma directa, és a dir, que no pateix canvis de dispersió en la direcció. La resta d'energia arriba de manera difusa o dispersa. Aquesta última correspon als raigs desviats per les gotes de vapor d'aigua en suspensió (núvols).

Com més ennuvolat és el dia, més important és la radiació difusa; en canvi, com més clar, més participació hi ha de la radiació directa.

La climatologia específica de la localització establerta serà el factor determinant de la radiació solar incident, ja que els elements climatològics com els núvols o les boires actuen com un intens filtre de la radiació solar que la redueix d'una manera important.

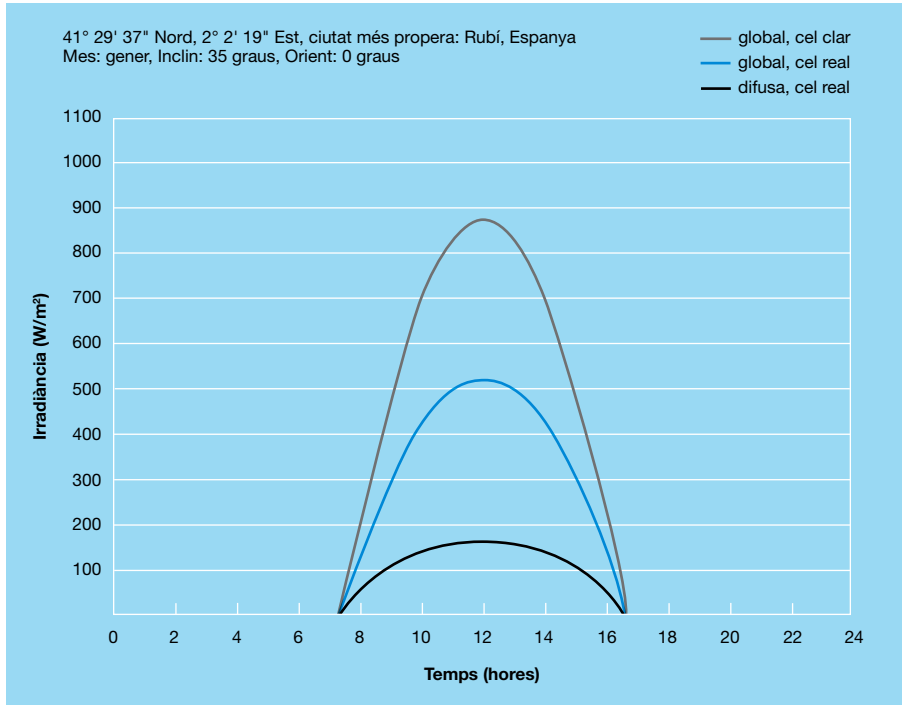


Figura 2.7. Representació gràfica de la diferència d'intensitat de radiació en funció de la climatologia.

	Radiació global (W/m ²)	Percentatge de difusa (%)
Cel clar	750 - 1.000	10 - 20
Parcialment núvol	200 - 500	20 - 90
Tapat	50 - 150	90 - 100

Taula 2.3. Influència del factor climatològic.

2.2.4. Valor estàndard de referència “hora sol pic” (hsp)

A causa d'aquesta accentuada variabilitat pel que fa a possibles valors de la radiació incident en un lloc i en un moment determinats sobre la Terra, la indústria ha fixat un valor de referència per a la prova d'equips, etc.: l'anomenada “hora sol pic” (hsp).

Valor estàndard de referència: 1.000 W/m².

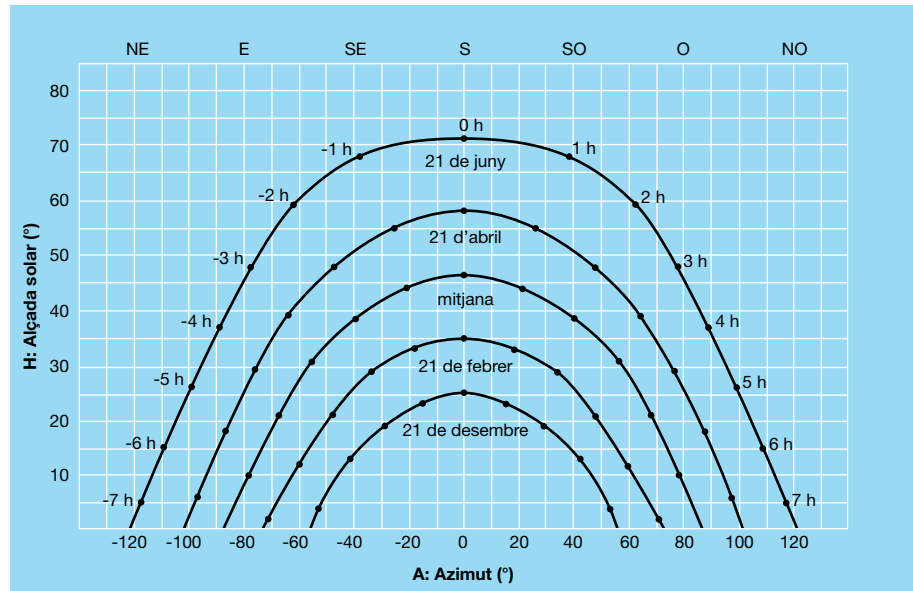
2.3. Avaluació del recurs “radiació solar incident”

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, un observador té la sensació que ell està estàtic i que és l'univers el que gira al seu voltant.

Per tant, tot i que sigui la Terra la que gira, ens hem acostumat a associar el moviment del sistema Sol-Terra només al Sol.

En aquest context, podem establir que l'alçada solar varia durant el dia. El Sol surt molt baix i sobre l'horitzó, assoleix l'alçada màxima al migdia, per tornar a amagar-se a la tarda. De la mateixa manera, cada dia de l'any el Sol arriba a una alçada màxima diferent.

Figura 2.8. Diagrama de les trajectòries del Sol a Catalunya.



Taula 2.4. Trajectòria del Sol.

H	Gener		Febrer		Març		Abril		Maig		Juny		Juliol		Agost		Set.		Oct.		Nov.		Des.	
	A	H	A	H	A	H	A	H	A	H	A	H	A	H	A	H	A	H	A	H	A	H	A	H
0	0	27	0	35	0	46	0	58	0	67	0	71	0	70	0	62	0	51	0	39	0	29	0	25
1	16	26	18	33	21	44	26	55	33	64	38	68	36	66	29	59	23	49	19	37	16	28	15	23
2	30	21	34	29	39	38	48	48	57	56	63	59	60	58	52	52	43	42	36	32	31	23	29	19
3	43	15	48	21	55	30	64	39	73	46	78	48	76	47	68	42	58	34	50	25	44	17	42	13
4	54	6	60	12	67	20	76	29	85	35	89	37	87	36	80	32	71	24	62	15	56	8	53	4
5			71	2	78	9	87	18	95	23	99	26	97	25	91	20	82	13	73	5				
6							97	6	104	12	108	15	106	14	101	9	92	2						
7									114	2	117	5	116	4										

A Catalunya, el valor més alt és el del dia del solstici d'estiu, proper als 71°; i el més baix, el del solstici d'hivern, proper als 25°.

2.3.1. Paràmetres de la posició del Sol

Azimut (A): és l'angle comprès entre la projecció dels raigs solars sobre el pla tangent a la superfície terrestre i el sud geogràfic. L'azimut de 0° correspon al moment en què el Sol es troba exactament sobre el sud geogràfic i indica el migdia: les 12:00 h, hora solar.

Alçada solar (H): és l'angle que formen els raigs solars amb l'horitzontal quan arriben a la superfície de la Terra.

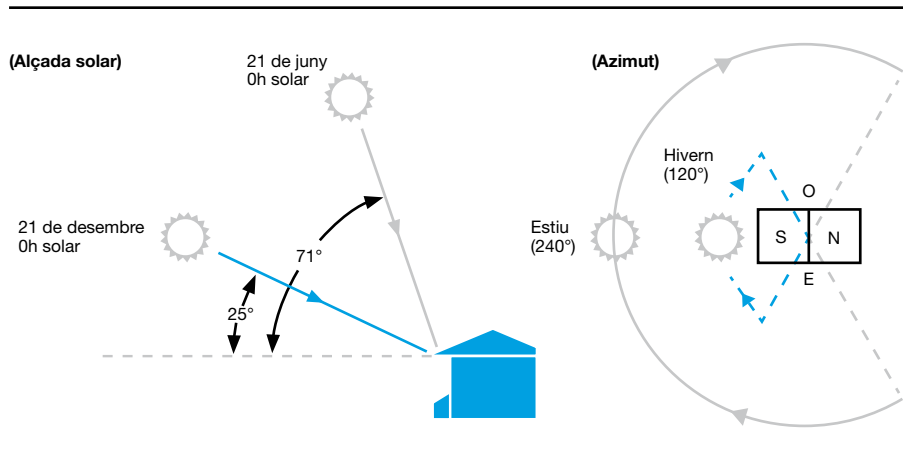
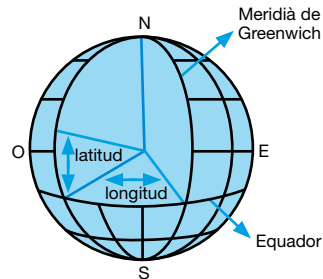


Figura 2.9. Representació gràfica dels paràmetres significatius de la trajectòria solar.

Coordenades terrestres

Qualsevol punt de la Terra es pot localitzar per les seves coordenades globals, denominades Latitud (φ) i Longitud (L), corresponents al seu paral·lel i meridià, respectivament. La latitud φ es mesura per la seva elevació en graus respecte a l'equador, considerant el pol nord com $\varphi = 90^\circ$ N. La longitud és l'angle que forma el meridià del punt a observar amb el meridià 0° de referència que passa per Greenwich (Londres).



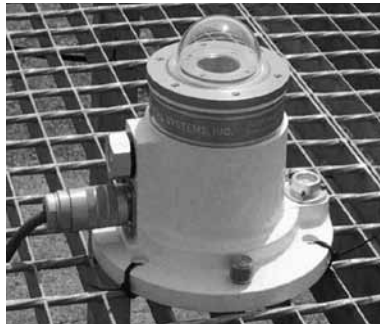
2.3.2. Avaluació de la radiació incident

Per a mesurar la radiació total que una superfície rep 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.

Un piranòmetre col·locat sobre una superfície perfectament horitzontal, lliure d'obstacles al seu voltant, rep la radiació total (directa més difusa) de tota la volta celeste, cosa que permet avaluar l'energia disponible a la zona on és ubicat.

Òbviament, les dades de radiació que s'obtenen a partir dels piranòmetres han de ser de gran fiabilitat, ja que un cop recopilades durant anys i després d'un intens procés matemàtic i estadístic s'incorporen a les anomenades taules de radiació solar.

Figura 2.10. Piranòmetre UVA YANKEE.



2.3.3. Taules de radiació

Conèixer la radiació ens permet avaluar l'energia solar incident en la nostra instal·lació, a quines hores funcionarà a màxima potència, com treure'n el millor profit, etc.

La radiació solar instantània (irradiància) és molt important a l'hora de poder avaluar el que està passant en un moment determinat en una instal·lació que està en funcionament. Però a l'hora de poder avaluar l'energia que produirà un sistema, o quan hem de fer els càlculs per a dimensionar-lo, el que necessitem és saber la quantitat d'energia que aquesta radiació aporta durant un període de temps concret o d'irradiació.

L'obtenció de la informació continguda a les taules de radiació és una tasca laboriosa, ja que es necessiten mesures de qualitat durant molts anys (més de 10 anys) i un treball posterior de validació i de correlacions matemàtiques per tal de poder extrapol·lar les dades al territori i a diferents orientacions i inclinacions.

Finalment, els resultats són els anomenats atles de radiació solar, com l'*Atles de radiació solar de Catalunya*, edició 2000, elaborat per l'Institut Català d'Energia i que permet obtenir dades de radiació global (directa + difusa + reflectida) de 83 estacions de mesurament, distribuïdes arreu del territori català. A continuació, presentem algunes taules d'aquest atles.

A la taula adjunta, tenim les dades obtingudes per a l'estació de Barcelona i ens indica els valors mitjans de la radiació global diària ($\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$), és a dir, la suma de tots els components de la radiació (directa, difusa i reflectida) que rebria una superfície d'1 m^2 que estigués orientada al sud (Azimut = 0) en funció de la seva inclinació, per cadascun 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.

Orientació: 0°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
0°	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°	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°	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°	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°	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°	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°	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°	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°	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°	12,83	15,15	17,94	19,98	20,67	20,84	20,90	20,63	19,26	16,63	13,85	12,19	17,58
50°	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°	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°	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°	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°	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°	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°	13,13	14,31	15,12	14,41	13,81	12,36	12,80	14,17	15,31	15,08	13,86	12,77	13,87
85°	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°	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

Taula 2.5. Radiació solar global diària sobre superfícies inclinades ($\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$). Estació: Barcelona.

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, 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 durant l'any es dona amb inclinació 35° amb 17,73 $\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$. 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.
- Tot i que és a 65° que trobem la màxima insolació al mes de desembre, a 50° 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 desviades del sud 30, 60 i 90°, amb independència de si aquesta desviació és en direcció est o oest (annex).

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.

1MJ = 0,27 kWh

1MJ = 240 kcal

Una altra dada que presenta l'Atles de radiació de Catalunya són els valors mitjans de radiació global horària. Aquesta dada és útil per a determinar el perfil de producció d'energia durant el dia.

Pel que fa a la reglamentació actual, el CTE-HE4 estableix la potència pic a instal·lar en funció dels paràmetres següents:

1. Tipologia d'utilització d'edificació.
2. Superfície de l'edifici.
3. Les zones climàtiques on s'ubicarà la instal·lació.

Taula 2.6. Radiació solar global horària sobre superfícies inclinades (kJ/m²). Estació: Barcelona.

Inclinació: 45° / Orientació: 0°																	
Mes	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	Total
Gen	0	0	0	292	857	1.387	1.819	2.061	2.061	1.819	1.387	857	292	0	0	0	12.832
Feb	0	0	0	504	1.062	1.619	2.069	2.321	2.321	2.069	1.619	1.062	504	0	0	0	15.152
Mar	0	0	188	702	1.294	1.871	2.330	2.585	2.585	2.330	1.871	1.294	702	188	0	0	17.943
Abr	0	14	313	862	1.468	2.044	2.496	2.746	2.746	2.496	2.044	1.468	862	313	14	0	19.887
Mai	0	97	380	939	1.534	2.088	2.530	2.766	2.766	2.530	2.088	1.534	939	380	97	0	20.669
Jun	0	130	404	964	1.552	2.103	2.520	2.748	2.748	2.520	2.103	1.552	964	404	130	0	20.844
Jul	0	114	393	957	1.554	2.116	2.542	2.775	2.775	2.542	2.116	1.554	957	393	114	0	20.904
Ago	0	50	345	911	1.525	2.102	2.568	2.816	2.816	2.568	2.102	1.525	911	345	50	0	20.634
Set	0	0	248	791	1.405	1.997	2.464	2.723	2.723	2.464	1.997	1.405	791	248	0	0	19.257
Oct	0	0	0	604	1.193	1.775	2.242	2.502	2.502	2.242	1.775	1.193	604	0	0	0	16.630
Nov	0	0	0	383	941	1.487	1.931	2.180	2.180	1.931	1.487	941	383	0	0	0	13.845
Des	0	0	0	222	800	1.324	1.753	1.995	1.995	1.753	1.324	800	222	0	0	0	12.190
Inclinació: 60° / Orientació: 0°																	
Mes	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	Total
Gen	0	0	0	341	923	1.457	1.891	2.134	2.134	1.891	1.457	923	341	0	0	0	13.490
Feb	0	0	0	538	1.091	1.641	2.085	2.333	2.333	2.085	1.641	1.091	538	0	0	0	15.374
Mar	0	0	187	681	1.252	1.809	2.253	2.500	2.500	2.253	1.809	1.252	681	187	0	0	17.364
Abr	0	14	245	760	1.332	1.877	2.307	2.545	2.545	2.307	1.877	1.332	760	245	14	0	18.159
Mai	0	95	243	759	1.313	1.832	2.248	2.468	2.468	2.248	1.832	1.313	759	243	95	0	17.916
Jun	0	128	247	743	1.288	1.801	2.190	2.402	2.402	2.190	1.801	1.288	743	247	128	0	17.600
Jul	0	112	233	753	1.307	1.833	2.231	2.449	2.449	2.231	1.833	1.307	753	233	112	0	17.837
Ago	0	48	247	773	1.349	1.894	2.337	2.571	2.571	2.337	1.894	1.349	773	247	48	0	18.440
Set	0	0	222	739	1.325	1.892	2.341	2.590	2.590	2.341	1.892	1.325	739	222	0	0	18.220
Oct	0	0	0	621	1.198	1.768	2.225	2.480	2.480	2.225	1.768	1.198	621	0	0	0	16.587
Nov	0	0	0	434	1.000	1.547	1.990	2.238	2.238	1.990	1.547	1.000	434	0	0	0	14.416
Des	0	0	0	269	876	1.407	1.840	2.083	2.083	1.840	1.407	876	269	0	0	0	12.952

En l'aspecte que pertoca a aquest capítol, la radiació solar i la seva avaluació quantitativa són incloses a l'apartat 3.1.2 *Zonas climáticas* de l'HE4. Aquestes zones han estat definides tenint en compte la radiació solar global mitjana diària sobre superfície horitzontal (H) segons la taula 2.7.

En el cas que la localitat d'ubicació de la instal·lació no aparegui indicada a la taula 2.7. (taula de Zonas climáticas de l'HE 4), s'haurà d'utilitzar la zona climàtica de la localitat més propera o utilitzar la taula anterior si disposem de dades de radiació precises de la nostra geografia.

Radiació solar global mitjana diària		
Zona climàtica	MJ/m ²	kWh/m ²
I	H < 13,7	H < 3,8
II	13,7 ≤ H < 15,1	3,8 ≤ H < 4,2
III	15,1 ≤ H < 16,6	4,2 ≤ H < 4,6
IV	16,6 ≤ H < 18,0	4,6 ≤ H < 5,0
V	H ≥ 18,0	H ≥ 18,0

Taula 2.7. Zones climàtiques en funció de la radiació segons el CTE.

2.3.4. Radiació incident: "hora sol pic" (hsp)

Per a calcular 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 dels mòduls que hem determinat.

Com que els fabricants dels panells fotovoltaics expressen la potència dels seus productes en Watts pic en unes condicions de radiació solar 1.000 W/m², farem un canvi d'unitats per passar els MJ/m²·dia de les taules de radiació a kWh/m²·dia, multiplicant el valor de la taula de radiació per 0,27 kWh/MJ.

Un cop disposem de la radiació en kWh/m²·dia, la dividim pel valor de la radiació estàndard (1 kW/m²) que es fa servir per a calibrar els mòduls i obtenim el valor d'hores pic equivalents, "hsp", un valor que vindria a expressar les hores de llum solar al dia amb una intensitat fixa de 1.000 W/m² 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).

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

A efectes de càlculs energètics, és el mateix suposar que el mòdul està rebent una intensitat de radiació de 1.000 W/m² 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 coincideix el nombre d'hsp amb el nombre de quilovats hora 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 MJ/m²·dia (equivalent a 3,527 kWh/m²·dia), el resultat és el mateix que si hi incidís una intensitat de 1.000 W/m²·dia durant 3,527 hores i es diu que les hsp d'aquest mes són 3,527.



3. Ubicació i ancoratge dels panells solars

Qualsevol implantació d'uns sistemes sostenibles porta implícit l'optimització dels recursos a utilitzar. Aquesta és la base del disseny i del muntatge de les instal·lacions solars.

Per a aconseguir, de manera 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. Tot això comporta determinar l'orientació i la inclinació dels panells en instal·lacions fixes per tal d'aconseguir el mínim cost del quilovat hora solar.

3.1. Ubicació dels panells

Per qüestions d'adaptació arquitectònica, els panells acostumen a estar situats a les cobertes, encara que no sigui la zona més pròxima al sistema d'acumulació o de comptadors d'energia. Per qüestions de seguretat i d'integració arquitectònica, es determinarà la coberta de les edificacions com a zona d'ubicació dels panells fotovoltaics.

La coberta és un element estructural de l'edificació del qual hem de conèixer bàsicament quatre paràmetres: la superfície disponible, l'orientació, la càrrega estructural que pot suportar i la incidència d'ombres que pot tenir. Aquests elements condicionaran la disposició dels panells solars i dels sistemes d'ancoratge.

3.1.1. La superfície disponible

La superfície disponible quedarà determinada per l'espai de la coberta en què la propietat determini ubicar els panells. Caldrà procurar que aquesta superfície sigui un espai de fàcil accés per a les operacions de manteniment, alhora que aquest espai haurà d'estar protegit d'actes vandàlics o de caiguda d'objectes. En cap cas, no es pot infringir cap normativa urbanística del municipi i es requerirà el "permís de la comunitat de propietaris" en el cas que la instal·lació dels panells es faci en una comunitat constituïda.

3.1.2. Orientació i inclinació

Per la nostra latitud, l'orientació òptima dels panells serà sud i la inclinació òptima per a instal·lacions de connexió a xarxa serà equivalent a la latitud del lloc - 10°. En el cas de les instal·lacions autònomes, s'establirà com a regla general la taula 3.1.

Aplicació	Inclinació recomanada	Inclinació recomanada a Catalunya (latitud 40° nord)
Instal·lacions d'ús d'hivern	Latitud del lloc + 20°	60°
Instal·lacions d'ús continuat tot l'any sense grup electrogen de suport	Latitud del lloc + 15°	55°
Instal·lacions d'ús continuat tot l'any amb grup electrogen de suport	Latitud del lloc + 10°	50°
Instal·lacions d'ús principal a l'estiu	Latitud del lloc - 10°	30°
Instal·lacions d'ús estacional	Angle complementari a l'alçada solar de l'època d'ús	/
Instal·lacions amb connexió a xarxa	Latitud del lloc - 10°	30°

Taula 3.1. Relació d'inclinacions de panells en funció de la utilització.

Tenint en compte que en alguna ocasió no és possible assolir les condicions d'inclinació i d'orientació adequades, caldrà avaluar, en tot cas, les pèrdues de radiació incident a causa dels condicionants d'ubicació.

A les instal·lacions de connexió a la xarxa, el *Código Técnico de la Edificación* (CTE-HE 5) estableix uns valors límit de pèrdues d'aquestes dues variables que descriurem a continuació:

- 10% anual amb caràcter general.
- 20% anual en el cas de superposició (adaptació dels panells a la geometria de l'edifici).
- 40% anual en el cas d'integració arquitectònica (els panells formant part de l'estructura de l'edifici).

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 els panells, 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 dels panells, ja que les ombres als panells produeixen una minva important de la producció, sobretot si es produeixen a les hores centrals del dia (màxima insolació).

3.2.1. Ombres properes

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 hi ha d'haver cap obstacle que pugui produir ombres sobre els panells solars per un període mínim de 4 hores de sol entorn al migdia del solstici d'hivern.

Per tal de garantir-ho, els panells s'hauran d'instal·lar a una distància mínima dels obstacles propers, determinada per l'expressió següent:

$$d = (h / \tan_{H_{\text{solar}}}) \cdot \cos_{A_{\text{solar}}}$$

En què:

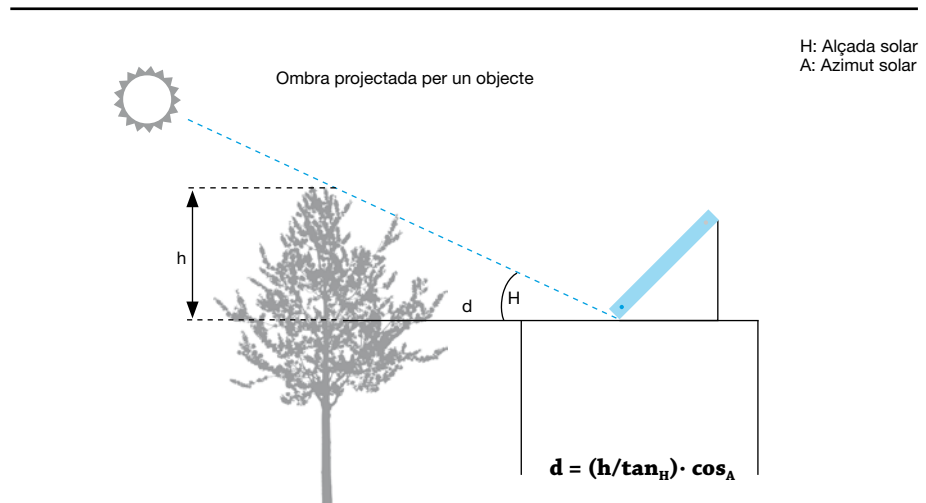
d, és la distància mínima entre l'obstacle i el panell.

h, és l'alçada de l'obstacle.

$\tan_{H_{\text{solar}}}$, és la tangent de l'alçada solar en el mes més desfavorable (desembre) a la nostra latitud.

$\cos_{A_{\text{solar}}}$, és el cosinus de l'azimut solar en el mes més desfavorable (desembre) a les 10 h solar.

Figura 3.1.
Representació gràfica
dels paràmetres de
càlcul de l'ombra.



Podem simplificar l'aplicació d'aquesta expressió amb el que s'anomena factor K i que a Catalunya és igual a:

$$(1 / \tan 19^\circ) \cdot \cos 29^\circ = 2,54$$

El resultat de l'expressió anterior és:

$$K = 2,54$$

Si ens basem en això, establimem que la distància (d) de l'obstacle ha de ser igual o superior a la resultant de multiplicar 2,54 (a Catalunya) per l'alçada (h) de l'obstacle que ens sobrepassi.

$$d = h \cdot K$$

3.2.2. Ombres llunyanes

El fet de conèixer com pot afectar el relleu del paisatge a una instal·lació solar pot ser clau a l'hora de decidir aspectes tan importants com el muntatge o la inclinació dels panells per tal d'aprofitar els mesos d'insolació directa o la mateixa ubicació en solars amb diferents possibilitats.

Per tal de conèixer si durant l'any algun element de l'entorn més o menys llunyà afectarà la insolació del camp de captació, caldrà conèixer l'evolució de les trajectòries que descriu el Sol al llarg dels diferents mesos de l'any.

Aquestes trajectòries es poden consultar en diferents documents de referència. També la majoria dels programes de càlcul d'energia solar basats en models de simulació tenen eines de càlcul per a dibuixar-les i/o representar-les.

El CTE (HE 5 apartat 3.6) facilita l'àbac, representat a la figura 3.2., per a l'estimació d'afectació d'ombres llunyanes. En aquest àbac hi ha representades les alçades solars (expressades com a angles d'elevació) en l'eix vertical i l'azimut en l'eix horitzontal.

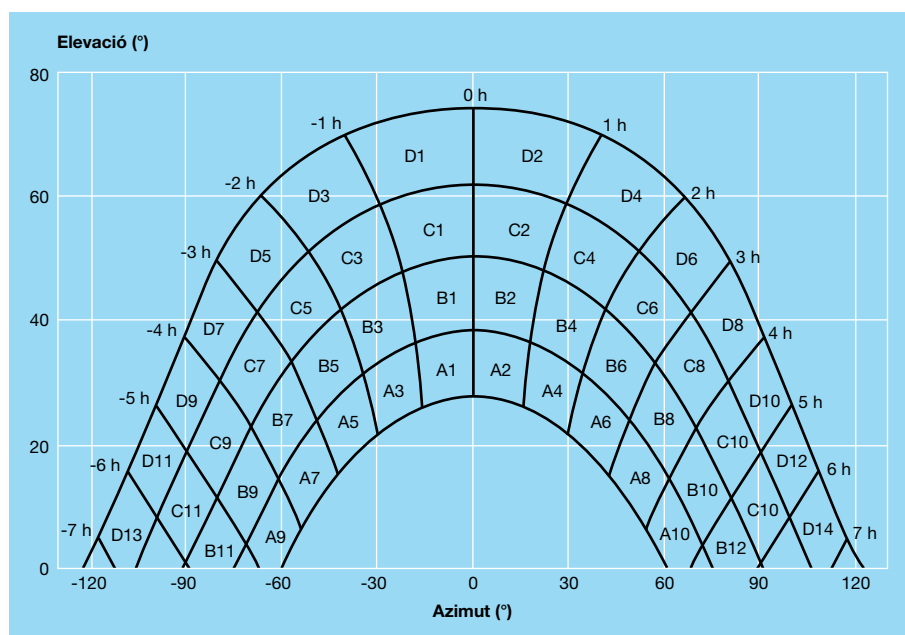


Figura 3.2. Àbac representatiu de l'arc solar, inclòs al CTE HE 5.

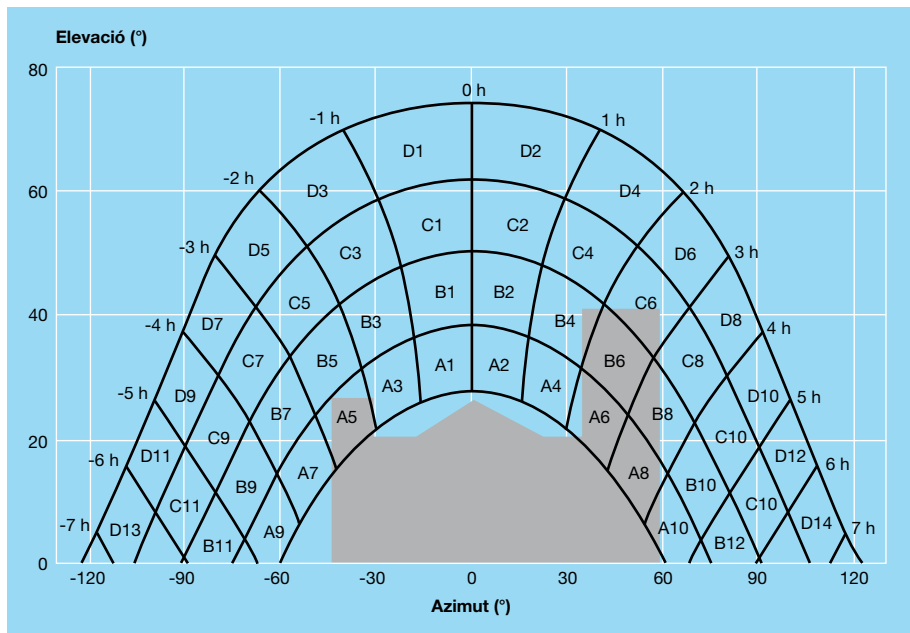
Si observem el paisatge des de la futura ubicació dels panells, podem identificar els elements més importants amb l'observació del seu azimut fent servir una brúixola, i la seva alçada fent servir un inclinòmetre a mode de teodolit.

La comparació del perfil d'obstacles amb el diagrama de trajectòries del Sol permet calcular les pèrdues per ombres de la irradiació solar global que incideix sobre la superfície dels panells en el decurs de l'any.

En el cas que se situï algun obstacle en aquesta franja, s'haurà de fer un estudi d'ombres i avaluar-ne la incidència sobre els panells.

Com es mostra a la figura 3.3., es pot utilitzar l'àbac inclòs al CTE per a superposar el perfil de l'horitzó sobre l'arc solar i, basant-se en això, determinar el percentatge d'ombra anual.

Figura 3.3. Àbac de l'arc solar amb la superposició del perfil de l'horitzó.



3.2.3. Separació entre fileres de panells

La separació entre fileres de panells ha de garantir la no-superposició d'ombres entre les fileres de panells els mesos del solstici d'hivern/estiu.

Aquesta distància quedarà determinada per l'expressió següent, en el cas de panells en disposició horitzontal (sobre un pla).

$$d = (h / \tan_H) \cdot \cos_A$$

En què:

d, és la distància mínima entre línies de panells.

h, és l'alçada de la línia de panells (en vertical, des del punt superior al terra).

\tan_H , és la tangent de l'alçada solar (angle) en el mes més desfavorable (desembre) a la nostra latitud.

\cos_A , és el cosinus de l'azimut solar en el mes més desfavorable (desembre) a les 10 h solar.

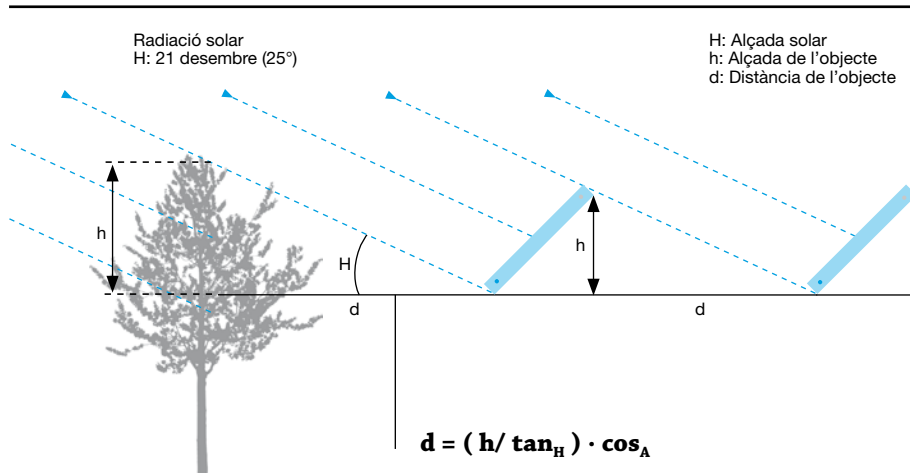


Figura 3.4. Representació gràfica dels paràmetres de càlcul de la distància entre línies de panells.

Aquest càlcul pot quedar simplificat amb l'aplicació del "factor K" per distància entre panells.

Inclinació	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°
Coefficient K	1,81	1,98	2,14	2,27	2,40	2,50	2,59	2,65

Taula 3.2. Coeficient K per a distància entre panells.

L'operació d'establir la distància entre les bases dels panells queda reduïda a la simple multiplicació de la longitud del panell (L) pel coeficient (K) corresponent, en funció de la inclinació de panells utilitzada.

$$d = K \cdot L$$

En què:

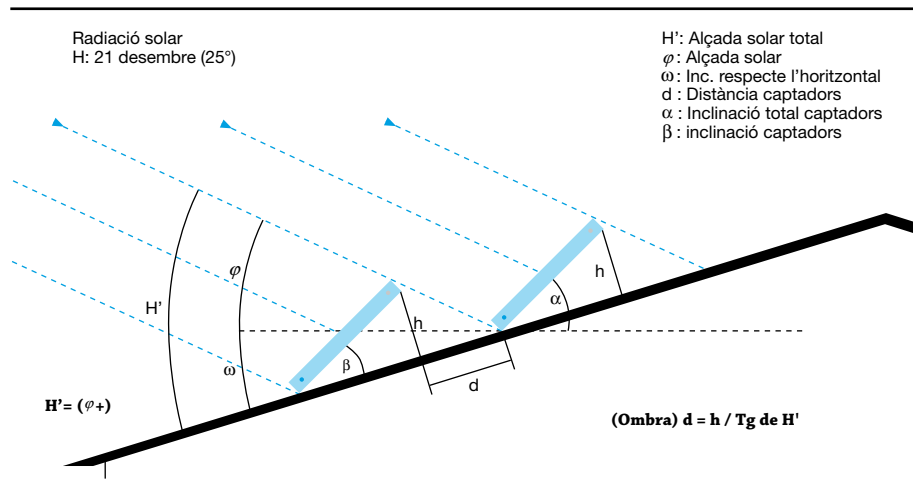
d, és la distància entre la part davantera d'una filera i la part davantera de la següent.

K, és un factor adimensional que té una relació directa amb la inclinació dels panells.

L, és la longitud del panell.

En cas que la ubicació dels panells sigui sobre una superfície inclinada, per a determinar la longitud de l'ombra s'haurà de sumar l'angle d'inclinació de la coberta amb el de l'alçada solar, tal com indiquem a la figura 3.5.

Figura 3.5.
Representació gràfica
dels paràmetres de
càlcul de la distància
entre línies de panells
en una superfície.



L'ombra sobre un pla vertical estarà determinada per l'alçada solar màxima que, en el cas de Catalunya, és la del solstici d'estiu, propera als 71°, per a una latitud de 41° N.

La distància mínima de l'obstacle quedarà determinada per la figura 3.6.

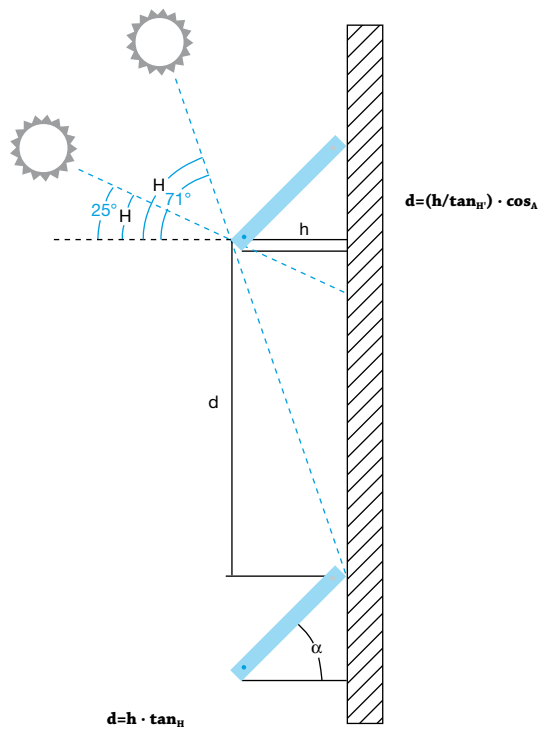


Figura 3.6. Representació gràfica dels paràmetres de càlcul de la distància entre línies de panells en una superfície vertical.

Podem simplificar l'aplicació d'aquesta expressió amb el que anomenarem "factor K" i que és igual a $1 \times \tan 71^\circ$.

K = 2,9

3.3. Ancoratges dels captadors

L'ancoratge dels panells és un dels elements de la instal·lació que estarà sotmès a esforços mecànics importants 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.

A l'hora d'establir el tipus d'ancoratge de la instal·lació, caldrà avaluar els condicions imposats per la ubicació de la instal·lació.

3.3.1. Sistema d'ancoratge

El sistema d'ancoratge pot ser una de les parts més delicades a l'hora de l'execució d'una instal·lació: d'una banda, han de ser força robusts per a poder suportar la força del vent, essencialment el del nord; d'altra banda, la seva instal·lació ha de ser molt acurada, pel risc de produir desperfectes en una part sensible de l'edificació, la coberta.

Figura 3.7. Panells fotovoltaics situats en una coberta inclinada.



Figura 3.8. Lloses de formigó per a suportar panells fotovoltaics.



Per aquest motiu, no són recomanables els sistemes d'ancoratge en què sigui necessari perforar la coberta. Ara bé, en cas que no es pugui evitar la utilització d'aquests sistemes, els forats s'hauran d'omplir amb silicona, escuma de poliuretà, pintura impermeabilitzant o similar. Un cop ancorada l'estructura, s'haurà de segellar i impermeabilitzar cadascun dels ancoratges. Tot i així, es corre el risc d'humitats a la coberta a causa, o no, del muntatge dels panells solars.

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 i, per tant, no serà necessari perforar la coberta.

El tipus d'ancoratge per a un suport de panells dependrà del format de la base de què disposem en 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.

Com que els panells habitualment estaran orientats cap al sud, el vent que pot representar un risc més important és el del nord, ja que produirà forces de tracció sobre els ancoratges, que sempre són més destructives que les forces de compressió.

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 els panells.

En els casos en què les cobertes siguin de fibrociment (uralita) o bé metàl·liques, s'haurà d'estudiar la possibilitat d'incorporar una estructura autosuportant subjectada sobre les columnes laterals o les bigues transversals. No obstant això, en aquest tipus de cobertes no transitables, caldria considerar l'ús dels mòduls fotovoltaics de capa prima (*thin film*) perquè tenen una baixa càrrega específica (de 4 a 6 kg/m²).

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

En el sistema d'unió de les estructures, cal tenir en compte el problema dels parells galvànics que es presenta quan dos metalls de diferent potencial elèctric es posen en contacte, cosa que se soluciona usant aïllants i volanderes de materials no metàl·lics que evitin el contacte físic entre el marc del panell i l'estructura de suport.



Figura 3.9. Mòduls prefabricats per a l'ancoratge de panells amb contrapès.

Figura 3.10. Panells fotovoltaics sobre coberta metàl·lica.

3.3.2. Càrrega estructural

Els mòduls fotovoltaics instal·lats a les cobertes dels edificis hi provoquen uns esforços degut al pes que tenen i a la força transmesa per l'efecte del vent. El projectista de la instal·lació haurà de definir i calcular els esforços que la instal·lació fotovoltaica realitza a la coberta i, mitjançant l'informe tècnic corresponent, notificar-ho a l'arquitecte de l'edifici per tal que aquest procedeixi a verificar l'estructura o a fer un nou càlcul més acurat. Això últim, en el cas que l'edifici estigui en la fase de projecte.

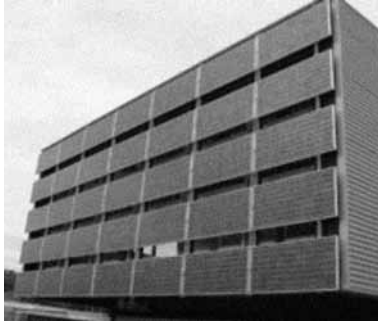
En els edificis ja construïts, caldrà posar-se en contacte amb l'arquitecte que va realitzar el projecte per a conèixer les condicions de sobrecàrrega de la coberta de l'edifici.

Extracte de la taula 3.1 del DB SE – AE5 (CTE)			Càrrega uniforme kn/m ²	Càrrega concentrada (kn/m ²)
F	Cobertes transitables accessibles d'ús privat		1	2
G	Cobertes accessibles solament per a conservació	G1	Cobertes amb inclinació inferior a 20°	2
			Cobertes lleugeres sobre corretges (sense sostre)	0,4
		G2	Cobertes amb inclinació superior a 40°	0

Taula 3.3. Referència de càrregues mínimes admissibles per a diversos tipus de cobertes.

En cas que els panells se situïn en façanes o en estructures annexes, s'haurà de complir la normativa urbanística del municipi i alhora s'haurà de determinar el valor de resistència dels elements estructurals per tal d'assegurar-ne la subjecció.

Figura 3.11. Panells fotovoltaics muntats en façana.



3.3.3. Estructura de suport

L'estructura de suport serà l'element mecànic encarregat de suportar els panells; aquest element ha de complir com a mínim els requisits següents:

- Llarga vida útil sense manteniment i muntada a la intempèrie.
- Resistència mecànica als esforços provocats pel vent.
- Rapidesa i senzillesa de muntatge.
- Cost adequat.

Encara que la major part dels fabricants disposen dels suports adequats per als seus panells i adaptables a diverses cobertes, a l'hora d'escollir una estructura de suport s'ha de tenir en compte:

Taula 3.4. Paràmetres a tenir en compte a l'hora d'escollir una estructura de suport.

Característica	Descripció
Resistència mecànica	L'estructura de suport ha de ser capaç de suportar esforços mecànics de, com a mínim, 2.000 N.
Robustesa	Les estructures de suport s'han de fabricar amb materials resistents a la intempèrie i que no necessitin manteniment.
Caragolam i accessoris robusts	Els elements de caragolam i accessoris han de ser resistents a esforços mecànics superiors a 2.500 N, inoxidables i han d'estar complementats amb volanderes sintètiques que evitin possibles deterioraments per defectes galvànics entre metalls.
Rapidesa de muntatge	El muntatge d'una estructura ha de ser fàcil i àgil.
Adaptable	Les estructures han de permetre diverses possibilitats de subjecció.
Cost reduït	L'estructura de suport ha de representar un cost adequat per panell.

3.3.4. 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 electro-mecànics.

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.

Ara bé, en la implantació d'aquestes estructures, també caldrà avaluar altres factors com l'augment del cost global de la instal·lació i l'augment d'ocupació d'espai. En el cas de muntar diverses unitats, la projecció d'ombres d'aquests equips augmentarà entre un 30% i un 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 a les instal·lacions en què el balanç econòmic cost-instal·lació-producció energètica sigui veritablement favorable als sistemes amb seguiment o en els casos en què el seguiment sigui un requisit del tipus de panell a utilitzar.

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

- Els seguidors d'un eix.
- Els seguidors de dos eixos.

La diferència principal d'aquests sistemes és que el seguidor d'un eix només permet seguir la trajectòria del Sol en un angle, habitualment la posició azimutal (eix est-oest).

En aquest cas, els costos de la instal·lació augmentaran respecte a una instal·lació fixa aproximadament fins a un 10% i l'augment de la producció energètica mitjana anual es fixarà entorn del 18%.

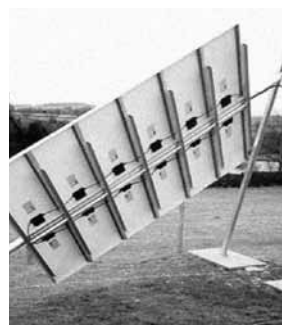
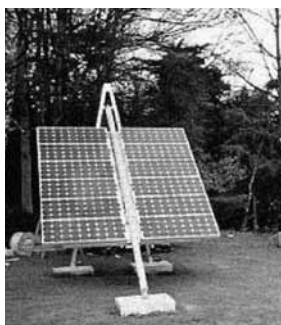


Figura 3.12. Seguidor solar de dos eixos.

Figures 3.13 i 3.14. Seguidor solar d'un sol eix.

Taula 3.5. Comparativa estimada de la producció energètica entre una estructura fixa i una amb seguiment a 2 eixos.

Simulació de la producció d'electricitat estimada per a una instal·lació FV				
Potència nominal = 1,0 kW				
Perdues del sistema = 14,0%				
Tipus d'estructura	Fixa (Inclin.=35°, Orient.= sud)		Seguidor solar de 2 eixos	
Mes	Producció mensual (kWh)	Producció diària (kWh)	Producció mensual (kWh)	Producció diària (kWh)
Gener	80	2,6	102	3,3
Febrer	83	3,0	104	3,7
Març	119	3,8	152	4,9
Abril	122	4,1	160	5,3
Maig	133	4,3	184	5,9
Juny	136	4,5	196	6,5
Juliol	143	4,6	207	6,7
Agost	137	4,4	189	6,1
Setembre	123	4,1	159	5,3
Octubre	105	3,4	133	4,3
Novembre	78	2,6	98	3,3
Desembre	74	2,4	96	3,1
Mitjana anual (kWh)	111	3,7	148	4,9
(kWh)	1.333		1.780	

Els seguidors de dos eixos són els que permeten fer un seguiment de la trajectòria solar tant en angle d'alçada solar com en el de posició azimutal (eix est-oest).

Aquests seguidors optimitzen la producció solar dels panells fotovoltaics amb un augment de la producció anual entorn del 30% més que les estructures fixes. Això és així perquè aquest sistema de seguiment permet mantenir la perpendicularitat dels panells amb el Sol al llarg de totes les hores de producció solar i durant tot l'any.

En contrapartida, l'augment dels costos de la instal·lació i del manteniment seran aproximadament d'un 18% a les instal·lacions grans.

En cas d'utilitzar estructures de suport que siguin mòbils, cal assegurar-se que tots els seus components compleixen els requisits especificats anteriorment per a les estructures de suport fixes. A més, necessitaran un manteniment acurat que garanteixi el correcte funcionament del sistema de seguiment.

Criteris i normes per al disseny i el muntatge bàsic d'estructures de suport

1. Les estructures de suport han de ser capaces de resistir, com a mínim, 25 anys d'exposició a la intempèrie sense corrosió o fatiga apreciables.
2. L'estructura de suport s'haurà de calcular per a suportar càrregues extremes per factors climatològics adversos com el vent, la neu, etc., d'acord amb el CTE apartat SE-AE *Seguridad Estructural – Acciones en la Edificación*.
3. El disseny i la construcció de l'estructura i el sistema de fixació dels panells permetrà les dilatacions tèrmiques necessàries, sense transmetre càrregues que afectin la integritat dels captadors o la coberta, seguint les indicacions del fabricant.
4. L'estructura i els marcs metàl·lics dels captadors es connectaran a una presa de terra i s'ajustaran al Reglament Electrotècnic de Baixa Tensió (MI.BT 039).

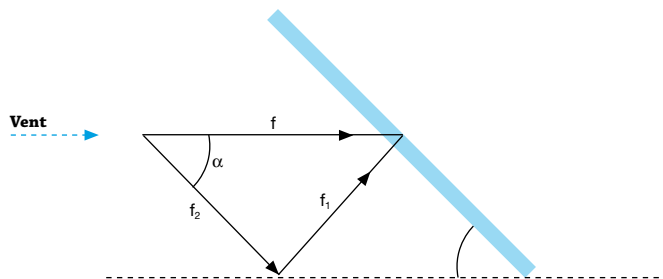
Figura 3.15.



3.3.5. Càrregues de vent

Els ancoratges dels panells fotovoltaics han de ser capaços de suportar les forces que hi actuen a sobre com a conseqüència de la pressió del vent a què es trobin sotmesos. Com que a la nostra latitud els panells estaran orientats cap al sud, l'únic vent que pot representar un risc és el que vingui del nord, ja que produirà forces de tracció sobre els ancoratges que sempre són més destructives que les forces de compressió.

Figura 3.16.
Representació gràfica
dels vectors de força de
tracció del vent.



Per tal d'avaluar amb precisió la força que pot actuar a sobre de cadascun dels mòduls, emprarem l'expressió matemàtica següent:

$$\mathbf{f} = \mathbf{pS} \sin^2 \alpha$$

En què:

S, és la superfície de panells.

α , és l'angle d'inclinació dels panells respecte de l'horitzontal.

p, és la pressió frontal del vent, és a dir, la pressió que faria el vent sobre els mòduls si estiguessin en posició perpendicular al vent. Aquest valor és funció de la velocitat del vent i el podem consultar a la taula 3.6.

Taula 3.6. Força del vent en funció de la seva velocitat.

Velocitat del vent (m/s)	Velocitat del vent (km/h)	Pressió del vent (N/m ²)
28	100,8	479
34	122,4	707
38	136,8	883
40	144	978
42	151,2	1078
46	165,6	1294
48	172,8	1409
50	180	1528
52	187,2	1653
54	194,4	1783
56	201,6	1917
58	208,8	2057

Exemple

Calcular la força que fa un vent de 100 km/h sobre 1 m² de panells amb una inclinació de 60° sobre l'horitzontal.

Apliquem l'expressió per al càlcul de la força:

$$f = pS \sin^2 \alpha$$

$$f = 479 \text{ N/m}^2 \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot \sin^2 60^\circ = 1.150 \text{ Newtons}$$

Per tal de facilitar la tasca de determinar el contrapès necessari per a uns panells col·locats en diferents angles d'inclinació, podem utilitzar la taula 3.7 de referència, que dona la força exercida per un vent de 190 km/h (màxim estipulat per a Catalunya) sobre 1 m² en funció de la seva inclinació.

Per a utilitzar la taula 3.7, és a dir, per a saber el contrapès necessari per a una estructura en funció de la velocitat del vent, haurem de multiplicar la superfície del camp de panells pel valor indicat a la taula anterior, en funció de la inclinació de captadors seleccionada.

Taula 3.7. Càrregues de contrapès, segons la inclinació dels panells, per a una velocitat del vent de 190 km/h, equivalent a una força de 1.653 N/m².

Inclinació	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°
Força del vent (N/m ²)	193	294	413	542	681	826	969	1108
Contrapès necessari (kg/m ²)	20	30	42	55	69	84	98	113



4. El panell solar fotovoltaic

L'energia solar fotovoltaica és la forma d'obtenir energia solar a través de dispositius semiconductors que, en rebre radiació solar, s'exciten, provoquen salts electrònics i una petita diferència de potencial tipus díode en els seus extrems.

L'acoblament en sèrie de diversos d'aquests díodes òptics permet l'obtenció de voltatges més grans en configuracions molt senzilles, i aptes per a petits dispositius electrònics. A major escala, el corrent elèctric continu que proporcionen les plaques fotovoltaïques es pot transformar en corrent altern i injectar en xarxa. En entorns aïllats, on es necessita poc corrent elèctric i l'accés a la xarxa està penalitzat econòmicament per la distància, com en refugis de muntanya, estacions meteorològiques o de comunicacions, s'empren les plaques fotovoltaïques com a alternativa econòmicament viable.

4.1. Característiques bàsiques de les cèl·lules fotovoltaïques

El físic francès AE Becquerel, l'any 1839, va descriure l'efecte fotovoltaic, tot i que no va ser fins a l'any 1954 quan Chapin, Fuller i Pearson, dels laboratoris Bell Telephone, van desenvolupar la primera cèl·lula solar eficient.

Durant els anys vuitanta i principi dels noranta, aquestes cèl·lules es van fabricar d'una manera força artesanal i van donar pas a la fabricació dels mòduls fotovoltaïcs que han estat la base de l'electrificació de llocs aïllats. La plataforma d'adquisició de l'experiència va permetre en la segona part dels noranta l'enlairament tecnològic i la fabricació en massa amb l'abaratiment de costos i eficiències que poden superar el 20% de rendiment en els tests de laboratori.



Figura 4.1. Publicitat dels anys seixanta d'un panell.

4.1.1. Efecte fotovoltaic

Els materials semiconductors (com el silici) tenen la particularitat de presentar un comportament diferent davant l'electricitat (conducció de càrregues) depenent de si una font energètica externa, com la radiació solar incident, 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), aquest rep l'energia amb què viatjava el fotó.

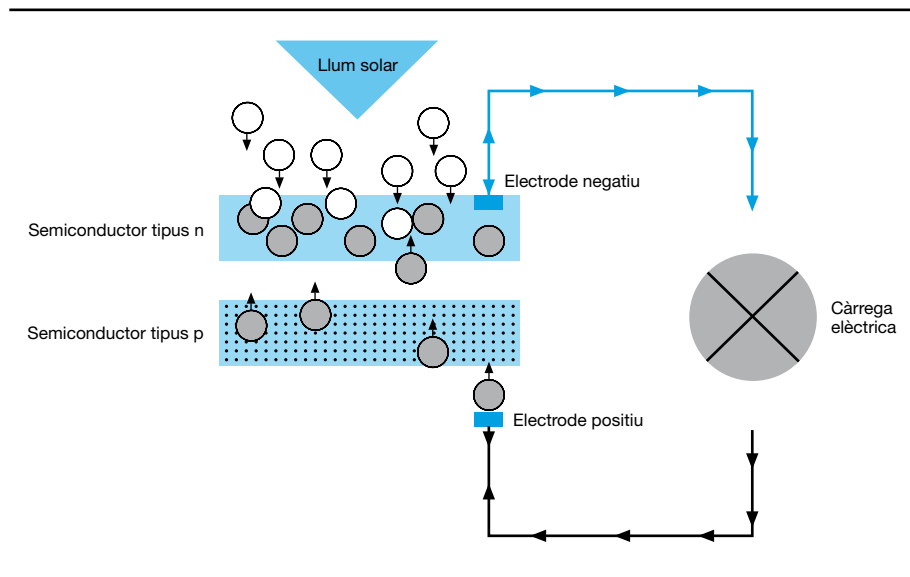
Si l'energia que adquireix l'electró supera la força d'atracció del nucli (energia de valència), aquest surt de la seva òrbita i queda lliure de l'àtom i, per tant, pot viatjar a través del material. En aquest moment, diríem que el silici s'ha fet conductor (banda de conducció) i, per a fer això, fa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

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

Aquest corrent de càrregues pot assolir els contactes i sortir del material amb la finalitat de realitzar un treball útil. Perquè això passi de manera 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 4.2.
Representació gràfica
de l'efecte fotovoltaic.



Generació de portadors

Els fotons corresponents a longituds d'ona petites (radiació ultraviolada) són més energètics (de 2 a 3 electronvolt) que els corresponents a longituds d'ona més grans (radiació infraroja).

Cada material semiconductor té una energia mínima que permet alliberar 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 l'1,2 electronvolts.

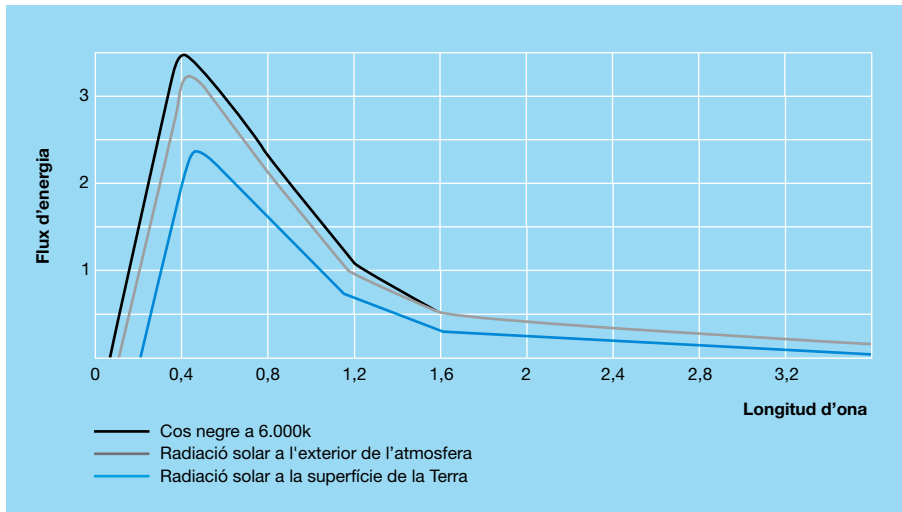


Figura 4.3. Franja de màxim aprofitament de la radiació solar a les cèl·lules de silici.

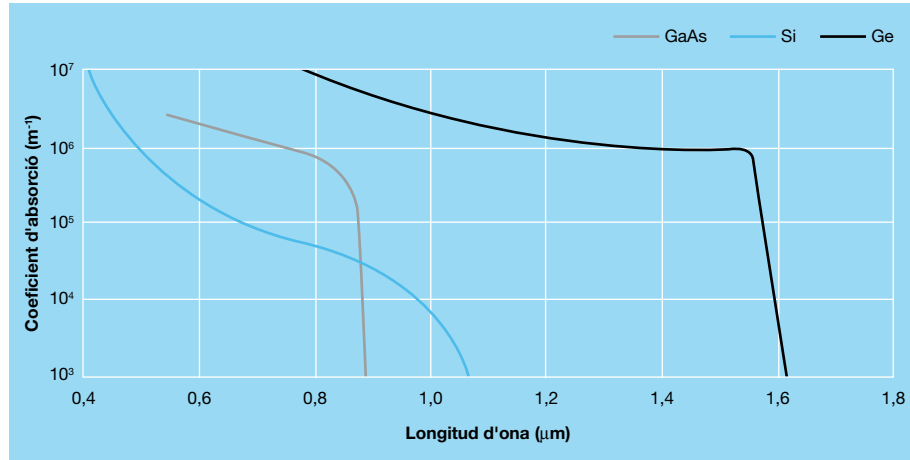
En el gràfic següent (figura 4.4), s'hi poden observar les respostes espectrals de diferents materials semiconductors emprats en la fabricació de cèl·lules solars. S'hi pot observar com el germani (Ge) reacciona davant de radiacions de menor freqüència i major longitud d'ona (infraroig) i l'arsenur de gal·li (GaAs) requereix radiació ultraviolada i visible, mentre que el silici té un comportament intermedi.

Encara que no tots els fotons aconseguen l'objectiu de separar electrons, això es deu al fet que travessar el material implica sempre una certa pèrdua energètica i, per tant, que en el moment de la col·lisió alguns fotons ja han quedat fora del llinar 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 topiar amb cap electró i d'altres que il·luminen la superfície del material i 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 al material i topi amb un electró de valència.

Figura 4.4.
Gràfic de la longitud
d'ona aprofitable per a
diferents materials.



4.1.2. La cèl·lula fotovoltaica

La cèl·lula solar més habitual és una làmina de silici cristal·lí d'un gruix aproximat de 0,3 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.

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 darrera 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. 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 a 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.

En 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 4.5.
Cèl·lula fotovoltaica
monocristal·lina.

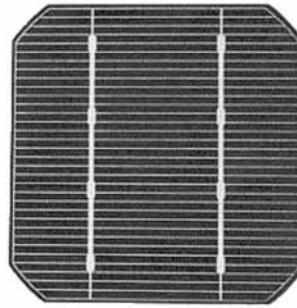
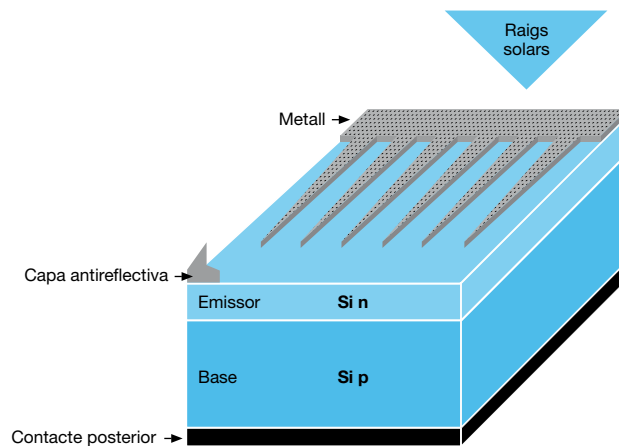


Figura 4.6. Parts
bàsiques d'una cèl·lula
fotovoltaica.



4.1.3. Principi de funcionament de la cèl·lula

Quan una cèl·lula solar fotovoltaica es connecta a una càrrega o consum i, alhora, és il·luminada pel Sol, genera una diferència de potencial entre 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. A continuació, descriurem amb una mica més de detall els diferents processos que ho fan possible:

- Els fotons que assoleixen l'interior de la cèl·lula i que posseeixen una energia cinètica igual o superior a l'energia de valència impacten en el material i generen parells de portadors (electró-forat).
- El camp elèctric, o diferència de potencial, produït per la unió p-n separa els portadors abans que es puguin donar recombinacions.

Podem dir que el corrent generat per una cèl·lula solar fotovoltaica il·luminada i connectada a una càrrega és la resta entre la seva capacitat de producció bruta i les pèrdues per recombinació entre electrons i fotons.

4.1.4. 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”.

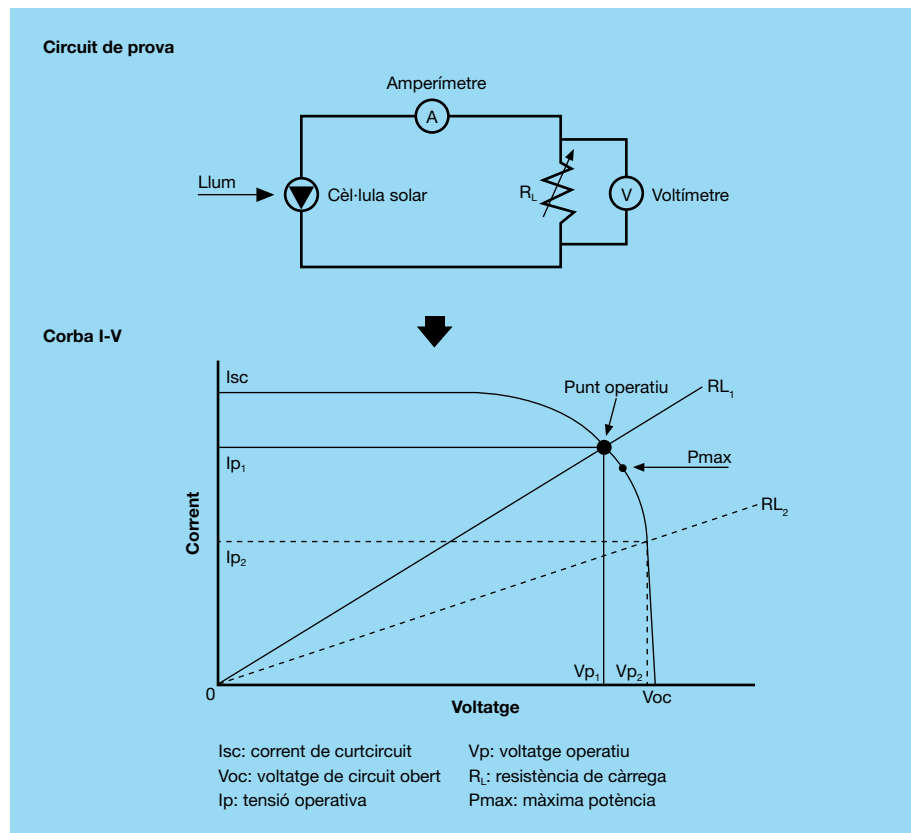
Aquest principi és molt important a l'hora d'entendre com es comporta la cèl·lula davant les variacions dels principals paràmetres que l'afecten:

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

L'expressió més habitual i clara de mostrar el comportament de la cèl·lula solar és expressant el corrent que pot generar a una radiació solar determinada, generalment 1.000 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 ens permet descriure alguns punts característics per tal de catalogar, definir i comparar cèl·lules de diferents materials i/o fabricants.

Figura 4.7.
Gràfic representatiu
dels paràmetres
elèctrics d'una cèl·lula
fotovoltaica.



4.1.5. Corrent de curtcircuit (I_{cc})

El curtcircuit, com és sabut, apareix en el moment en què 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 0 V; 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 I_{cc} o I_{sc} , de l'anglès *short circuit*.

4.1.6. Voltatge de circuit obert (V_{co})

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

Per tant $I = 0$ A

Això implica que el valor de la intensitat d'obscuritat de la cèl·lula, referida a les recombinacions de portadors, s'igualava 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 a 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 V_{co} o V_{oc} de l'anglès *open circuit*.

4.1.7. 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 amperes, aleshores el resultat vindrà donat en Watts [W].

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 fotovoltaics.

Aquest punt també s'anomena potència pic quan fa referència a una radiació incident de 1.000 W/m^2 . 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 a la cèl·lula.

La potència lliurada màxima de la cèl·lula W_p 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.

4.1.8. Variacions amb la radiació incident

Per a un ampli rang de radiació solar, el corrent elèctric generat a les cèl·lules solars és, a la pràctica, directament proporcional a la intensitat de la radiació incident. Per tant, l'expressarem així:

$$I_L = X I_{L1}$$

En què:

I_L , és el valor de corrent generat a un valor de radiació solar.

X , és el nombre de vegades de radiació estàndard que hi ha en les condicions actuals.

I_{L1} , és el corrent generat en les condicions estàndard (1 sol) o (1.000 W/m^2).

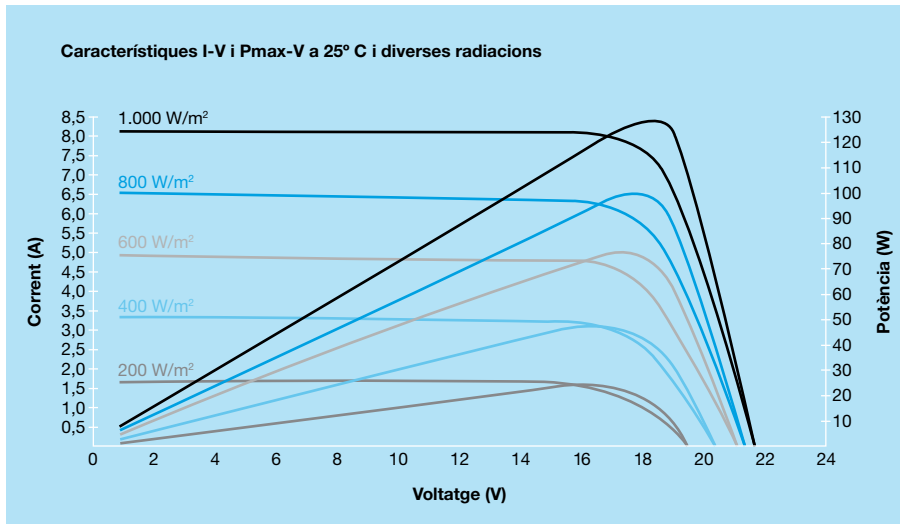


Figura 4.8. Gràfic representatiu dels paràmetres elèctrics d'un panell fotovoltaic en funció de la radiació incident.

En canvi, el voltatge de circuit obert varia d'acord amb el logaritme neperià d' X ; per tant, es redueix lleugerament amb la radiació i augmenta també lleugerament quan aquesta ho fa. Aquesta variació és tan petita que, a efectes pràctics, podem ignorar-la.

4.1.9. Variacions amb la temperatura de la cèl·lula

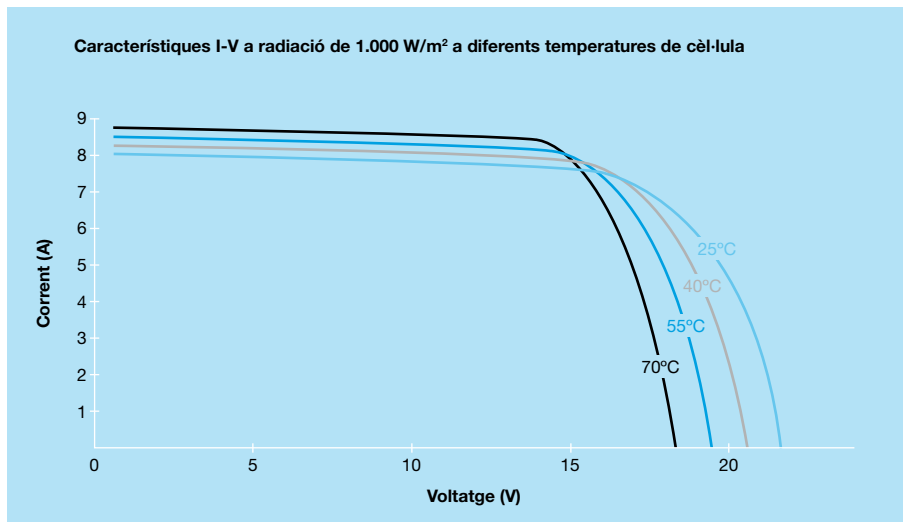
La temperatura és la mesura de l'activitat o d'agitació molecular dels cossos: com més temperatura, més mobilitat de partícules i, per tant, més facilitat d'alliberament dels electrons.

Aquest fenomen físic es tradueix en una menor energia de valència i, per tant, en una generació de portadors més gran quan augmenta la temperatura.

Aquesta excitació també afecta la zona d'unió o de transició del material p a la n. Aquest eixamplament de l'amplada de la unió comporta, de fet, una dilució i 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 i, per tant, és lluny del que intuïtivament la majoria de les persones pensen. A temperatures elevades, els mòduls fotovoltaics experimenten una forta caiguda del rendiment. 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 4.9.
Gràfic representatiu
dels paràmetres
elèctrics d'un panell
fotovoltaic en funció
de la temperatura.



4.2. Tipus de cèl·lules

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 en forma de disc, monocristal·lins o policristal·lins, 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.

Les cèl·lules monocristal·lins acostumen a presentar una forma quadrada, amb les cantonades arrodonides. 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·lins. Aquest tipus de cèl·lules tenen un rendiment inferior a les monocristal·lins, però actualment presenten una forta implantació perquè tenen un cost inferior a les monocristal·lins.

Amb menys implantació, podem trobar al mercat panells fotovoltaics anomenats de "capa fina". Aquests no es fabriquen amb cèl·lules individuals, sinó en forma de bandes contínues en què és dipositada sobre un substrat apropiat (vidre o resines sintètiques) una capa fina de silici amorf (a-Si), d'1 o 2 µm de gruix, fent un panell continu que no necessita interconnexions interiors.

Una característica d'aquestes cèl·lules és que els fotons que no xoquen amb cap electró les travessen gràcies al seu petit gruix, cosa que possibilita el disseny de panells amb diferents capes superposades i que s'anomenen tàndem (dues capes) o triple unió (tres capes).



Figura 4.10. Lingots de silici monocristal·lini.

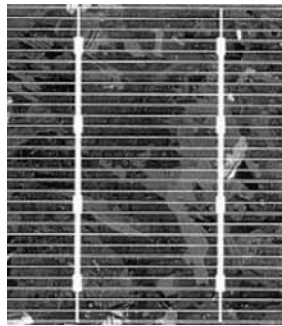


Figura 4.11. Cèl·lula fotovoltaica policristal·lina.



Figura 4.12. Elaboració de panells de capa fina.

Les cèl·lules amb silici amorf tenen un rendiment d'aproximadament la meitat del de les cèl·lules cristal·lines, i per això, en la fabricació de cèl·lules de capa fina s'estan començant a utilitzar altres tipus de semiconductors, essencialment el selenur de coure i indi (CIS) o tel·lur de cadmi (CdTe).

Com a tecnologies innovadores en la fabricació de cèl·lules fotovoltaïques, ressaltarem les anomenades "cèl·lules HIT" (*Heterojunction with Intrinsic Thin Layer*). Aquest terme fa referència a una tècnica basada en la superposició de capes de semiconductors de diferent "gap" com poden ser el silici amorf combinades amb cèl·lules de silici cristal·lines o tel·lur de cadmi, etc.

Això millora l'eficiència energètica de les cèl·lules i amplia l'espectre de radiació solar aprofitable, ja que cada un dels semiconductors és especialment sensible a alguna de les bandes de l'espectre electromagnètic.

4.2.1. Sistemes de concentració

Una altra de les línies d'innovació tecnològica desenvolupada en els últims anys és l'anomenada tècnica de concentració solar.

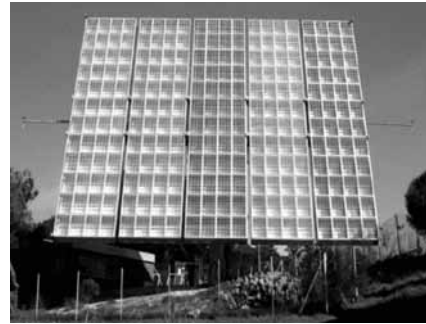
Aquesta tecnologia es basa en la concentració de la radiació solar en una petita superfície (la cèl·lula fotovoltaica) mitjançant un concentrador òptic. Per exemple, a través d'una lent Fresnel (efecte lupa) o un reflector, com un simple mirall amb què es pot assolir un augment significatiu de la radiació solar incident i, en conseqüència, un rendiment energètic més gran del sistema.

De tota manera, els sistemes de concentració tenen l'inconvenient que aprofiten quasi únicament la radiació solar directa. Per això, amb els panells de concentració és imprescindible la utilització de sistemes precisos de seguiment.

Actualment, el mercat ofereix alguns panells fotovoltaics amb sistemes de concentrador Fresnel puntual i d'altres concentradors disc-parabòlics integrats en el mateix panell, que poden arribar a augmentar la radiació incident en la cèl·lula fins a 500 vegades, i així s'augmenta de manera important la producció energètica per unitat de superfície de cèl·lula.

Figura 4.13.
Concentrador de miralls.

Figura 4.14. Panells
concentradors disc
parabòlics.



4.3. Característiques bàsiques dels panells fotovoltaics

La cèl·lula solar només és capaç de generar una tensió d'unes dècimes de volt (+/- 0,5 V) 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 aconseguir tensions de 624 V, acceptades en moltes aplicacions.

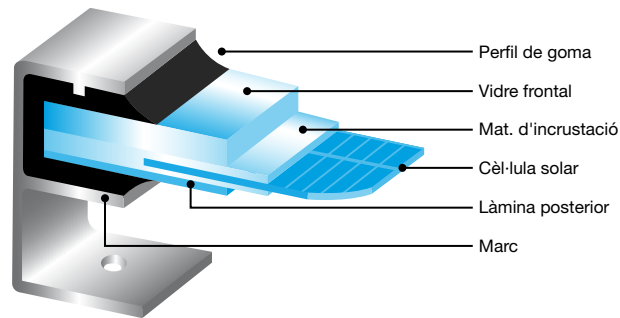
El conjunt format per unes quantes cèl·lules, convenientment encaixat i protegit, constitueix el mòdul fotovoltaic, element de la instal·lació solar fotovoltaica encarregat de transformar d'una manera directa l'energia de la radiació solar en electricitat, en forma de corrent continu.

4.3.1. Parts d'un mòdul fotovoltaic

- **Coberta exterior**, protectora contra els agents atmosfèrics. Per la banda frontal té un vidre trempat, ja que ofereix una bona protecció contra els impactes i a la vegada és un excel·lent transmissor de la radiació de l'espectre solar.
- **Capes encapsades**, són les encarregades d'envoltar les cèl·lules solars i els seus contactes. El material més usat és l'etilè-acetat de vinil, que també té excel·lents propietats per a la transmissió de la radiació solar i una nul·la degradació davant les radiacions ultraviolades. A més, confereixen elasticitat al conjunt.
- **Protecció posterior**, encarregada de la protecció contra agents atmosfèrics, especialment la humitat. Format per diferents capes de materials acrílics, TEDLAR.
- **Marc de suport**, és la part que dona robustesa mecànica al conjunt i facilitarà poder-lo col·locar a l'estructura de suport. Normalment d'alumini anoditzat i proveït dels forats necessaris per ancorar-lo a un bastidor, evitant haver-los de fer posteriorment.

Figura 4.15. Parts d'un panell fotovoltaic.

Tall transversal de l'efi-
caç estructura modular



Alguns mòduls fotovoltaics tenen una presa de terra, que s'haurà de fer servir en instal·lacions de potència elevada. A la part posterior del mòdul, s'hi col·loca una caixa de connexions amb els terminals identificant-los com a positiu (+) i negatiu (-).

En el procés de fabricació, una vegada muntades les connexions elèctriques, es passa un control de qualitat molt estricte, ja que no podem oblidar que estan exposats durant molts anys a la intempèrie en condicions des d'una calor extrema fins a freds glacials, vent, humitat, etc.

4.3.2. Característiques bàsiques d'un mòdul fotovoltaic

Les característiques dels mòduls fotovoltaics vénen determinades pel tipus de cèl·lula. En aquest sentit, podem establir les tres tipologies bàsiques descrites a la taula 4.1.

Les característiques elèctriques d'una cèl·lula, panell o generador fotovoltaic s'estableixen a partir d'unes condicions universals de treball anomenades "condicions estàndard de mesura (CEM)", concretades en els paràmetres següents:

- Irradiància solar: 1.000 W/m².
- Distribució espectral: AM 1,5 G.
- Temperatura de la cèl·lula: 25°C.

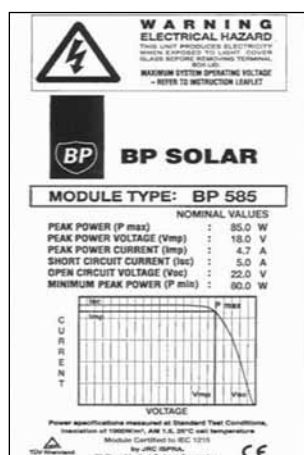
Mòdul	Material	Rendiment bàsic
Monocristal·lí	Silici monocristal·lí	14 – 17%
Policristal·lí	Silici policristal·lí	10 –14%
Amorf	Silici amorf	4 –8%

Taula 4.1.

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

- **Potència nominal del mòdul (Pmax):** la potència nominal del mòdul ve determinada pel punt de màxima potència amb el valor estàndard per a provar i homologar els mòduls.
- **Tensió de màxima potència Vmax:** és el valor de la tensió que pot donar el mòdul quan les condicions de càrrega li permeten treballar a la màxima potència.
- **Intensitat de màxima potència (Imax):** és el valor de la intensitat que pot donar el mòdul quan les condicions de càrrega li permeten treballar a la màxima potència.
- **Intensitat de curtcircuit (Isc):** 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 proporcionalment 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 (Voc):** 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 superior als 12-24V.

Figura 4.16.
Taula de característiques
d'un panell fotovoltaic.



4.3.3. Altres característiques elèctriques que cal ressaltar

- **Temperatura d'operació nominal de la cèl·lula (NOCT):** definida com la temperatura a la qual arriben les cèl·lules solars quan se sotmet el mòdul a una irradiància de 800 W/m^2 amb distribució espectral AM 1,5 G, la temperatura ambient és de 20°C i la velocitat del vent, d' 1 m/s .
- **Eficiència del mòdul:** és la relació entre la potència elèctrica que produeix el mòdul i la potència de radiació incident en el mòdul mateix.
- **Factor de forma del mòdul:** és un concepte teòric, útil per a mesurar la forma de la corba del panell: $FF = P_{\text{max}} / (I_{\text{sc}} \cdot V_{\text{oc}}) = I_{\text{max}} \cdot V_{\text{max}} / (I_{\text{sc}} \cdot V_{\text{oc}})$.

És important remarcar que les corbes característiques d'un mòdul solar FV depenen de la intensitat de radiació que reben i de la temperatura, de manera que aquestes corbes varien si canvien aquests paràmetres, com es pot veure en les corbes següents. En general, cal recordar que la **potència del mòdul disminueix aproximadament un 0,5% per cada grau que augmenta la temperatura de la cèl·lula per sobre dels 25°C** .

Per evitar haver de calcular intensitats mitjanes de radiació, cal suposar en la majoria dels casos que la temperatura mitjana de treball de les cèl·lules és 20°C superior a la de l'ambient, la qual cosa és una bona aproximació.

Els mòduls es poden classificar per la potència que poden produir. Van des de valors d'1 o 2 W fins a 900 W. Quan parlem de la potència d'un mòdul, ens referim a la seva potència nominal, és a dir, la que el fabricant assegura sota uns valors de radiació i de temperatura. Així la potència nominal pic és la proporcionada amb una radiació de 1.000 W/m^2 a una temperatura de 25°C . Normalment, la potència que generarà sempre serà inferior a aquesta.

4.3.4. Connexions de mòduls

Tenint en compte que la potència d'un mòdul FV té un valor fix, quan es calcula la potència d'una instal·lació, sovint cal fer servir un determinat nombre de mòduls solars fotovoltaics per a assolir la potència necessària. Les connexions d'aquests mòduls 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 càrrega de bateries.

Així, doncs, la connexió en sèrie de mòduls produeix una tensió igual a la suma de les tensions dels mòduls connectats, mantenint constant la intensitat. En les connexions en paral·lel, és la tensió la que no varia i la intensitat és la que se suma.

Els mòduls que s'interconnecten han de tenir les mateixes corbes I-V per a evitar descompensacions i pèrdues de rendiment del conjunt.

Si un grup de mòduls FV estan connectats en sèrie i un falla, ja sigui per avaria o perquè li toca l'ombra, es converteix en una càrrega resistiva que dificulta el pas del corrent generat pels altres mòduls de la sèrie. Tota la filera en sèrie quedaria fora de servei o en baixa producció, cosa que perjudicaria el rendiment de la instal·lació en consumir energia per efecte Joule.

Per a preveure aquests casos, a les caixes de connexions dels mòduls es posa un díode (bypass), connectat en paral·lel entre els seus borns. Aquest díode dona un pas alternatiu al corrent generat pels mòduls connectats en sèrie en cas que un estigui espatllat o li toqui l'ombra.

El càtode del díode es connecta al pol positiu del mòdul. Hi ha fabricants que el posen dins la caixa de connexions i altres deixen uns terminals per a facilitar-ne la connexió.

Figura 4.17. Quan els mòduls són il·luminats pel Sol, el flux d'electrons passa a través de les cèl·lules que integren el mòdul. Els electrons no poden passar a través del díode atès que la seva polaritat és inversa ja que té l'ànode (+) a un voltatge inferior al càtode (-).

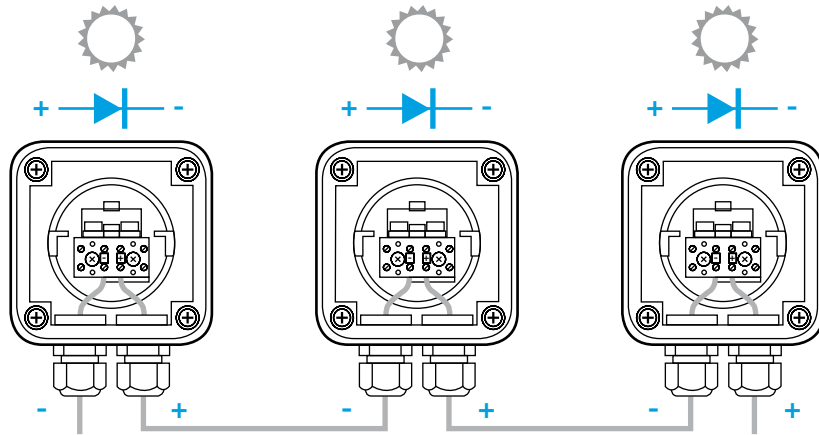
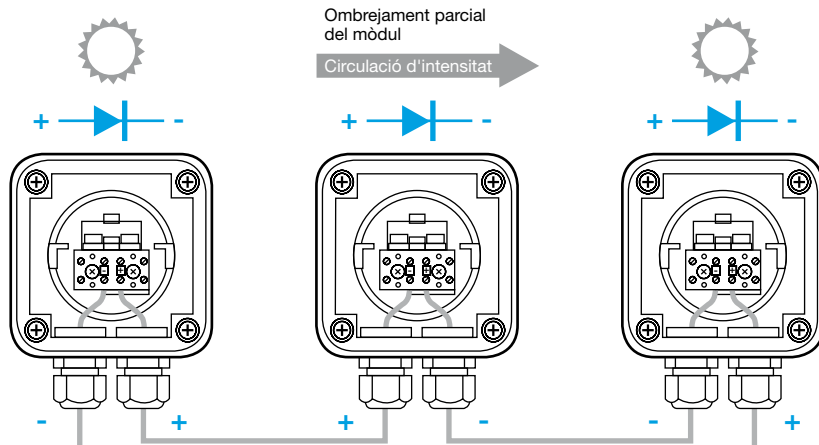


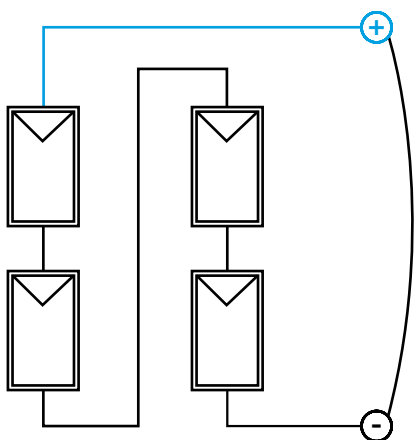
Figura 4.18. Quan un grup de cèl·lules és cobert per una ombra severa (taca, neu, etc.) el mòdul passa a ser consumidor i, per tant, resta voltatge en comptes de sumar-ne. Aleshores el díode queda correctament polaritzat i serveix de pont al pas dels electrons.



4.3.5. Connexions en sèrie de mòduls FV

Es connecta el terminal positiu d'un mòdul al terminal negatiu del mòdul següent i així successivament fins acabar la sèrie completa. La sortida del conjunt serà entre el terminal positiu del darrer mòdul i el negatiu del primer.

Com hem vist, 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.



Cal tenir en compte que treballar amb voltatges superiors als 75V en corrent continu equival a disposar d'un voltatge perillós per a les persones.

Figura 4.19.
Connexió de quatre mòduls en sèrie.

4.3.6. Connexions en paral·lel de mòduls FV

Es basa en 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.

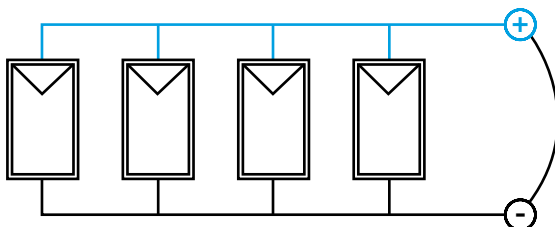
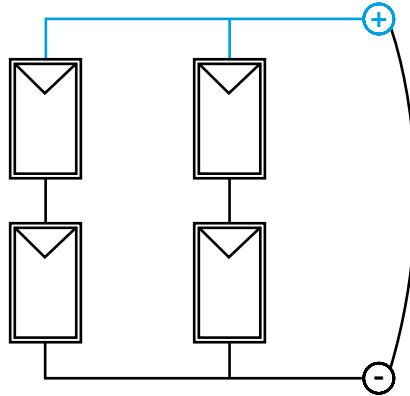


Figura 4.20.
Connexió de quatre mòduls en paral·lel.

4.3.7. Connexions mixtes de mòduls 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.

Figura 4.21. Connexió de quatre mòduls, en connexió mixta.





5. Elements de les instal·lacions fotovoltaïques

Ja hem vist anteriorment que el panell fotovoltaic és l'element captador de la radiació solar i l'encarregat de transformar l'energia solar en electricitat mitjançant l'efecte fotovoltaic.

Però 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 seu control i durabilitat.

En aquest aspecte cal diferenciar clarament les tipologies bàsiques següents:

- Les instal·lacions fotovoltaïques autònomes aïllades de la xarxa elèctrica, destinades al subministrament elèctric quan el cost de manteniment i d'instal·lació de les línies elèctriques no és rendible, és a dir, per a instal·lacions autònomes aïllades.
- Les instal·lacions fotovoltaïques connectades a xarxa: aquesta tipologia d'instal·lació fotovoltaïca fa referència a petites centrals generadores en baixa tensió connectades a la xarxa de distribució d'electricitat.

5.1. Components de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes

En aquest apartat, tractarem la resta de components d'una instal·lació solar fotovoltaïca autònoma que representem en l'esquema de la figura 5.1.

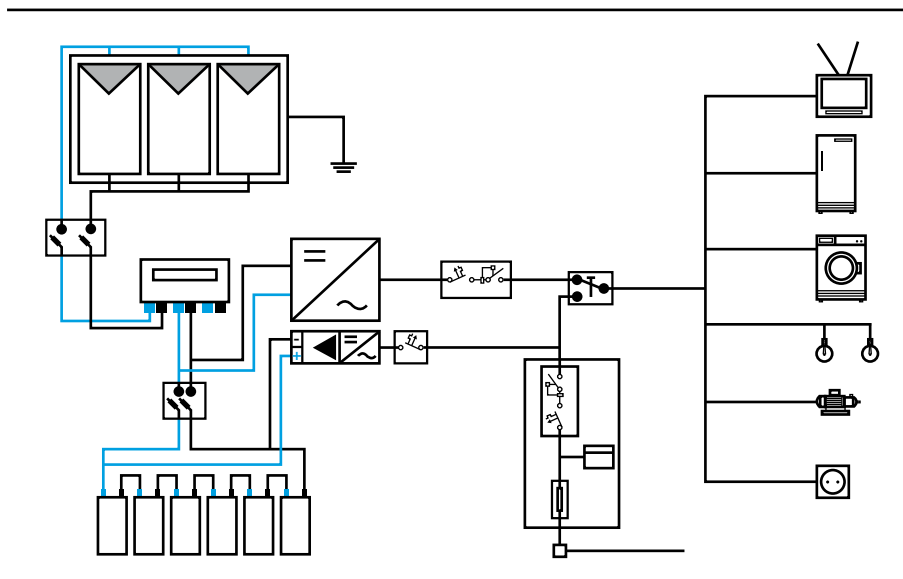


Figura 5.1. Esquema bàsic d'una instal·lació autònoma.

5.1.1. Acumuladors d'energia elèctrica

A les instal·lacions autònomes de subministrament d'electricitat, cal emmagatzemar-hi 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).

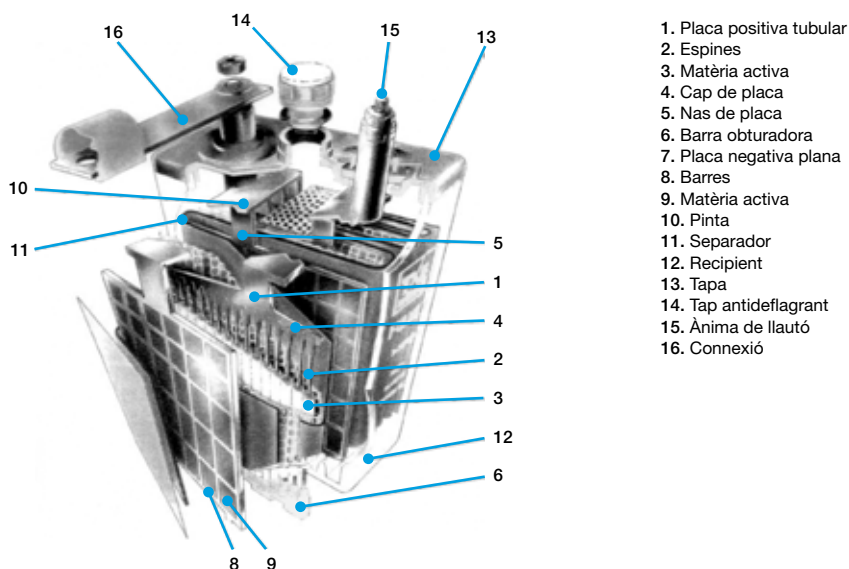
Els acumuladors:

- Tenen una funció molt important i fonamental en el bon funcionament i en la durada d'una instal·lació solar fotovoltaica.
- Han de tenir prou capacitat per a assegurar el subministrament d'electricitat durant períodes de núvols (autonomia de la instal·lació).
- Es tracta de sistemes electroquímics basats en reaccions químiques reversibles que tenen lloc en el seu interior.

Quant al seu ús, podem diferenciar diferents tipus d'acumuladors:

- **Estacionaris:** acostumen a estar en un lloc fix i proporcionen corrent elèctric de manera permanent o esporàdica per a diverses finalitats. En cap moment, però, se'ls demana que donin valors d'intensitats elevades en temps curts.
- **D'arrencada:** s'encarreguen de produir energia elèctrica amb valors d'intensitat de corrent elevats durant temps curts, per exemple, en els dels cotxes cada vegada que s'engeguen, o bé quan s'arrenca un motor. Les plaques dels elèctrodes d'aquests acumuladors tenen més gruix que els dels estacionaris i la seva vida útil és més curta a causa de les "dures" condicions de treball.
- **De tracció:** s'encarreguen de proporcionar corrent a petits vehicles elèctrics i, per tant, se'ls demana unes intensitats de corrent relativament altes durant períodes d'algunes hores.

Figura 5.2.
Parts significatives d'un
acumulador estacionari.



Per a les instal·lacions solars fotovoltaïques, cal utilitzar preferentment els acumuladors estacionaris.

Pel que fa a les característiques de l'electròlit, en tenim de tipus:

- **Àcid** (de plom-àcid , Pb-Sb, Pb-Cd).
- **Alcalí** (níquel-cadmi).

Els principals paràmetres d'un acumulador d'energia elèctrica són:

- **Capacitat:** màxima quantitat d'electricitat que pot emmagatzemar. A 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 30% fins a més del 90% (en acumuladors alcalins de bona qualitat) 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 Amperes-hora (Ah). Amb la notació C5, C25, C100 es representa el temps de descàrrega en hores, respectivament 5, 25 o 100 (C5 = descàrrega en 5 hores). Aquests valors ens donen el nombre d'hores durant les quals teòricament podríem disposar d'una intensitat de corrent determinada procedent de l'acumulador.
- **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 encara que no estigui connectat a un circuit extern.

Descàrregues	1 H	3 H	5 H	10 H	20 H	100 H
Intensitat (A) C10	0,525	0,250	0,176	0,102	0,056	0,013
Capacitat (Ah)	52,5%	75%	88%	102%	113%	135%
Tensió de tall (V)	1,60	1,65	1,70	1,80	1,80	1,85
Tensió mitjana (V)	1,728	1,850	1,88	1,936	1,94	1,970

Taula 5.1. Característiques elèctriques de la bateria en funció del règim de descàrrega.

Funcions de l'acumulador elèctric

Les funcions bàsiques dels acumuladors en instal·lacions solars són:

- **Subministrar energia en absència de radiació:** nits i dies amb núvols, en el cicle diari i en el cicle estacional.
- **Mantenir un nivell estable de voltatge a la instal·lació:** com hem vist, la tensió a la sortida dels mòduls varia en funció de la radiació incident, la qual pot no ser gaire bona per al funcionament d'alguns aparells.
- **Subministrar una potència instantània,** o durant un temps limitat, superior a la que el camp de panells podria generar fins i tot en el millor dels casos. És el cas de l'arrencada de motors com, per exemple, el motor del compressor d'una nevera.

Com hem dit, els més usats en instal·lacions solars són els de tipus estacionaris de plom-àcid.

Tipologia d'acumuladors

Entre els acumuladors de plom-àcid que hi ha al mercat, en diferenciem tres tipus:

- **Acumuladors compactes, tipus monobloc:** (semblants als de tipus d'arrencada). D'utilització habitual en instal·lacions petites (ús en caps de setmana...).
- **Acumuladors estacionaris:** construïts amb vasos independents, plaques tubulars i reixes amb baix contingut d'antimoni. Aquests són els ideals per a les instal·lacions solars fotovoltaïques, ja que han estat dissenyats per a poder-los descarregar lentament i recarregar-los quan hi hagi disponibilitat d'energia.
- **Acumuladors de tracció:** pensats per a moure vehicles i carretons elèctrics; són més econòmics que els estacionaris i poden donar un bon servei en instal·lacions fotovoltaïques, sempre que es tingui en compte que necessiten un manteniment més freqüent.

Figura 5.3.
Bateries monobloc.



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 l'acumulador i no a l'inrevés, de manera que el valor de la intensitat que dona el mòdul s'ajusta en funció de la tensió de l'acumulador connectat.

Tot i que normalment els acumuladors s'identifiquen pel seu valor de voltatge nominal, en realitat, el voltatge de cada cel·la o vas varia en funció de l'estat de càrrega. Aquest valor fluctua entre valors 1,85 V (descarregat) i 2,4 V (carregat), aproximadament, d'acord amb el tipus i el fabricant.

En un acumulador format per 6 vasos (12 V nominals), el marge de fluctuació va de 10,5 a 14,4 V. Cal tenir en compte que, normalment, en una instal·lació solar, el voltatge dels mòduls serà similar al de la bateria (tret dels casos en què el regulador tingui seguidor del punt de màxima potència dels mòduls). Aquest fet comporta que els mòduls treballin a voltatges inferiors al de màxima potència i, per tant, a una potència inferior a la màxima possible.

Així, doncs, a l'hora d'escollir l'acumulador adequat per a una instal·lació solar fotovoltaica, l'elecció sempre serà un compromís entre economia i idoneïtat, respectant uns mínims de qualitat quant a fiabilitat i durada.

En tot cas, per a la correcta selecció de l'acumulador adequat, serà necessari disposar de les característiques amb les corbes de funcionament.

Per a la selecció d'una bateria, com a mínim és necessari conèixer:

- Tipus de bateria amb tensió nominal, dimensions, pes...
- Capacitats de descàrrega C20, C50, C100 amb els valors corresponents de tensió de tall.
- Marge de temperatures de treball.
- Fondària màxima de descàrrega.
- Valor d'autodescàrrega.
- Cicle màxim diari permès.
- Temps màxim de treball a un 50% de càrrega i amb un cicle del 10%.
- Rendiment de càrrega.
- Variació de la capacitat en funció de la temperatura.
- Voltatges finals d'acord amb el règim de descàrrega.
- Voltatge màxim de càrrega en funció de la temperatura i del règim de càrrega.
- Temperatura de congelació.
- Densitat segons l'estat de càrrega.

Comportament d'una bateria d'acumuladors en una instal·lació solar FV

El voltatge en els terminals de la bateria depèn dels factors següents:

- **Nivell o estat de càrrega**

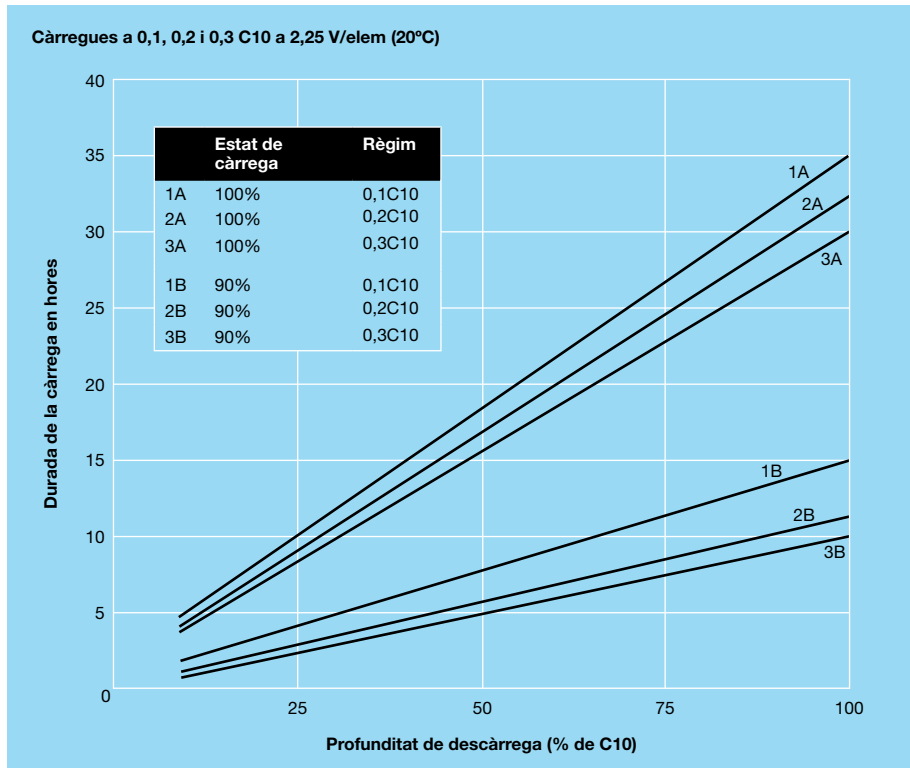
El voltatge en els terminals de la bateria disminueix quan es descarrega i augmenta quan es carrega fins a arribar a un màxim (p. ex., 14 V en bateries de 12 V). Quan es descarrega, abans de fer-ho del tot, s'arriba a un valor de tensió inferior límit per sota del qual la bateria es pot no recuperar si es continua descarregant. Per a una bateria típica de plom-àcid de 12 V, aquest valor és de 10 V. En els casos de bateries de plom-àcid, s'ha d'evitar l'efecte de sulfatació que té lloc quan s'arriba a un estat alt de profunditat de descàrrega i es queda així un temps. El

sulfat de plom comença un procés de descristal·lització irreversible, bloqueja la reacció de càrrega i fa que la bateria es comporti com si hagués perdut part de la seva capacitat, per la qual cosa se l'ha de substituir per una altra. D'altra banda, s'ha de procurar no sobrecarregar la bateria, ja que en aquestes condicions, si els panells segueixen enviant corrent a la bateria, es continuen produint reaccions químiques de l'electròlit i comença a produir oxigen i hidrogen gasosos, cosa que la perjudica i li escurça la vida útil. Alguns fabricants incorporen uns taps recuperadors que, mitjançant "catàlisi", recombinen l'oxigen i l'hidrogen tornant l'aigua a les cel·les. Però la millor manera de prevenir la gasificació és un regulador de càrrega, tal com veurem en el seu moment.

- **Velocitat de càrrega o descàrrega**

Si una bateria es carrega, el voltatge en els seus terminals és superior que si desconnectéssim el corrent de càrrega perquè la resistència interna de la bateria produeix una caiguda interna de tensió. Quan es descarrega passa a l'inrevés: la petita caiguda de tensió en la resistència interna fa que la diferència de potencial (ddp) en els terminals sigui una mica inferior a la mesurada.

Figura 5.4. Gràfic comparatiu de la capacitat de la bateria en funció del règim de descàrrega.



- **Temperatura:**

Com que les reaccions internes que tenen lloc en una bateria són de naturalesa química, la temperatura té una influència decisiva en aquestes reaccions. Així, doncs, el voltatge final recomanat per a assolir l'estat de càrrega plena haurà de ser més alt com més baixa sigui la temperatura, perquè les reaccions químiques tenen més dificultats per tenir lloc i, per tant, necessiten més energia perquè el procés s'executi. Aquest fet és important, ja que segons el lloc on sigui la instal·lació, s'haurà de corregir el valor de la tensió aplicat en funció de la temperatura a què estigui sotmesa la bateria. Això condiona la sala de les bateries, tal com veurem més endavant.

D'altra banda, cal tenir en compte que:

- En augmentar la temperatura, les reaccions s'acceleren i, per tant, la vida útil disminueix.
- En disminuir la temperatura, la vida útil augmenta, però es corre el risc de congelació, cosa que pot provocar danys irreversibles a la bateria. Per tant, per tal de prevenir aquest fet, s'haurà d'adequar la sala de bateries amb temperatures moderades.

En una bateria normal àcida (Pb-àcid sulfúric), la concentració d'àcid és del 40% i, en aquestes condicions, el punt de congelació és de -60°C . Quan la bateria es descarrega, com que disminueix la concentració d'electròlit, augmenta el punt de congelació, que arriba al límit del punt de congelació dels 0°C quan la concentració d'electròlit és zero (aigua). Aleshores la bateria es pot espatllar definitivament (instal·lacions d'alta muntanya). Aquest fenomen reafirma la necessitat de tenir la sala de bateries al més aïllada possible del fred.

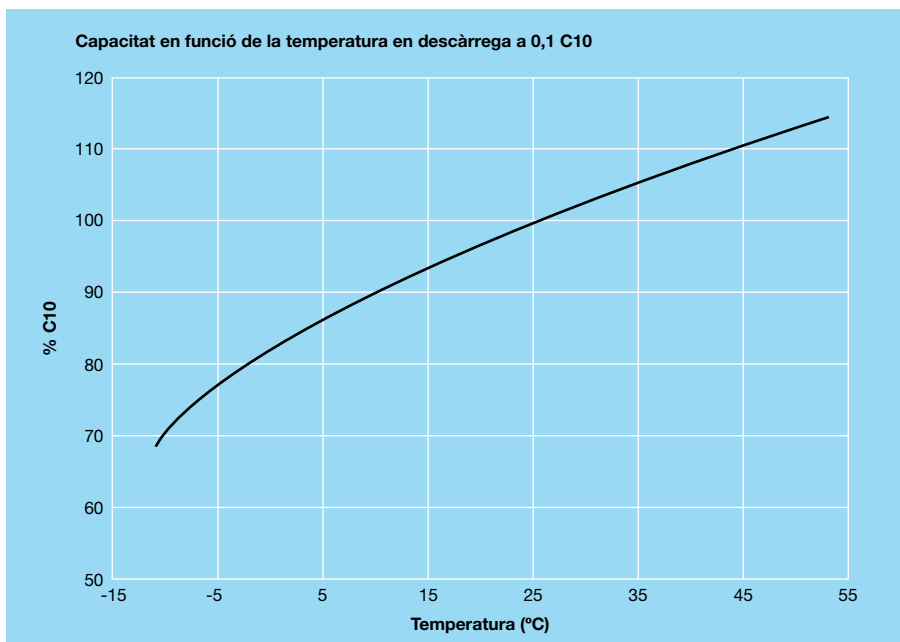


Figura 5.5.
Gràfic comparatiu de la capacitat útil de la bateria en funció de la temperatura ambient.

5.1.2. Reguladors de càrrega

Encara que en principi sembla que en una instal·lació solar FV només necessitem els mòduls solars i les bateries, hi ha un element clau en aquestes instal·lacions que és el que s'encarrega que, tant en el procés de càrrega com en el de descàrrega dels acumuladors, es faci de manera que aquests estiguin sempre dins les condicions correctes de funcionament.

Aquest element és el regulador de càrrega.

Tal com hem dit anteriorment, els panells solars es dissenyen perquè puguin donar una tensió més elevada que la tensió de final de càrrega de les bateries. Així s'assegura que els panells 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:

- D'una banda, es perd una petita part de l'energia màxima teòrica que pot donar el panell (10%), que s'obtidria si treballés a tensions una mica més altes que les que imposa la bateria.
- D'altra banda, quan la bateria arribi al seu estat de plena càrrega, no arribarà al seu potencial màxim que pot donar teòricament el panell, i aquest seguirà intentant injectar energia als terminals de la bateria, cosa que produirà una sobrecàrrega que perjudicarà la bateria i que la pot fer malbé.

Es pot solucionar aquest últim inconvenientment, de manera manual: desconectant la bateria quan es detecta plena càrrega, però òbviament no és el mètode més fiable ni pràctic.

El regulador de càrrega té la missió de regular el corrent que absorbeix la bateria per tal que mai no se sobrecarregui perillosament. Per aquest motiu, detecta i mesura constantment el voltatge de la bateria, mesura el seu estat de càrrega i, si aquest arriba a un valor de consigna prèviament establert que correspongui 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 a 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).

Els paràmetres que defineixen un regulador són:

- **Voltatge màxim admès o voltatge màxim de regulació:** és el valor de voltatge màxim que el regulador permet aplicar a la bateria.
- **Interval d'histeresi superior:** és la diferència entre el voltatge màxim de regulació i el voltatge al qual el regulador permet el pas de tot el corrent produït pels panells solars. Per a un valor de voltatge intermedi, el regulador deixa passar una fracció del corrent produït pels panells, que és més petit com més s'apropa el voltatge dels terminals de la bateria al valor màxim de regulació.

- **Voltatge de desconexió:** voltatge al qual es desconnecten automàticament les càrregues de consum a fi d'evitar una sobredescàrrega de la bateria.
- **Interval d'histèresi inferior:** és la diferència entre el voltatge de desconexió i el voltatge al qual es permet que els consums es connectin novament a la bateria.

Els paràmetres següents defineixen les prestacions més habituals dels reguladors de càrrega que es fan servir en les instal·lacions solars fotovoltaïques autònomes:

- **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 i que les plaques es rovellin.
- **Alarma per bateria baixa:** indicadors sonors/llums que indiquen que l'acumulador està força descarregat. A partir d'aquest moment, l'usuari pot moderar el consum, cosa que evitarà una descàrrega perjudicial i excessiva de l'acumulador.
- **Desconnexió per bateria baixa (tall per baixa):** aquesta funció fa que el regulador talli el subministrament de corrent cap als consums si el nivell de càrrega de l'acumulador és massa baix i, 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.
- **Visualització de funcions:** la majoria de reguladors tenen algun sistema visual que permet obtenir informació sobre l'estat de la instal·lació, simplement amb uns indicadors dient que els panells 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...



Figura 5.6.
Regulador de càrrega.

Hi ha diferents tipus de reguladors en funció del principi de funcionament que tinguin:

Reguladors tipus paral·lel (*shunt*)

Basen el seu funcionament en un transistor que deriva el corrent procedent dels mòduls cap a una càrrega resistiva de dissipació. Permet establir valors de voltatge de bateria per als quals aquesta desviació es fa de manera intermitent a fi d'aconseguir mantenir l'acumulador en el nivell de màxima càrrega (flotació).

Aquest sistema provoca escalfament del mateix regulador, cosa que provoca desgast i pèrdues i, per tant, els reguladors d'aquest tipus tenen limitat el corrent de treball a pocs amperes i, per tant, seran vàlids per a instal·lacions petites.

Reguladors tipus sèrie

Aquest tipus de reguladors basen el seu funcionament en la interrupció del corrent cap a la bateria, en funció del seu voltatge. Gràcies a les tecnologies actuals, 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 no gasificació de la bateria.

Aquest tipus de reguladors es connecten en sèrie entre els panells i la bateria i, com que no dissipen calor, poden ser més aviat petits i poden anar muntats en llocs tancats si fos necessari.

Altres models de reguladors d'aquest mateix tipus, usats en grans instal·lacions, desvien el corrent dels panells a altres circuits quan les bateries estan carregades per a fer servir aquesta energia per a altres usos.

Altres models van desconnectant de manera automàtica els panells o bé grups de panells a mesura que la tensió de la bateria creix, per deixar passar tan sols el corrent necessari i mai en excés.

Molts reguladors porten incorporades altres funcions per a la visualització i control del funcionament de la instal·lació com poden ser: voltímetres i amperímetres; alarmes per baixa tensió de bateria; sensor de temperatura que regula automàticament el valor de la tensió màxima de càrrega; desconnectadors automàtics del circuit de consum per baixa tensió; comptadors d'amperes per hora; visualitzadors digitals; mòdul d'adquisició de dades; mòdul de regulació amb seguidor de punt de màxima potència, etc.

Un element especialment important que incorporen molts reguladors és un díode de bloqueig, que permet el pas de corrent en un sol sentit des dels panells 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 dels panells, així s'evita que la bateria es descarregui pels panells solars. És important no confondre aquest díode de bloqueig amb el díode de bypass (variant) dels panells, ja que les funcions que realitzen són ben diferents.

Si per accident o per defecte d'aïllament hi ha una errada en el sistema de protecció de presa de terra, el corrent pot circular en sentit contrari al normal i passar a través d'un panell o grup de panells abans de fugir per la presa de terra. En aquests casos, la presència del díode de bloqueig és molt important per evitar danys en els panells.

Un molt bon aïllament i una bona presa de terra segura podrien evitar la necessitat d'instal·lar el díode de bloqueig. Com que el díode de bloqueig produeix una caiguda de tensió addicional de 0,5 a 1 V, resulta una raó més per a dissenyar la tensió dels panells superior a la necessària per a carregar les bateries.

Reguladors amb seguiment de màxima potència

Aquesta és la versió més sofisticada dels reguladors que hi ha al mercat, ja que incorpora un convertidor DC/AC 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.

Si prenem com a exemple un mòdul fotovoltaic en el qual les dades que aporta el fabricant són: 53 Wp a 17,4 V i 3,05 A.

Quan connectem el mòdul directament a un acumulador amb un voltatge entre borns que, en aquest moment, és de 12 V, el mòdul està lliurant realment una potència de:

$$P_{\text{real}} = 12 \text{ V} \cdot 3,05 \text{ A} = 36,6 \text{ W}$$

És a dir, que dels 53 W disponibles, quan es carrega directament una bateria amb 12 V en borns, només n'aprofitem 36,6 W, un fet que implica un 30% de pèrdua de potència.

La pregunta és: on són la resta de Watts que falten?

La resposta és: enlloc, ja que recordem que el gràfic de producció I-V del mòdul, ens indica que la generació del mòdul és de corrent i no de potència.

La solució: aconseguir la màxima potència del mòdul mitjançant reguladors de càrrega amb un cercador de màxima potència. En aquest cercador, es desenvolupa la compensació posterior de tensió per intensitat.

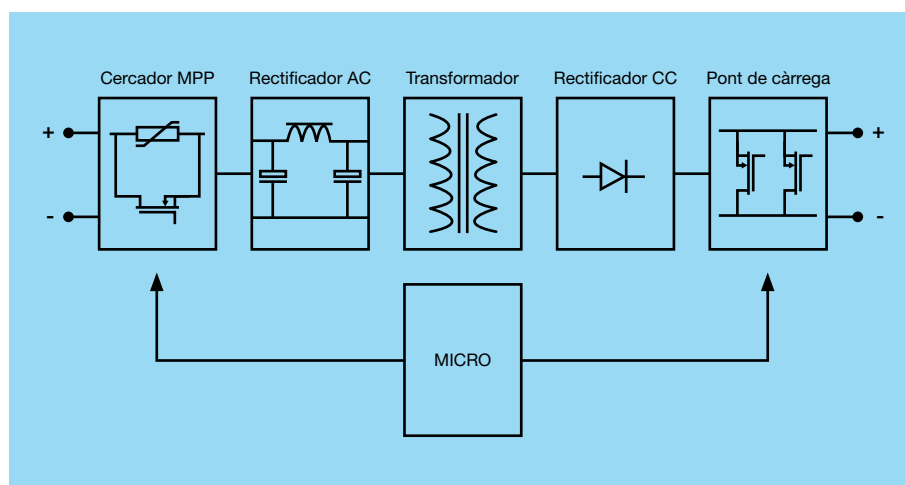


Figura 5.7. Esquema de blocs d'un regulador amb cercador MPP.

5.1.3. Convertidors de CC/AC

En els inicis de l'energia solar fotovoltaica, les instal·lacions d'electrificació feien servir l'electricitat per al consum al mateix voltatge i amb la mateixa forma que la rebien dels panells solars i dels acumuladors, és a dir, a 12, 24, 48 V en corrent continu. Això va marcar **una gran diferència amb els usuaris que disposaven de xarxa de distribució elèctrica o de grups electrògens a 220 V de corrent altern.**

El mercat dels electrodomèstics s'ha adaptat a la majoria dels usuaris i podem trobar qualsevol aparell a 220 V AC. Per tant, aconseguir electrodomèstics fiables, de qualitat i a un preu raonable que funcionin a baix voltatge i en corrent continu és més difícil.

Per tant, fan falta equips que transformin els corrents continus amb valors baixos de tensió en corrents alterns de valors de tensió 220 V. Aquests són els inversors (també coneguts com a onduldadors o convertidors). Avui, n'hi ha de disponibles gràcies als avenços de la tecnologia amb els transistors GTO.

Els avenços de disposar d'energia elèctrica en forma de corrent altern són diversos:

- És el tipus de corrent que es fa servir arreu del món i, per tant, dóna un punt de normalitat.
- Facilita la compra d'electrodomèstics per a poder accedir als que són més eficients.
- Permet mantenir valors estables de voltatge i forma d'ona, tot i la variabilitat de l'estat de càrrega de les bateries.
- El fet de treballar amb voltatges superiors (220 V és 18 vegades 12 V) permet treballar amb corrents elèctrics baixos i, per tant, es poden fer servir conductors més primers, proteccions elèctriques habituals i es minimitzen les pèrdues.

No tot són avantatges, també tenen algun inconvenient:

- La instal·lació consta d'un element més, el convertidor. Per tant, disminueix la fiabilitat del sistema.
- El convertidor té unes pèrdues elèctriques que s'han de compensar generant més electricitat als mòduls (5%).
- En instal·lacions petites, el convertidor pot representar una part important del pressupost; per exemple, per a una instal·lació d'uns 100 Wp de potència de mòduls, un convertidor de 250 W pot representar un 20% del cost total.

Figura 5.8. Convertidor per a instal·lacions autònomes.



Els convertidors CC/CA (inversors, onduladors) permeten convertir els 12, 24, 48 V de corrent continu que produeixen els panells solars i emmagatzemats a la bateria, en corrent altern de 125 o 220 V (actualment, 230 V), com el que s'usa normalment en llocs on hi ha la xarxa elèctrica convencional.

Principals característiques que defineixen un convertidor

- **Voltatge d'entrada (V_{CC}):** aquest valor ha de ser igual al de l'acumulador (12, 24, 48 V).
- **Voltatge de sortida (V_{CA}):** aquest valor ha de ser normalitzat (230 V_{AC}).
- **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 sinusoidal. Són valors que les normes admeten per al voltatge de les xarxes elèctriques convencionals, independentment de la potència demandada pel 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.
- **Tipus d'ona:** actualment, els inversors han de presentar un format tipus de corrent altern normalitzat amb una ona sinusoidal pura.
- **Capacitat de sobrecàrrega (potències punta) i de protecció tèrmica:** molt útil en instal·lacions amb motors, ja que en el moment d'arrencada 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'engegar, pot consumir un corrent fins a cinc vegades la intensitat nominal i que, per regla general, aproximadament és de tres vegades.
- **L'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 sinusoidal 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.
- **Arrencada 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 llinyar prèviament fixat.
- **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.
- **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.
- **Possibilitat de ser combinat en paral·lel:** permetrà un possible creixement de la instal·lació i de la potència de consum.
- **Bon comportament amb la variació de la temperatura:** marge d'operació entre -5°C i 40°C.

- **Prou documentació tècnica.** S'exigeix, com a mínim:
 - Tensió de treball d'entrada i de sortida.
 - Potència nominal.
 - Freqüència nominal i factor de distorsió.
 - Forma de l'ona de sortida.
 - Marge de temperatures de treball admès.
 - Rendiment en funció de la potència demandada.
 - Sobrecàrrega que resisteix.
 - Resistència a curtcircuit.
 - Factor de potència.

5.2. Components de les instal·lacions fotovoltaïques de connexió a xarxa

Una instal·lació solar connectada a la xarxa té només tres elements bàsics: un grup de plaques solars fotovoltaïques ubicades sobre la teulada d'un edifici o integrades en qualsevol element estructural del mateix edifici; o que poden estar disposades directament sobre qualsevol terreny proper a la xarxa elèctrica. Un altre equip necessari a les instal·lacions connectades a la xarxa és l'ondulador o inversor-convertidor electrònic que transforma l'energia en forma de corrent continu que proporcionen les plaques solars, en corrent altern d'igual tipus i valor que el transportat per la xarxa elèctrica; i, per últim, el quadre d'interconnexió amb la xarxa comercial.

Aquestes instal·lacions cal considerar-les com a petites centrals elèctriques. En el cas d'adaptar aquestes instal·lacions a un edifici, aquest incorporarà una instal·lació elèctrica nova i passa a tenir dues instal·lacions elèctriques diferenciades. D'una banda, l'habitual línia de subministrament energètic de consum amb els seus mesuradors i proteccions corresponents i, d'altra banda, la instal·lació solar fotovoltaïca amb tots els seus elements i equipament elèctric propi de control, interconnexió i mesurament.

El circuit solar produeix energia elèctrica en funció de la radiació solar incident en cada moment del dia; per tant, els valors de generació enregistrats variaran segons l'hora del dia, l'època de l'any i la meteorologia. Tota aquesta energia és comptabilitzada i injectada a la xarxa comercial per tal que qualsevol client de la companyia elèctrica la consumeixi. El més probable és que siguin els més propers, fins i tot els abonats del mateix edifici.

Per tant, en aquest cas el titular de la instal·lació passa a ser un consumidor d'energia elèctrica i una central generadora, tot alhora.

5.2.1. Tensions de treball

Les instal·lacions de petita potència es regulen en el seu conjunt, excepte especificacions concretes, pel Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT). Els sistemes fins a 5 kW, pel fet de ser sistemes de poca potència, es poden connectar a xarxa en Baixa Tensió, monofàsica, a $230 V_{CA}$ i, per a potències superiors, es dissenyen amb una connexió trifàsica.

A la part solar, de voltatge en corrent continu (DC), hi ha diferents configuracions possibles en les connexions sèrie-paral·lel dels mòduls per a obtenir valors de treball adequats en corrent continu. Depenent de l'inversor escollit, els voltatges de treball poden ser, des dels 12 V fins al $600 V_{CC}$. En tot cas, per a optimitzar el sistema, es tendeix a voltatges mitjans propers a les tensions de connexió a la xarxa ($260 - 420 V_{CC}$).

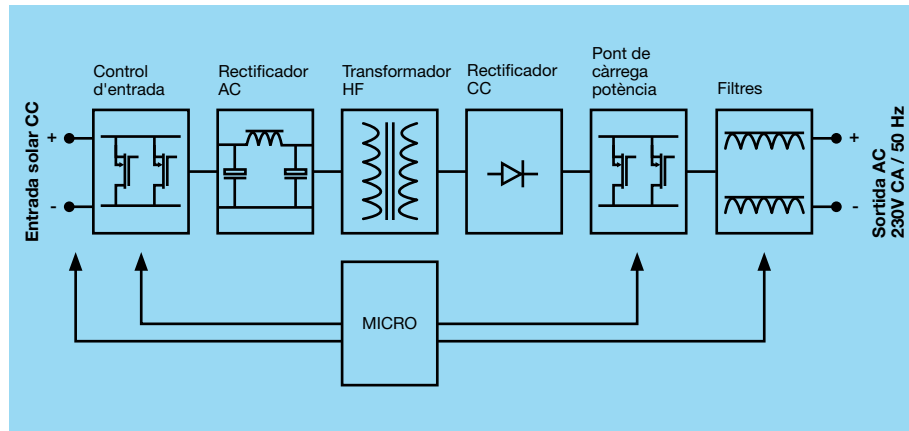
5.2.2. Arquitectura dels inversors

En qualsevol projecte fotovoltaic de connexió a la xarxa, l'inversor és el cor del sistema. És molt important tenir-ne clares les característiques tècniques: potència, rangs de treball, tensió DC-AC, freqüència i potència màxima assolida. Recordem que la potència acumulada per la quantitat d'inversors determinarà la potència nominal de la planta en qualsevol sistema fotovoltaic connectat a la xarxa.

Per a cada sistema fotovoltaic de connexió a la xarxa, podem trobar tot un ventall d'equips (en potències nominals) per a la seva utilització. En sistemes on ja s'instal·len més de 100 kWp, els equips poden ser de potències nominals de 10 kW en endavant. Bàsicament, s'escullen els equips que tinguin en les seves característiques tècniques els màxims de les proteccions establertes per la normativa actual, de manera que derivi en un augment de la seguretat del sistema i redueixi costos d'instal·lació en general. Aquestes proteccions són:

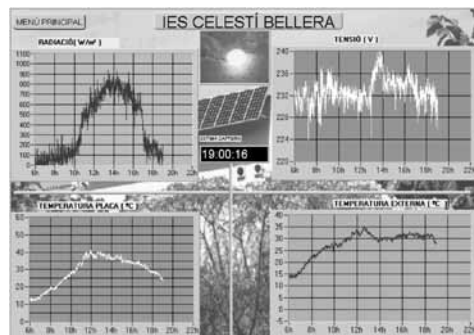
- Separació galvànica. Aquest condicionant pot ser assolit fora del convertidor mateix, bàsicament perquè, per necessitats tècniques de connexió a la xarxa, es dissenyi la instal·lació d'un transformador que faci a la vegada aquesta funció.
- Relé de control de tensió de la xarxa.
- Relé de control de la freqüència de la xarxa.
- Temporització en la reconexió.
- Si es verifiquen aquestes proteccions, certificat del fabricant on s'especifiqui que els valors determinats en normativa no poden ser modificats per qualsevol persona, via *software* d'equip.
- Certificat de no-funcionament en illa.
- Certificat d'emissió d'harmònics i de compatibilitat electromagnètica.
- El factor de potència de l'energia subministrada ha d'estar al més a prop possible del valor 1.
- Senyalització *on/off* del sistema.
- Afegit als punts reflectits anteriorment, les companyies elèctriques exigeixen, depenent de la companyia o de la zona o regió, altres consideracions tècniques. Aquest és el cas, per exemple, de la "rigidesa dielèctrica".

Figura 5.9. Esquema de blocs d'un inversor de connexió a la xarxa.



També, i encara que no ho especifiqui la normativa, es valoren molt els equips que incorporen visualització, monitorització i control de les dades i paràmetres de funcionament de tot el sistema. El *display* de visualització en els equips i el *software* per monitorització en l'ordinador són cada vegada més importants.

Figura 5.10. Sistema d'adquisició i monitorització de dades en temps real d'una instal·lació fotovoltaica connectada a la xarxa.



La ubicació de la instal·lació o situació física dels inversors poden ser de les formes ja comentades anteriorment:

- Instal·lats dins el mateix camp solar, a la intempèrie i amb caixa amb qualitat estanca IP65.
- Instal·lats al camp solar dins d'una caseta o d'un armari IP65 adequat per a incloure-hi els equips.
- Instal·lats en una sala específica molt adient en temperatura, ambient i espai, accessible per als tècnics de manteniment i l'usuari/propietari.
- Instal·lats a la sala caseta o al lloc a cobert dins les especificacions del punt anterior, però amb la inclusió a prop dels comptadors i quadre de proteccions.

Figura 5.11.
Convertidor de connexió a xarxa.



5.2.3. Connectivitat elèctrica

Per a desenvolupar la interconnexió de tot el sistema, es prendran les mesures a les instal·lacions ja expressades en apartats anteriors, incidint especialment en la minimització de les pèrdues derivades de les connexions, tant en DC com en AC.

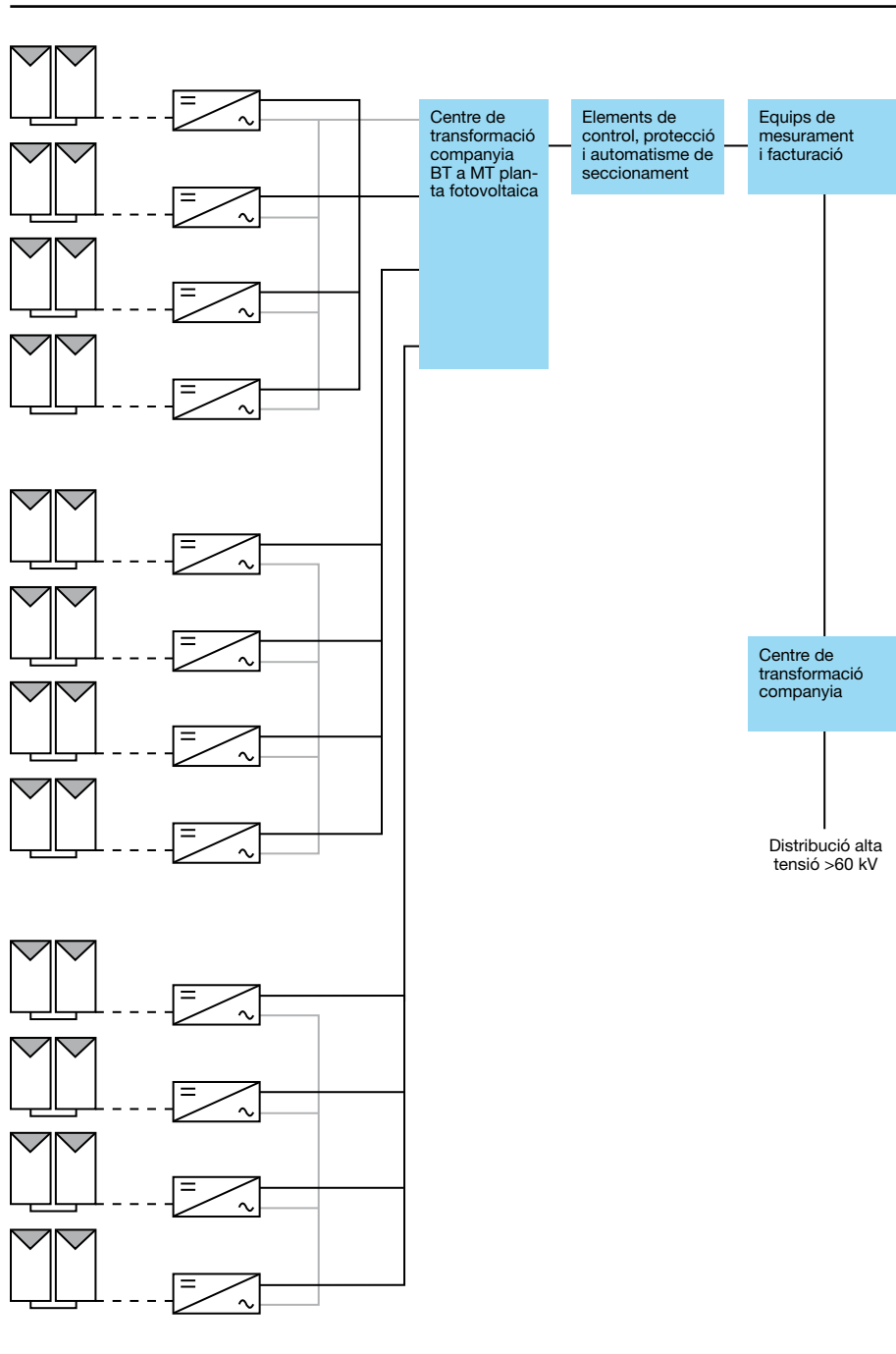
- Interconnexió mòduls.
- Connexió dels mòduls fins als inversors.
- Connexió dels inversors al quadre de proteccions i comptadors d'energia.
- Punt de connexió a xarxa.

D'altra banda, les proteccions definides per normativa a tota la instal·lació ja s'han definit anteriorment a l'apartat relacionat amb els convertidors, però hi detallarem altres especificacions comunes de tota la instal·lació:

- Terra unificat de tota la instal·lació. No pot coincidir mai amb la presa de terra del neutre de la companyia.
- Dispositius automàtics generals de seccionament + diferencial accessible per a l'empresa distribuïdora.
- Doble comptador. Lectures d'energia emesa a la xarxa i consumida.

En l'esquema unifilar de la figura 5.12, es presenta la connexió d'una instal·lació fotovoltaica combinant la connexió en paral·lel de quatre equips per fase, amb inversors de 2,5 kW nominals, acumulant per la suma de les tres fases de 10 kW, 30 kW en potència nominal total del sistema.

Figura 5.12. Esquema unifilar d'un sistema fotovoltaic de 30 kW, amb equips de 2,5 kW.



5.2.4. Equipaments d'interconnexió

Les proteccions definides en l'apartat dels convertidors són les esmentades com a generals. En tota instal·lació fotovoltaica, s'instal·larà un quadre d'interconnexió amb la xarxa. Aquest quadre pot incloure el total dels dispositius de protecció definits per la normativa o els establerts com a essencials. D'altra banda, aquests equipaments poden incloure els comptadors de mesurament i els transformadors de tensió per a l'adaptació a la tensió de xarxa.

Definim els dos tipus de quadre d'interconnexió:

1. **Quadre d'interconnexió complet.** Conjunt de dispositius definits per la normativa especificada per a la interconnexió a xarxa. D'aquesta manera, es podrien incloure altres elements que no s'inclouen per normativa, però que es podrien valorar com a importants des d'un punt de vista de qualitat d'instal·lació. En aquest cas, és lògic pensar que els inversors no necessiten que unes de les seves característiques tècniques siguin les proteccions de normativa.
2. **Quadre d'interconnexió bàsic.** Quadre compost essencialment per dos elements: seccionador automàtic (contactor-magnetotèrmic) i diferencial. Han de ser accessibles per a la companyia elèctrica conjuntament amb els comptadors, seccionador manual i fusibles d'entrada a la instal·lació.

En aquest punt, es reuneixen les connexions derivades dels diferents inversors generadors. És el punt de connexió de tot el sistema.

5.2.5. Punt de connexió a la xarxa

Les companyies elèctriques estableixen punts d'interconnexió amb la xarxa. En aquest tipus de sistemes, amb força 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 hi ha 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 manera, a vegades pot haver-hi una certa distància (centenars de metres) des del quadre fins al punt que especifiqui la companyia.

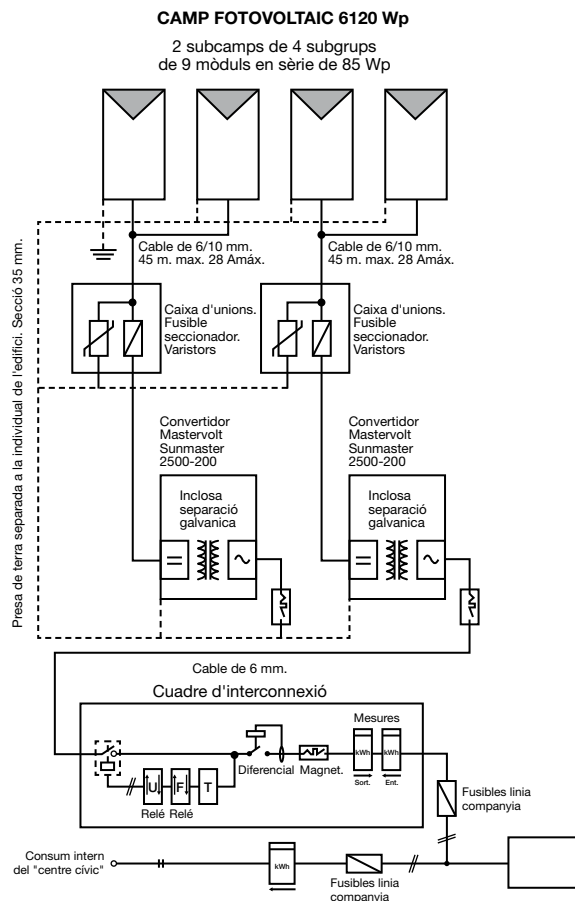
Normes generals d'aplicació per a definir una unió perfecta a la xarxa:

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

Evidentment, aquests punts d'unió a la xarxa comercial s'han de dissenyar de manera que les pèrdues de rendiment acumulades per la planta solar en tot el pe-riple que es pot produir des que es genera un quilovat-hora fins que s'injecta a la xarxa elèctrica siguin minimitzats. L'elecció d'equips inversors, cables i connexions, 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 (dispositius d'acció automàtica) que demana la normativa vigent. Aquests elements de protecció poden duplicar els que ja incorporen els mateixos inversors en el seu disseny, per tal d'evitar tant els danys a la xarxa elèctrica com la pertorbació de la producció solar i també els danys que el mateix sistema pugui produir a l'equipament interconnectat i a la resta d'usuaris de la xarxa.

Figura 5.13. Esquema unifilar d'un sistema fotovoltaic de 5 kW i amb 6,12 kWp.



6.1.1. Elements bàsics (A)

La figura anterior mostra un esquema unifilar d'una instal·lació solar fotovoltaica autònoma amb consums de corrent altern (CA) i amb un grup electrogen com a equip de suport auxiliar.

L'esquema unifilar consta dels elements següents:

A1 - Generador fotovoltaic

Està format per un conjunt de panells fotovoltaics que transformen la radiació solar directament en electricitat de corrent continu (CC). Els panells es poden connectar elèctricament formant associacions en "paral·lel" o "sèrie-paral·lel" que permetin assolir el voltatge nominal de treball de la instal·lació (12, 24 o 48 V_{CC}). L'elecció del voltatge de treball dependrà de la potència del generador fotovoltaic i, com a regla pràctica, es recomana utilitzar els 12 V_{CC} per a instal·lacions petites (màxim 400 Wp). A partir d'aquesta potència de generador convé escollir els valors de 24 o 48 V_{CC} .

El dimensionament del generador i la configuració depèn del perfil de consums i la demanda energètica total a cobrir.

A2 - Reguladors de càrrega

El regulador de càrrega té la funció de protegir les bateries de sobrecàrregues, que poden ocasionar els panells fotovoltaics, mitjançant la limitació que realitzen de la càrrega i utilitzant el valor del voltatge de les bateries com a paràmetre de control. Tanmateix, realitza un control de bateria baixa o descàrrega, basant-se en el voltatge de l'acumulador, per tal que aquests no quedin malmesos. Aquestes són les funcions bàsiques de l'aparell i les més habituals tot i que, generalment, solen oferir un conjunt d'informació complementària que afavoreix el coneixement i seguiment de la instal·lació.

El regulador de càrrega s'ha de muntar seguint l'ordre que es mostra a l'esquema unifilar. Aquest aparell té una entrada (+) i (-) de mòduls, una connexió a bateries (+), (-) i una sortida per a consums de CC (+) i (-).

El dimensionament del regulador estarà condicionat per la tensió escollida en les bateries i la intensitat de càrrega del generador fotovoltaic o la intensitat màxima demandada pels consums.

A3 - Acumuladors electroquímics

Aquest element és l'encarregat d'emmagatzemar l'energia elèctrica produïda pels panells fotovoltaics i, posteriorment, poder subministrar-la quan sigui necessari, per exemple en absència de radiació (dies ennuvolats o a les nits) o en les situacions en què la demanda de potència instantània en el consum sigui superior a la potència de producció del camp fotovoltaic.

La ubicació de les bateries tindrà en compte els requisits mínims de ventilació, seguretat i il·luminació de l'espai, descrits en la ICT-BT 30.

El dimensionament de la bateria es fa a partir de la demanda d'energia diària (kWh/dia, Ah/dia), del tipus d'aplicació, dels dies d'autonomia establerts per al sistema, i de la profunditat de descàrrega màxima de l'acumulador.

El voltatge de treball escollit i la profunditat de descàrrega màxima dels acumuladors dependrà de les característiques, tipologia i tecnologia que tinguin.

A4 - Inversors de CC/CA a per instal·lacions autònomes

L'inversor de CC/CA és l'element encarregat de transformar el corrent continu (CC) en corrent altern (CA) monofàsic, amb una tensió normalitzada de $230 V_{CA}$, o trifàsic amb tensió de $230/400 V_{CA}$. En ambdós casos, la freqüència del corrent altern és de 50 Hz.

En les instal·lacions fotovoltaïques autònomes l'inversor es connectarà directament a l'embarrat general de les bateries, tal i com es veu a l'esquema unifilar. Tots els elements d'aquesta connexió (cables, terminals i cargols d'unió) s'hauran d'escollir per tal que garanteixin la seguretat davant les elevades intensitats del corrent elèctric (CC) que extreu de l'inversor.

Cal tenir present que un inversor amb una potència P , en corrent altern, pot consumir una intensitat de les bateries $I_{bat} = 1,15 \cdot (P / V_{bat})$. Si, per exemple, tenim un inversor de $1.000 W_{CA}$ a $12 V_{CC}$, la I_{bat} pot assolir un valor de gairebé 96 Ampers.

Aquesta intensitat de corrent continu la subministra exclusivament la bateria i no pas el generador fotovoltaic, com es podria pensar.

La potència CA dels inversors dependrà de la potència de les càrregues connectades, corregida amb el corresponent coeficient de simultaneïtat que li pertoqui. D'altra banda, caldrà tenir en compte els pics de consum, en l'engegada d'equips tals com motors i bombes elèctriques i que l'inversor ha de poder suportar; aquests valors poden ser de 4 a 5 vegades la intensitat nominal I_n de la càrrega (motor o bomba).

Una modalitat molt estesa en instal·lacions fotovoltaïques autònomes és la utilització d'un inversor+carregador de bateries, de manera que en un mateix aparell tenim les dues opcions: inversor i carregador.

A5 - Grup electrogen de suport

Aquest equip és un element preceptiu per a instal·lacions en què sigui necessari garantir el 100% del subministrament elèctric en qualsevol situació.

El grup electrogen es connecta a una connexió pròpia que tenen els inversors-carregadors. D'aquesta manera es garanteix tant la càrrega de les bateries com el subministrament a l'habitatge.

En el cas que la instal·lació disposi d'un inversor sense carregador, s'haurà d'implantar el sistema de càrrega amb un carregador extern connectat al grup electrogen.

A6 - Comptador d'energia produïda per la instal·lació solar

La instal·lació d'un equip de mesurament de l'energia produïda per la instal·lació fotovoltaïca o consumida per l'habitatge o una altra aplicació resulta interessant i recomanable per a poder disposar de valors reals dels consums i comprovar la desviació respecte dels paràmetres de càlcul.

Generalment, la manera més senzilla d'implantar un equip de mesura és en la línia de consum CA (segons l'esquema unifilar) ja que l'equip és un comptador elèctric estàndard. En el cas que es vulgui comptabilitzar l'energia en la línia de CC de la instal·lació, s'optarà per instal·lar reguladors de càrrega que portin incorporada aquesta opció com una funció més.

En els sistemes amb generadors fotovoltaïcs de potència nominal superiors a 500 W, s'aconsella la instal·lació d'un comptador elèctric per a mesurar el consum d'energia (excepte els sistemes de bombament).

6.1.2. Proteccions elèctriques (B)

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

- 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 fer especial atenció a la protecció elèctrica de la bateria a causa del risc potencial de cremades o explosió que presenta aquest element de la instal·lació.

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

Proteccions a la part de CC

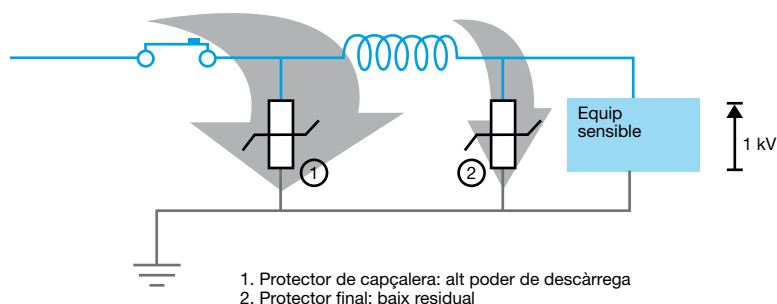
B1 i B3 - Proteccions contra sobretensions (varistors)

El varistor és un element destinat a protegir la instal·lació de les sobretensions transitòries d'origen atmosfèric (descàrregues directes del llamp o sobretensions que pugui induir en els equips i/o línies elèctriques).

A fi de garantir l'eficàcia del sistema de protecció contra sobretensions, caldrà instal·lar un varistor en el generador fotovoltaic i un altre, en sèrie, a l'entrada de cada equip a protegir, tal i com s'indica en l'esquema unifilar.

La distància mínima entre varistors en la mateixa línia serà de, com a mínim, 10 m. Si no es compleix aquesta condició és necessari instal·lar bobines de desacoblament (cable enrotllat).

Figura 6.2. Disposició correcta dels varistors.



Pel que fa a la selecció del varistor s'haurà de consultar la ITC-BT 20 i les recomanacions dels fabricants d'aquests equips. Es pot definir, com a característiques elèctriques de partida, una tensió de protecció (V_p) de, com a mínim, 1,5 kV; una intensitat màxima de descàrrega (I_n), de 40 kA i una tensió nominal de línia (V_n) en funció de la tensió de treball de la instal·lació.

B2 - Fusibles de línia en el generador fotovoltaic

Són elements de protecció contra sobrecàrregues i curtcircuits. Encara que la intensitat de curtcircuit del generador fotovoltaic (panells) no resulti gaire elevada ($I_{CC} = 1,08 I_{mpp}$), el fusible protegirà la línia elèctrica contra curtcircuits d'origen extern.

Cal destacar que aquests elements no poden actuar com a seccionadors amb càrrega de cap equip de la instal·lació. Per a aquesta funció s'utilitzaran els interruptors manuals o automàtics descrits més endavant.

Tal i com es representa en l'esquema unifilar, es col·locarà un fusible per a cada conductor polar (+/-) de cada sèrie de mòduls (*string*) del generador fotovoltaic.

També es col·locarà en la línia principal d'un grup de sèries de mòduls, ja que, encara que pugui ser una protecció redundant, garanteix un manteniment més segur de la instal·lació.

No obstant això, aquest dispositiu es pot substituir per un altre que permeti el seccionament del generador fotovoltaic amb càrrega (interruptor automàtic magnetotèrmic).

El dimensionament d'aquests fusibles es realitza d'acord amb la ITC-BT 22.

B4 - Fusibles de línia de l'acumulador

Aquest fusible actua com a fusible de protecció general de la bateria en cas que, més amunt de la instal·lació, hi hagi alguna protecció defectuosa que no actuï o bé que s'hagi produït un curtcircuit accidental. En aquesta situació el fusible general protegirà la instal·lació i la bateria.

Aquest fusible és l'equivalent al fusible de la Caixa General de Protecció (CGP) que s'instal·la en la connexió general d'un subministrament elèctric a la companyia distribuïdora.

Cal puntualitzar que els acumuladors elèctrics o bateries poden produir corrents de curtcircuit, en funció de la seva capacitat (Ah) de l'ordre de 6 a 8 kA (kiloamperes). Per tant, el "poder de tall" (PdC) d'aquest fusible haurà de ser superior a aquest valor per tal de garantir una protecció segura sense que es destrueixi.

Com en el cas dels dispositius fusibles anteriors, aquest no té la capacitat de seccionar amb càrrega; per a aquesta funció s'utilitzaran interruptors manuals o automàtics.

Tal com es representa en l'esquema unifilar, es col·locarà un fusible de línia en la connexió a la bateria.

El dimensionament d'aquests fusibles es realitza d'acord amb la ITC-BT 22.

Vigilant d'aïllament

A les instal·lacions autònomes, el voltatge de la instal·lació en CC acostuma a ser inferior als 75 V, un valor dins el rang considerat com a molt baixa tensió (ITC-BT 36) i, per tant, no presentarà perill en cas de contactes directes o indirectes i en aquest sentit no és necessari instal·lar aquesta protecció.

B5 - Interruptor automàtic de tall amb càrrega

Aquest dispositiu de protecció és un interruptor automàtic magnetotèrmic per a sistemes elèctrics de corrent continu (CC) i permet seccionar, amb càrrega, la zona del circuit i/o equip en què se situï aquest element. Això permetrà realitzar de manera segura les operacions de manteniment dels elements principals de la instal·lació (generador fotovoltaic, regulador de càrrega, inversor, etc.).

Els interruptors automàtics per a sistemes de corrent continu (CC) són dispositius amb una corba de funcionament (Intensitat - Tensió) diferent de la dels dispositius equivalents per a corrent altern (CA).

En aquest cas caldrà seguir les recomanacions del fabricant dels equips a l'hora de seleccionar el dispositiu adient per a la instal·lació i aplicar el que estableix la ITC-BT 22.

Proteccions a la part de CA

B6 - Interruptor automàtic de tall de la sortida de CA de l'inversor

Aquest és un element de protecció contra sobrecàrregues i curtcircuits, encara que la seva principal funció és el seccionament amb càrrega de la sortida CA de l'inversor, que permet realitzar de manera segura les operacions de manteniment d'aquests equips. És redundant en cas que l'inversor n'incorpori un.

En el cas de diversos inversors treballant en paral·lel en un sistema monofàsic (230 V_{CA}) o en un subministrament trifàsic (230/400V_{CA}), cada inversor disposarà de l'interruptor automàtic corresponent.

El dimensionament d'aquest PIA es realitza tal i com s'indica en la ITC-BT 22.

B7 - Quadre de proteccions de línia de subministrament

Aquest quadre s'instal·larà a la línia principal de subministrament de l'inversor o conjunt d'inversors i ha de tenir, com a mínim, els elements següents:

- **IGA (interruptor general automàtic)**

Element de protecció contra sobrecàrregues i curtcircuits que, alhora, té la funció de seccionar la línia per tal de realitzar operacions de manteniment, etc. L'IGA es dimensionarà d'acord amb la ITC-BT 22.

- **Interruptor automàtic diferencial**

Element de protecció contra contactes indirectes. Aquest dispositiu s'encarrega de detectar corrents derivats a terra per causa d'un defecte d'aïllament i dur a terme la desconexió immediata del circuit per a evitar contactes indirectes a les persones. Generalment s'instal·len interruptors diferencials d'alta sensibilitat (30 mA) i, en qualsevol cas, caldrà basar-se en la ITC-BT 24. Atès que l'interruptor diferencial basa la seva protecció en la detecció dels corrents de defecte, caldrà que el neutre del subministrament CA de l'inversor estigui connectat a terra

per tal que el dispositiu diferencial actuï davant del primer defecte de la instal·lació i desconnecti el subministrament. En cas que no sigui així, caldrà utilitzar un detector de defecte d'aïllament per a la protecció de contactes indirectes.

- **PIA per derivació dels diferents circuits**

Elements de protecció contra sobrecàrregues i curtcircuits, implantats per diversos interruptors magnetotèrmics. El dimensionament d'aquests equips es realitza en funció de les càrregues associades a cada circuit, d'acord amb la ITC-BT 22.

- **Varistors de protecció en la línia CA**

Element de protecció contra les sobretensions transitòries d'origen atmosfèric. Només és necessari implantar aquesta protecció en cas que el fabricant de l'inversor així ho aconselli ja que, en ocasions, per a protegir contra les sobretensions, només cal instal·lar els varistors descrits en els apartats anteriors. En cas que la línia CA de subministrament de l'inversor discorri per un tram llarg i exterior a l'habitatge, serà necessària la instal·lació d'aquest dispositiu perquè hi ha la possibilitat d'elevacions de tensió d'aquesta línia per induccions d'un llamp proper.

C1 - Presa de terra

La presa de terra C1 de l'esquema s'anomena tècnicament "terra de protecció" ja que la seva funció és evitar que es generin tensions perilloses a les parts de la instal·lació que entrin en tensió, de manera accidental, per algun defecte elèctric o d'origen atmosfèric.

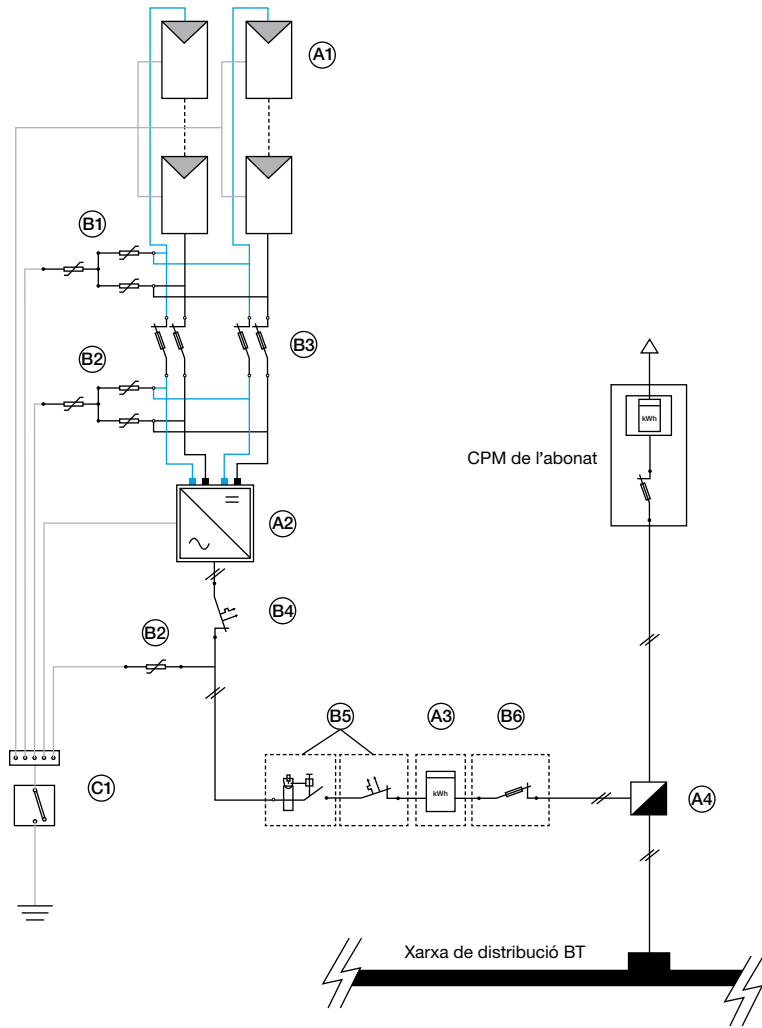
Al terra de protecció s'hi connectaran les parts metàl·liques dels panells fotovoltaics, les estructures de suport i el terra del xassís de l'inversor i del regulador de càrrega.

El segon terra que apareix a l'esquema unifilar és el terra del conductor neutre (CA) de l'inversor i, tècnicament, s'anomena "terra de servei". És el que permet que funcioni l'interruptor diferencial davant de qualsevol defecte en la línia CA entre l'inversor mateix i els receptors de la instal·lació (habitatge, etc.). En aquest cas caldrà que les masses metàl·liques dels equips receptors de la instal·lació estiguin connectades a un terra propi i diferent del terra del neutre.

El dimensionament i muntatge de les preses de terra haurà de complir les especificacions tècniques establertes en el REBT, en les instruccions tècniques ITC-BT-18, ITC-BT-19 i ITC-BT-26.

6.2. Esquemes bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques connectades a xarxa

Figura 6.3. Esquema elèctric d'una instal·lació fotovoltaïca connectada a la xarxa.



6.2.1. Elements bàsics (A)

La figura anterior mostra un esquema unifilar d'una instal·lació solar fotovoltaica de connexió a xarxa, que compleix els requisits establerts en el Reial decret 1663/2000, de 29 de setembre, sobre connexió d'instal·lacions fotovoltaïques a la xarxa de baixa tensió i el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión REBT.

Aquest esquema representa un generador fotovoltaic connectat a un inversor CC/CA de connexió a xarxa i les proteccions de la instal·lació corresponents.

L'esquema unifilar consta dels elements següents:

A1 - Generador fotovoltaic

Està format per un conjunt de panells fotovoltaics que transformen la radiació solar directament en electricitat de corrent continu (CC). Els panells del generador fotovoltaic s'han d'agrupar en conjunts amb idèntic nombre de panells i de les mateixes característiques elèctriques, anomenat sèrie o *string*. La sèrie es configura amb el nombre de panells que permeti assolir un voltatge en circuit obert (V_{oc}) inferior al voltatge màxim admès per l'inversor i un voltatge en el punt de màxima potència (V_{mpp} o V_{max}) que estigui dins el rang de tensions de funcionament del seguidor del punt de màxima potència (MPPT, *maximum power point tracker*) de l'inversor.

Una vegada configurada la sèrie inicial de mòduls que compleixin els requisits anteriors, la resta de panells s'han d'agrupar de manera idèntica per tal d'oferir a la part CC de l'inversor els mateixos valors de voltatge i intensitat del corrent elèctric. Aquesta última (I_{mpp} o I_{max}) haurà de ser inferior a la màxima intensitat admissible per l'inversor.

La potència total del generador fotovoltaic hauria de ser entre 1 i 1,3 vegades la potència nominal de l'inversor

[$P_{GFV} = (1 \text{ a } 1,3) \cdot P_{inv}$] per tal que aquest pugui realitzar una transformació eficient amb una potència el més propera possible a la seva potència nominal.

Sovint és la limitació de l'espai disponible a les cobertes allò que condiciona la potència del camp fotovoltaic. No obstant això, s'haurà de trobar l'inversor que millor s'ajusti al generador seguint els criteris anteriors.

A2 - Inversors de CC/CA per a instal·lacions connectades a xarxa

L'inversor de CC/CA és l'element encarregat de transformar el corrent continu (CC) produït pels panells fotovoltaics en corrent altern de les mateixes característiques de tensió i freqüència que la xarxa elèctrica de distribució a la qual s'acobla: 3 x 400/230 V.

Per a instal·lacions amb potència nominal de l'inversor de fins a 5 kW, la seva connexió es pot realitzar a una línia monofàsica de 230 V_{CA}; per a potències superiors i fins als 100 kVA, la connexió haurà de ser a una línia trifàsica (3 x 400/230 V).

En aquest segon cas, es pot utilitzar un inversor únic trifàsic (3 x 400/230 V_{CA}) o un conjunt d'inversors monofàsics connectats per grups del mateix nombre i potència a les tres fases R-S-T-N de la línia de distribució de baixa tensió.

L'inversor de connexió a xarxa ha de disposar d'un conjunt de proteccions obligatòries per normativa per poder acoblar-se a la xarxa elèctrica, com són:

No funcionament en "illa": l'inversor no pot estar generant quan no hi hagi tensió a la xarxa de distribució a la qual està connectat.

- **Control de mínima i màxima tensió:** l'inversor s'haurà de desconnectar automàticament quan la tensió del sistema decaigui a partir del 85% de la tensió de referència (mínima tensió $U_{\min} = 0,85 \times U_0$) o quan la superi en un valor del 110 % (màxima tensió $U_{\max} = 1,10 \times U_0$).
- **Control de freqüència:** l'inversor s'haurà de desconnectar automàticament quan la freqüència de xarxa decaigui per sota de 49 Hz o superi els 51 Hz.

Aquestes proteccions estan incorporades en el mateix inversor i, en la documentació de legalització de la instal·lació, s'haurà d'aportar el document acreditatiu del fabricant conforme disposa i compleix les proteccions anteriors.

D'altra banda, tots els inversors de connexió a xarxa disposen d'un sistema de control al costat CC que permet optimitzar el funcionament dels panells fotovoltaics; aquest control s'anomena "seguiment del punt de màxima potència" o MPPT. El sistema busca el punt de màxima potència (I_{mpp} , V_{mpp}) del camp fotovoltaic per tal que aquest generi la màxima potència disponible en cada moment, ja que aquesta varia, principalment, en funció de la irradiància solar i, en segon terme, per l'efecte de la temperatura ambient a les cèl·lules solars dels panells.

A3 - Comptador bidireccional d'energia injectada a la xarxa elèctrica

Aquest element permet comptabilitzar l'energia generada per la instal·lació i la que consumeix; per tant, aquest element realitza una lectura en dues direccions o "bidireccional".

Per a instal·lacions monofàsiques de fins a 5 kW d'inversor, el comptador haurà de ser electrònic de dos fils (230 V_{ca}); disposarà només d'energia activa (kWh) i serà de classe 2 o superior. També haurà d'estar homologat per la companyia distribuïdora i complir amb el que estableix la normativa específica sobre els punts i equips de mesura.

Per a instal·lacions superiors a 5 kW i fins a 43,6 kW, el comptador podrà ser de lectura directa i haurà d'incorporar lectures d'energia activa en doble sentit (kWh) i energia reactiva de generació (kVAhr).

A partir d'aquesta potència, el comptador serà de mesura indirecta, es a dir que disposarà dels corresponents transformadors d'intensitat acoblats a l'embarrat del quadre d'interconnexió. Les lectures d'energia seran les mateixes que en el cas anterior.

El comptador es col·locarà dins el mòdul corresponent de doble aïllament, amb la resta d'elements de protecció general de la interconnexió. Aquest mòdul haurà de poder ser precintat per la companyia distribuïdora.

El comptador, juntament amb la resta dels elements de protecció de connexió, s'haurà d'ubicar al punt límit públic-privat de la propietat, amb accés per part de la companyia les 24 h i els 365 dies de l'any.

A4 - Punt de connexió

Aquest és el punt on es connecta la instal·lació fotovoltaica amb la xarxa de distribució de baixa tensió.

La ubicació i característiques del punt de connexió és competència directa de la companyia elèctrica i això implica que la petició d'aquest punt és un dels primers tràmits administratius que s'han de realitzar quan es vol muntar una instal·lació fotovoltaica connectada a xarxa.

De manera general, sempre se situarà a la xarxa de distribució o a la connexió general de l'abonat; no obstant això últim, serà la companyia la que en determini la ubicació i condicions tècniques que ha de complir.

Pel que fa a la potència fotovoltaica a connectar, aquesta serà com a màxim un 50% de la potència de dissipació (capacitat d'absorció) de la connexió elèctrica o, si no n'hi ha, la de l'estació transformadora que alimenti la línia.

6.2.2. Proteccions elèctriques (B)

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

- 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.

Proteccions a la part de CC

B1 i B2 - Proteccions contra sobretensions (varistors)

El varistor és un element de protecció contra les sobretensions, destinat a protegir la instal·lació contra les sobretensions transitòries d'origen atmosfèric.

A fi de garantir l'eficàcia del sistema de protecció contra sobretensions, caldrà instal·lar un varistor per cada una de les línies de la instal·lació i un altre, en sèrie, a l'entrada de cada equip a protegir, tal com s'ha descrit en l'apartat de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes.

A la sortida CA de l'inversor i després de l'interruptor automàtic B4, s'instal·larà un varistor de CA per a protegir l'inversor de sobretensions que es puguin induir per aquesta línia.

Les característiques d'aquests varistors hauran d'estar en consonància amb les tensions i potències del generador fotovoltaic de connexió a xarxa, el nivell de protecció que es vol assolir i la ubicació geogràfica de la instal·lació. Aquesta última permetrà conèixer la probabilitat d'impacte de llamps i la seva intensitat.

No obstant caldrà seguir les recomanacions dels fabricants d'aquests equips i, en especial, la ITC-BT 20 i la resta de normativa que calgui aplicar-hi.

B3 - Fusibles de la línia del generador fotovoltaic

Element de protecció contra sobrecàrregues i curtcircuits, encara que la intensitat de curtcircuit del generador fotovoltaic (panells) no resulti gaire elevada ($I_{CC} = 1,08 I_{mpp}$), el fusible protegirà la línia elèctrica contra curtcircuits d'origen extern.

Cal destacar que aquests elements no poden actuar com a seccionadors amb càrrega de cap equip de la instal·lació. Per a aquesta funció s'utilitzaran els interruptors manuals o automàtics descrits més endavant.

Tal i com es representa en l'esquema unifilar, es col·locarà un fusible per a cada conductor polar (+/-) de cada sèrie de mòduls (*string*) del generador fotovoltaic.

També es col·locarà en la línia principal d'un grup de sèries de mòduls, ja que, encara que pugui ser una protecció redundant, garanteix un manteniment més segur de la instal·lació.

No obstant, aquest dispositiu es pot substituir per un altre que permeti el seccionament del generador fotovoltaic amb càrrega (interruptor automàtic magneto-tèrmic).

El dimensionament d'aquests fusibles es realitza d'acord amb la ITC-BT 22.

Vigilant d'aïllament

Els generadors fotovoltaics d'aquest tipus d'instal·lacions treballen amb voltatges CC bastant elevats en relació amb els sistemes autònoms. Com que els interruptors diferencials utilitzats per a corrent altern no funcionen amb corrent continu, aquestes tensions resulten perilloses si la instal·lació no disposa de cap tipus d'element de protecció davant possibles defectes d'aïllament dels conductors i/o equips.

Per aquesta raó és necessari incorporar a la instal·lació un dispositiu de control d'aïllament el qual analitza constantment l'aïllament elèctric entre els conductors del generador fotovoltaic i la presa de terra. Quan el nivell d'aïllament decreix a uns valors perillosos, el control desconnecta l'inversor del generador fotovoltaic i en curtcircuita els conductors elèctrics i fa que la tensió es redueixi a zero.

El sistema romandrà desconnectat fins que no es restableixi el nivell d'aïllament inicial, és a dir, quan s'hagi reparat el defecte de la instal·lació.

Proteccions a la part de CA

B4 - Interruptor automàtic de tall de la sortida CA de l'inversor

Aquest és un element de protecció contra sobrecàrregues i curtcircuits, encara que la seva funció principal és el seccionament amb càrrega de la sortida CA de l'inversor, permetent realitzar de manera segura les operacions de manteniment d'aquests equips. És redundant en cas que l'inversor n'incorpori un.

En el cas de diversos inversors treballant en paral·lel en un sistema monofàsic ($230 V_{CA}$) o en un subministrament trifàsic ($230/400V_{CA}$), cada inversor disposarà de l'interruptor automàtic corresponent.

El dimensionament d'aquest element es realitza tal i com s'indica en la ITC-BT 22.

B5 - Quadre general de proteccions i mesurament

Tal i com s'estableix en el Reial decret 1663/2000, el quadre general de proteccions i mesurament en una instal·lació d'aquestes característiques ha d'incorporar com a mínim els elements elèctrics de protecció següents:

- **Interruptor automàtic diferencial**

Element de protecció contra contactes indirectes; aquest dispositiu s'encarrega de detectar corrents derivats a terra per causa d'un defecte d'aïllament i activa la desconnexió immediata del circuit per a evitar contactes indirectes de persones. S'instal·laran interruptors diferencials d'alta sensibilitat (30 mA) i, en qualsevol cas, caldrà basar-se en la ITC-BT 24.

- **Interruptor de control de potència ICP**

L'interruptor de control de potència (ICP) té la funció de limitar la potència injectada a la xarxa a un valor màxim del 130% de la potència nominal de la instal·lació. La seva funció complementària és la de detectar fallades i desconnectar la instal·lació. El seu poder de tall (PdC) haurà de ser superior a la potència de curtcircuit de la línia en el punt de connexió. Aquest valor el determina la companyia distribuïdora.

B6 – Fusible de la instal·lació FV

Aquest fusible actua com a fusible de protecció general de la instal·lació en cas que, línies amunt de la instal·lació, hi hagi alguna protecció defectuosa que no actuï o bé que s'hagi produït un curtcircuit accidental. En aquesta situació, el fusible general protegirà la instal·lació.

El poder de tall (PdC) d'aquest fusible haurà de ser superior al valor de la potència de curtcircuit de la línia en el punt de connexió. Aquest valor ve determinat per la companyia distribuïdora.

C1 - Presa de terra

L'Article 12 del Reial decret 1663/2000 estableix les condicions de posada a terra de les instal·lacions fotovoltaiques connectades a la xarxa elèctrica de baixa tensió.

Segons aquest article, les masses de la instal·lació fotovoltaica estaran connectades a un terra independent del neutre de l'empresa distribuïdora així com de les masses de la resta de subministraments.

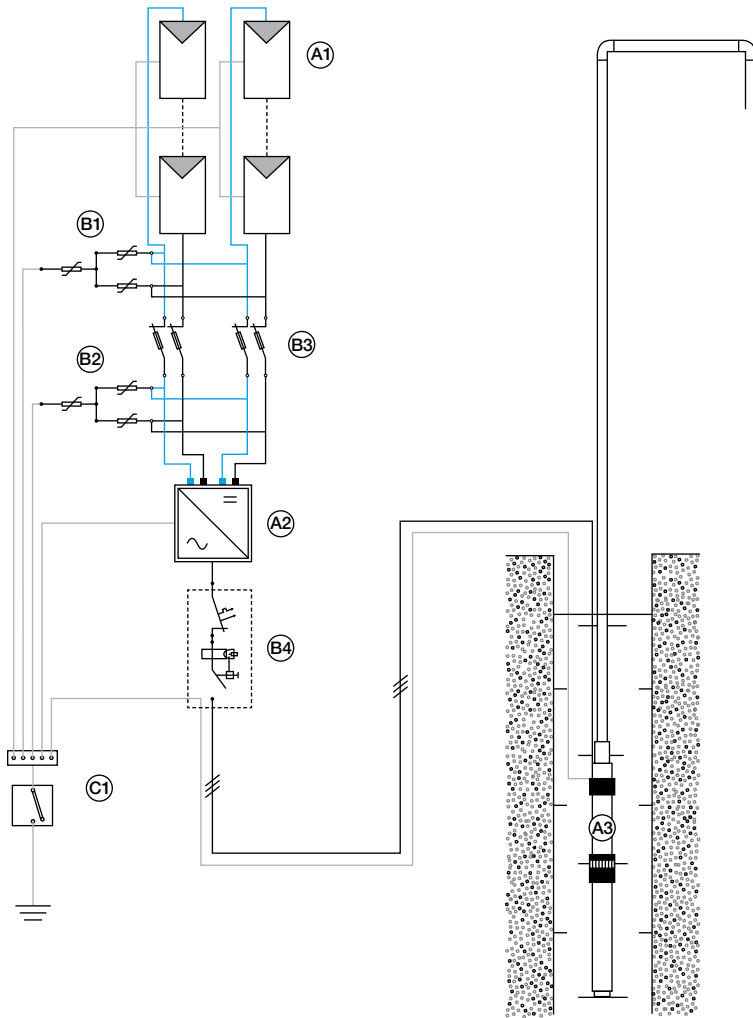
El terra independent implica que hi ha d'haver una distància mínima entre les javelines de la instal·lació fotovoltaica i la de l'edifici, per tal que no es creïn tensions perilloses i pas de defectes d'una a l'altra. Sovint, aquesta condició és molt difícil o gairebé impossible de complir, principalment en instal·lacions ubicades en les cobertes d'edificis a les ciutats.

En qualsevol cas i davant aquesta dificultat, les solucions alternatives hauran de ser proposades a la Direcció General d'Energia i Mines per tal de trobar una solució factible i segura.

El dimensionament de les línies de terra es realitza d'acord amb allò especificat al REBT ITC-BT-18, ITC-BT-19 i ITCBT-26 així com en els punts més significatius d'altres instruccions tècniques complementàries.

6.3. Esquemes bàsics de les instal·lacions fotovoltaïques de bombament directe

Figura 6.4.
Esquema elèctric d'una instal·lació fotovoltaica de bombament directe.



6.3.1. Elements bàsics (A)

La figura anterior mostra un esquema unifilar d'una instal·lació solar fotovoltaica de bombament directe d'aigua. Aquest tipus de configuració és la que té més aplicacions en el bombament fotovoltaic i, per tant, la que tractem amb més detall en aquest capítol.

Els sistemes indirectes, o amb bateries, resulten com una aplicació més dels sistemes fotovoltaics autònoms i, en aquest sentit, no té cap particularitat en relació amb altres consumidors de la instal·lació a l'hora de fer el dimensionament de la instal·lació.

L'esquema unifilar consta dels elements següents:

A1 - Generador fotovoltaic

Format per associacions sèrie i paral·lel de panells solars fotovoltaics per tal d'assolir els voltatges i les intensitats dels adaptadors de potència amb la bomba. En funció del tipus d'instal·lació de bombament (demanda d'aigua, profunditat del pou, etc.), les tensions de treball de generador fotovoltaic oscil·len de 24 - 48 V_{CC} per a petites bombes i sondeigs fins a 300 V_{CC} per a grans instal·lacions.

La qüestió de l'augment de voltatge en la configuració del generador fotovoltaic té a veure amb la potència d'aquest per tal de mantenir un amperatge relativament baix i evitar la utilització de conductors elèctrics de gran secció.

A2 - Adaptador de potència generador - bomba

L'acoblament generador-bomba o adaptador de potència és l'element encarregat de transformar la potència elèctrica del generador fotovoltaic en potència subministrada a la bomba adaptant-se a la variabilitat de la radiació solar diària.

En funció de les dimensions de la instal·lació de bombament, aquest equip presenta les tipologies bàsiques següents:

Adaptador de potència per a bombes en CC

Aquests dispositius realitzen un condicionament de la potència mitjançant el funcionament a voltatge constant, o utilitzant convertidors CC-CC o bé sense cap tipus de condicionament de potència.

Són els dispositius utilitzats per a petits sistemes de bombament en corrent continu.

Adaptador de potència per a bombes en CA

Aquests equips transformen el corrent continu (CC) produït pels panells fotovoltaics en corrent altern (CA) trifàsic. Amb l'objecte d'adaptar-se el millor possible a les condicions de funcionament del generador fotovoltaic (variació de la irradiància, temperatura de la cèl·lula, etc.), la gran majoria d'aquests equips disposen del control de "seguiment del punt de màxima potència" o MPPT, de manera idèntica que en els inversors de connexió a xarxa, i un control de variació de la freqüència.

L'acoblament s'ha de muntar seguint l'ordre que es mostra a l'esquema unifilar. Com es veu, l'entrada es troba connectada al generador fotovoltaic, mentre que la sortida es connecta al quadre de connexió de la bomba. En tot cas, s'ha de considerar l'adaptació d'un sistema de control del nivell de pou i del dipòsit.

A3 – Bomba per a aplicacions solars directes

Per a sistemes de bombament petits que treballin en CC, les bombes més emprades són del tipus “membrana” amb motors de corrent continu. D'aquestes bombes en trobem de dos tipus segons el funcionament:

- **Bombes de superfície o flotants:** són bombes que capten aigües d'aljubs o dipòsits de superfície.
- **Bombes submergides:** són bombes utilitzades en perforacions i queden submergides al pou.

Per a sistemes de bombament de gran potència que treballin en CA, hi ha pràcticament una única solució: la bomba centrífuga multietapa.

Aquesta bomba és d'immersió i treballa amb tensions trifàsiques de $3 \times 230 V_{CA}$ procedent de l'adaptador de potència amb variador de freqüència utilitzat per a aquestes aplicacions. Són bombes estàndard que es poden reparar o se'n poden reposar els components a, pràcticament, qualsevol indret del món i és precisament això últim el que ofereix una gran rapidesa a l'hora de fer una reparació.

6.3.2. Proteccions elèctriques (B)

En aquest apartat es mantenen els criteris i elements de protecció elèctrica establerts anteriorment per a les dues tipologies d'instal·lacions fotovoltaïques.

Proteccions a la part de CC

B1 i B2 - Proteccions contra sobretensions (varistors)

Com en les tipologies anteriors, en aquesta cal instal·lar-hi aquests equips, tant en el generador fotovoltaic com en l'adaptador de potència de la bomba, per a evitar que s'espatllin pels efectes de sobretensions degudes als llamps.

Les característiques d'aquests varistors hauran d'estar en consonància amb la tensió i potència del generador fotovoltaic i de l'adaptador de potència de la bomba, el nivell de protecció que es vol assolir i la ubicació geogràfica de la instal·lació. Aquesta última permetrà conèixer la probabilitat d'impacte de llamps i la seva intensitat (zones isocianúriques).

B3 - Fusibles de línia del generador fotovoltaic

Amb idèntic criteri d'utilització i selecció que en els casos anteriors, aquests fusibles permeten la protecció de la línia contra sobrecàrregues i curtcircuits. Es col·locarà un fusible per cada conductor polar (+/-) de cada sèrie de mòduls (*string*) del generador fotovoltaic.

També es col·locarà en la línia principal d'un grup de sèries de mòduls, ja que, encara que pugui ser una protecció redundant, garanteix un manteniment més segur de la instal·lació.

El dimensionament d'aquests fusibles es realitza d'acord amb la ITC-BT 22.

Vigilant d'aïllament

La seva instal·lació serà necessària en els sistemes de bombament de gran potència CA que treballin amb tensions elevades del camp fotovoltaic, ja que tenen una configuració molt semblant als generadors fotovoltaics de connexió a xarxa.

En aquest sentit, és vàlid tot el que s'ha exposat sobre el vigilant del control d'aïllament, al capítol anterior dels sistemes fotovoltaics connectats a xarxa.

Proteccions a la part de CA

B4 - Quadre de proteccions

Tot i tractar-se d'una instal·lació autònoma, aquesta és una instal·lació elèctrica. Per aquest motiu ha d'acomplir els mateixos requisits que qualsevol altra instal·lació elèctrica, i complir el REBT.

El quadre de proteccions ha de tenir com a mínim els elements següents:

- **IGA (seccionador manual)**

Element de protecció contra sobrecàrregues i curtcircuits que també té la funció de seccionar la línia per tal de realitzar operacions de manteniment, etc. L'IGA es dimensionarà d'acord amb la ITC-BT 22.

- **Interruptor automàtic diferencial**

Element de protecció contra contactes indirectes que s'encarrega de detectar corrents derivats a terra per causa d'un defecte d'aïllament i activar la desconnexió immediata del circuit per a evitar contactes indirectes de persones. S'instal·laran interruptors diferencials d'alta sensibilitat (30 mA) i, en qualsevol cas, caldrà basar-se en la ITC-BT 24. Com que l'interruptor diferencial basa la seva protecció en la detecció dels corrents de defecte, caldrà que la carcassa de la bomba estigui connectada al terra.

C1 - Presa de terra

La presa de terra C1 de l'esquema és el terra de protecció ja que la seva funció és evitar que es generin tensions perilloses a les parts de la instal·lació que entrin en tensió, de manera accidental, per algun defecte elèctric o d'origen atmosfèric.

Al terra de protecció s'hi connectaran les parts metàl·liques dels panells fotovoltaics, les estructures de suport i el terra de xassís de l'inversor i del regulador de càrrega.

El dimensionament i muntatge de les preses de terra haurà de complir les especificacions tècniques establertes en el REBT, a les instruccions tècniques ITC-BT-18, ITC-BT-19 i ITC-BT-26.



7. Dimensionament d'instal·lacions fotovoltaiques autònomes

Com tota instal·lació, un correcte dimensionament és fonamental, no tan sols perquè la instal·lació funcioni correctament, sinó també, i molt important, perquè la seva vida útil sigui llarga.

Sembla lògic pensar que els diferents elements de la instal·lació guardin entre si una relació justa i equilibrada. Cada element ha de ser curosament calculat i elegit en funció de les seves característiques, les seves prestacions i la seva idoneïtat (funcional, econòmica, etc.) d'acord amb la instal·lació que s'està projectant.

El dimensionament tindrà sempre en compte els possibles perjudicis en cas de paralització del funcionament de la instal·lació. Així doncs, no serà el mateix, des del punt de vista de les prioritats, que deixi de funcionar una estació de radioenllaç, un quiròfan d'hospital, amb funcionament vital, que una instal·lació d'il·luminació per a un habitatge, la qual es pot acceptar que deixi de funcionar en determinades ocasions, sense menystenir la instal·lació ni els seus usuaris.

És normal que el tema del dimensionament es consideri abans de començar a fer els càlculs de cada element, i que ho fem en funció de les necessitats raonables de l'usuari, la seva capacitat econòmica i preferències determinades. Tota aquesta informació de l'usuari de la instal·lació és molt important que sigui recollida perquè el funcionament de la instal·lació satisfaci tots els requisits considerats i demanats, evitant possibles futures despeses no previstes que poden arribar a ser considerables.

L'usuari ha de conèixer, abans que es comenci a fer el projecte, totes les possibilitats i limitacions de la instal·lació i assumir-les perfectament.

En principi, una instal·lació solar fotovoltaica no té cap límit tècnic quant a potència elèctrica a produir. Només motius econòmics i de rendibilitat poden acotar el nombre de panells i d'acumuladors a instal·lar.

7.1. Demanda energètica

El primer pas serà conèixer/definir els objectius de la instal·lació, atenent les necessitats reals (o no) dels futurs usuaris i les seves demandes particulars.

Hi ha diferents mètodes per al dimensionament d'instal·lacions solars fotovoltaiques: en aquest document desenvoluparem un procés de càlcul basat en l'avaluació de la demanda d'energia diària.

En aquest procediment, tindrem en compte bàsicament els conceptes següents:

- a) Dades d'entrada
 - Característiques de les necessitats a cobrir
 - Energia diària necessària
 - Radiació solar incident

- b) Dades a calcular
- Potència de mòduls necessaris
 - Capacitat i voltatge de l'acumulador
 - Secció de cable necessari
 - Tipus d'equips auxiliars necessaris

En instal·lacions atípiques o molt especialitzades s'analitzen, a més d'aquestes, altres variables com podrien ser l'estacionalitat, el rendiment individualitzat de cada component, les temperatures de funcionament dels equips, etc.

7.2. Necessitats a cobrir

Aquest és el punt de partida del dimensionament d'una instal·lació fotovoltaica, ja que d'aquí partiran tots els càlculs i criteris de disseny dels equips de la instal·lació.

Per tal que el càlcul de consums sigui el més precís possible, determinarem les dades de partida següents:

1. Tipus d'utilització: caps de setmana / diària.
2. Estacionalitat de la utilització: estiu / hivern.
3. Nombre d'usuaris del sistema.
4. Instal·lació actual: producció i subministrament.

Un cop determinades aquestes dades, farem una previsió elaborant una taula de consums tenint en compte la potència i l'ús que es vol fer dels diferents equips o càrregues que alimentarà la instal·lació, segons el valor mitjà diari del consum energètic.

Aquest càlcul pot ser previsible en aplicacions força caracteritzades, com poden ser les instal·lacions de comunicació, tanques elèctriques o il·luminació pública nocturna.

En el cas de l'electrificació rural, l'avaluació del consum energètic és més complexa, perquè sovint es tracta d'habitatges que no disposaven prèviament d'electricitat i, per tant, no hi ha coneixement del consum sinó que caldrà treballar en funció d'una hipòtesi d'hàbits de consum que s'establirà.

A continuació s'indica, mitjançant una taula, el valor més habitual de consum d'alguns equips i electrodomèstics. Aquests valors són útils quan no es disposa de la informació concreta a partir de la placa de característiques o del catàleg del fabricant, i també és útil per fer previsions de consum quan encara no es disposa de l'aparell concret. Aquesta taula està dividida en dues categories, aparells d'ús variable i aparells d'ús continuat:

- **Aparells d'ús variable.** La seva utilització es realitza durant unes hores al dia o la setmana, generalment a voluntat de l'usuari que el connecta i desconnecta quan el fa servir. L'energia que consumeixen al dia és igual al producte de la seva potència expressada en Watts (W) pel temps estimat de funcionament al dia expressat en hores (h).

Taula 7.1. Potència elèctrica d'aparells domèstics d'ús variable. Els valors entre parèntesi, indiquen valors especialment recomanats.

Aparell	Potència [W]	Aparell	Potència [W]
Bombeta incandescència	25 – 100 (60)	Emissora de ràdio	35 – 50
Bombeta de baix consum	9 – 20 (15)	Batedora	200 – 300
Fluorescent	4 – 58 (36)	Extractor de cuina / bany	50 – 70
Bombeta halògena	15 – 300	Vídeo reproductor	30 – 45
Televisor	50 – 150	Planxa	800 – 2000
Radio	10 – 25	Aspirador	300 – 600
Cassette	35 – 50	Ordinador	100 – 150
Tocadiscs	100 – 200	Monitor color	100 – 200
Bomba d'aigua	70 – 500	Impressora	15 – 25
Assecador de cabells	500 – 2000	Mòdem telefònic	15 – 30
Ventilador	25 – 50	Torradora	500 – 1000
Cuina elèctrica	2000 – 7000	Microones	500 – 700
Forn elèctric	1500 – 2500	Espremedor de taronges	30 - 160
Liquadora	200	Batedora	250 - 400
Fregidora	1400 - 2100	Cafetera elèctrica	600 – 1100

- **Aparells d'ús continuat.** Funcionen durant tot el dia o bé les dades de consum disponibles es refereixen a cicles de funcionament, com és el cas de les neveres. L'energia que consumeixen al dia ve donada directament pel fabricant a través dels catàlegs.

Taula 7.2. Energia elèctrica consumida per aparells domèstics d'ús continuat. Tots els consums són diaris tret dels corresponents a rentadores, rentavaixelles i assecadores.

Aparell	Energia [Wh/dia]	Aparell	Energia [Wh/dia]
Ràdio telèfon	150	Amplificador d'antena	152
Rentadora en fred	400 / rentada	Contestador telefònic	400 / rentada
Rentadora 90° 5kg	1800 – 2500 / rentada	Ràdio rellotge	1800 – 2500 / rentada
Rentavaixelles 14 serveis	1300 – 1700 / rentada	Ambientador elèctric	1300 – 1700 / rentada
Assecadora 5 kg	3200 – 3500 / assecat	Espanta mosquits elèctric	3200 – 3500 / assecat
Nevera normal combi de 300 l	1700 - 2500	Nevera normal 300 l	1700 - 2502
Nevera baix consum combi 300 l	800 – 1200	Congelador normal 300 l	800 – 1202
Nevera de baix consum 300 l	100 – 200	Congelador baix consum 250 l	300 – 402

A les instal·lacions fotovoltaïques no es recomana la utilització d'equips amb escalfament elèctric com, per exemple, els forns elèctrics, els microones, els radiadors elèctrics, les rentadores d'aigua calenta, les assecadores, els escalfadors d'aigua elèctrics, etc. Aquests electrodomèstics tenen un elevat consum i hi ha possibilitats de substitució per aplicacions tèrmiques amb millor eficiència energètica global.

D'altra banda, a les instal·lacions fotovoltaïques es recomana utilitzar electrodomèstics de baix consum, ja que, fent-ho així es redueix el consum, i reduïrem la dimensió i la inversió en l'equip fotovoltaic de generació.

7.3. Caracterització dels consums

Per tal d'ordenar la llista d'aparells consumidors amb la seva potència i consum corresponent fem servir una taula de consums que ens permetrà determinar l'energia necessària prevista diària del conjunt d'elements a alimentar.

Consums variables				
Aparell	Nombre d'aparells	Potència (W)	Temps (h/dia)	Energia (Wh/dia)
Bombeta baix c.	4	15	4	240
Bombeta baix c.	3	11	1	33
TV petita	1	75	4	300
Ràdio	1	15	6	90
Planxa	1	800	0,15	120
Ordinador	1	250	1	250
Total consums variables	1.033			
Consums continuats				
Aparell	Nombre d'aparells o serveis	Potència (W)	Temps (h/dia)	Energia (Wh/dia)
Ràdio telèfon	1	15	4	240
Rentadora en fred	0,5	11	1	33
Nevera baix consum	1	75	4	300
Congelador baix cons	1	15	6	90
Total consums continuats	1.350			
Total consums previstos diaris	2.383			

Taula 7.3.

7.4. Energia necessària

Al valor obtingut de la taula representada, el consum diari previst, li aplicarem un factor global de rendiment de la instal·lació fotovoltaica que engloba els autoconsums i rendiments particulars dels elements que la integren: el regulador, l'acumulador i el convertidor cc/ca de manera que el resultat, que anomenem energia necessària, és l'energia bruta que cal produir als 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 que emprarem en els nostres càlculs és de:

1. 0,75 per a instal·lacions amb subministrament en CA.
2. 0,80 per a instal·lacions amb subministrament en CC.

Dividint el valor d'energia requerida pels consums, segons la nostra taula de consums, pel rendiment global, obtenim l'energia necessària que cal subministrar tal i com mostra l'expressió següent.

$$\text{Energia necessària} = \frac{\text{Consum diari previst}}{\text{Rendiment global}}$$

Exemple

Calcular el consum energètic diari per a dimensionar una instal·lació solar fotovoltaica per a l'electrificació d'una masia on viuen 3 persones tot l'any.

A partir de parlar-ne amb els usuaris determinem la llista d'electrodomèstics que utilitzaran i el nivell d'ús de cadascun, que ja reflectim directament sobre la taula de consums següent:

Tindrem en compte que el subministrament de corrent es farà a 220 V_{CA} i, per tant, apliquem un rendiment global de la instal·lació de 0,75 per tal d'obtenir l'energia necessària que cal produir.

$$\text{Energia necessària} = 2.383 \text{ Wh} / 0,75 = 3.177 \text{ Wh.}$$

7.5. Radiació solar disponible

Per al càlcul de la radiació incident utilitzarem els valors indicats a les taules de radiació que ens determinaran l'energia global diària incident, per al lloc, inclinació i orientació que hem determinat. En el cas de l'electrificació autònoma fotovoltaica, el càlcul està encaminat a procurar el màxim autoabastament energètic i, per tant, a l'hora de determinar l'energia de què podem disposar, escollirem les dades del mes de l'any més desfavorable, o sigui, el mes de l'any amb la menor radiació solar global diària disponible.

Per contra, en les instal·lacions amb connexió a xarxa, on el subministrament elèctric està garantit, la inclinació a escollir serà la que optimitzi la producció anual d'electricitat, tret de l'existència de limitadors físics en l'edificació.

Com que els fabricants de mòduls fotovoltaics expressen la potència de generació dels seus productes en watts i, a més, en unes condicions estàndards de radiació de 1.000 W/m² i temperatura de cèl·lula de 25 °C, cal fer un canvi d'unitats per passar dels MJ/m²·dia de les taules de radiació, com en el cas de l'Atlas de Radiació Solar de Catalunya, a kWh/m²·dia, multiplicant el valor indicat a la taula per 0,27, un factor de conversió que fixa la relació que hi ha entre aquestes dues unitats.

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

Un cop es coneix la radiació incident en kWh/m·dia, la dividirem entre la potència de radiació estàndard que s'utilitza per a calibrar els mòduls (1 kW/m²) i obtindrem la quantitat de HSP (hores sol pic) equivalents o nombre d'hores a potència nominal equivalents.

Aquest valor vindria a ésser les hores que hauria de lluir el Sol a intensitat fixa de 1.000 W/m^2 per a produir la mateixa energia que arriba en realitat durant un dia mitjà del mes escollit, en què el Sol varia d'intensitat contínuament al llarg del dia.

$$\text{HSP} = \frac{\text{Radiació segons les taules de radiació}}{\text{Potència estàndard de calibre de panells [1 Kw/m}^2]} = [\text{KWh/m}^2 \cdot \text{dia}] = [\text{h}]$$

Exemple

Determinar les hores sol pic per al càlcul d'una instal·lació solar fotovoltaica en una masia propera a la població de Manresa d'ús diari durant tot l'any.

A partir de les dades de l'*Atlas de Radiació Solar de Catalunya* obtenim que la radiació incident a Manresa amb Azimut 0 per a una inclinació d'ús tot l'any, amb grup electrogen de suport (50°) és de: $11,05 \text{ Mj/m}^2/\text{dia}$.

Aplicant els factors de conversió pertinents, passant aquests valors a $[\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}]$, finalment, obtenim la radiació incident a una inclinació de 50° en HSP.

I observem que el mes de l'any més desfavorable és el desembre amb una radiació solar de 3.07 HSP.

7.6. Nombre de mòduls fotovoltaics necessaris en una instal·lació autònoma

El nombre de mòduls fotovoltaics necessaris 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 saber aproximadament el cost final de la instal·lació.

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

1. Instal·lacions d'ús diari:

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

2. Instal·lacions de cap de setmana:

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

La potència pic del mòdul ens serà subministrada pel fabricant i és una dada que acompanya la referència de model dels fabricants.

El rendiment de camp (η_{camp}) inclou les pèrdues degudes a la brutícia dels mòduls i als efectes negatius que té el fet d'utilitzar mòduls que, inevitablement, a causa dels processos de fabricació, no són exactament d'igual potència (la tolerància o precisió de la mesura ve indicada pel fabricant). En instal·lacions autònomes, aquest rendiment pren normalment valors de 0,70 a 0,80.

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 inexistent i que les pèrdues per brutícia també seran molt petites perquè 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 que, generalment, és el mes de desembre quan es tracta d'electrificacions d'habitatge de residència habitual.

De tota manera, cal considerar les pèrdues relatives al rendiment dels panells pel fet que treballaran fora del punt de màxima potència (voltatge superior al nominal de bateries).

Exemple

Calcular el nombre de mòduls A-120 de 120 Wp necessaris per a produir l'energia elèctrica d'una masia on viuen 3 persones tot l'any segons la taula de consums i les dades de radiació dels exemples dels apartats anteriors.

Aplicant l'expressió anterior obtenim:

$$\text{Nombre de mòduls} = \frac{3.177 \text{ Wh/dia}}{120 \text{ Wp} / \text{mòdul} \times 0,80 \times 3,07 \text{ HSP} / \text{dia}} = 10,78 \text{ mòduls}$$

Arrodonint el resultat obtindríem entre 10 i 12 mòduls A-120, que són nombres parells i ens permetran fer associacions de dos mòduls en sèrie cada una i poder, per tant, treballar al doble de voltatge, totalitzant entre 1.200 Wp i 1.440 Wp de potència de captació.

Si realitzem el càlcul a partir de les intensitats:

$$\text{Intensitat de mòduls} = \frac{3.177 \text{ Wh/dia}}{24 \text{ V} \times 3,07 \text{ HSP} / \text{dia}} = 43,12 \text{ A}$$

Aleshores, com que cada mòdul de 120 Wp ofereix unes intensitats a 1.000 W/m² de radiació i 25 °C de temperatura de cèl·lula de 7,05 A aproximadament, el nombre de grups de mòduls connectats en paral·lel requerits serà de:

$$\text{Nombre de mòduls en paral·lel} = \frac{43,12 \text{ A}}{7,05 \text{ A} / \text{mòdul}} = 6,12 \text{ mòduls en paral·lel}$$

Per tant, quedaria justificat com a millor opció, instal·lar sis grups de mòduls connectats en paral·lel on cada grup estaria format per dos mòduls en sèrie.

7.7. Capacitat de l'acumulador

Al valor obtingut de la taula representada, el consum diari previst, li aplicarem un factor global de rendiment de la instal·lació fotovoltaica que engloba els autoconsums i rendiments particulars dels elements que la integren: el regulador, l'acumulador i el convertidor cc/ca de manera que el resultat, que anomenem energia necessària, és l'energia bruta que cal produir als 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.

La bateria és el magatzem d'energia de la instal·lació fotovoltaica i, 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. A continuació es donen alguns criteris per a determinar-la:

1. En instal·lacions totalment autònomes i de difícil accés (equips de telecomunicacions, boies, etc.), aplicarem tants dies d'autonomia com dies núvols seguits mostrin les estadístiques meteorològiques més properes al lloc d'ubicació (de 7 a 15 dies).
2. Electrificació rural d'ús diari: de 4 a 6 dies. Aquest valor es pot reduir a tres si hi ha un grup electrogen de suport amb engegada automàtica.
3. Electrificació d'habitatges de cap de setmana: de 2 a 3 dies.

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

$$\text{Capacitat de la bateria} = \frac{\text{Energia necessària} \times \text{dies d'autonomia}}{\text{Voltatge} \times \text{Profunditat de descàrrega de la bateria}}$$

En el càlcul tindrem en compte que la profunditat de descàrrega mitjana d'una bateria depèn del tipus emprat:

1. 0,6 a 0,8 (60% a 80%), per a acumuladors estacionaris d'alt volum d'electròlit.
2. 0,4 a 0,5 (40% a 50%), per a acumuladors del tipus monobloc.
3. 0,2 a 0,3 (20% a 30%), per a acumuladors d'arrencada (d'automòbils).

El voltatge de l'acumulador haurà d'ésser escollit de manera que sigui prou elevat com per a obtenir uns corrents de càrrega/descàrrega raonables ($I < 60 \text{ A}$) així com un correcte acoblament amb el voltatge del grup de mòduls fotovoltaics (12, 24 o 48 V).

Exemple

Calcular la capacitat de l'acumulador adient per a la instal·lació de la masia de l'exemple anterior per a una autonomia de 4 dies i emprant bateries estacionàries de darrera generació.

Capacitat d'acumulació = (energia necessària * dies d'autonomia) / (voltatge * profunditat de descàrrega).

$$\text{Capacitat d'acumulació} = (3.177 \text{ Wh/dia} \cdot 4 \text{ dies}) / (24 \text{ V} \cdot 0,8) = 662 \text{ Ah}_{C_{100}}.$$

El subíndex C_{100} indica que aquesta capacitat de bateria serà la subministrada en cicles de descàrrega de 100 hores de durada que és el valor més emprat per a instal·lacions d'electrificació rural.

Un cop definida la bateria cal comprovar que el sistema de generació de corrent, camp de captació, i el sistema d'acumulació, bateria, estan equilibrats per tal d'evitar sulfatacions i envelliment accelerat de la bateria.

Caldrà, doncs, comprovar que la intensitat de càrrega que poden proporcionar els mòduls seleccionats és superior a la mínima intensitat de càrrega suggerida pel fabricant i, per defecte, haurà d'ésser com a mínim el 5% de la capacitat total d'acumulació tal i com suggereixen diferents estudis en laboratoris acreditats.

Exemple

Comprovar la compatibilitat entre bateria i generador fotovoltaic en l'exemple anterior.

El corrent de càrrega que pot proporcionar el camp generador serà igual al producte del nombre de grups de mòduls connectats en paral·lel per la intensitat màxima de cada mòdul en condicions estàndard.

Per tant,

$$\mathbf{I \text{ max.} = 7,05 \text{ A/grup} \times 6 \text{ grups} = 42,3 \text{ A}}$$

Aquesta intensitat de càrrega comporta un percentatge superior al 5% respecte de la capacitat d'acumulació total de:

$$\text{Capacitat de recàrrega (\%)} = 100 \times (I_{\text{max}} / C_{100}) = 100 \times (42,3 \text{ A} / 662 \text{ Ah}) = 6,38\%.$$

Com que el resultat és superior al límit aconsellat donem per vàlida la bateria tenint la tranquil·litat que, en cas de descàrrega important fruit de la baixa insolació, la instal·lació té un bon poder de recàrrega en el moment que surti el Sol.

7.8. Selecció del regulador de càrrega

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 al 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.

$$I_{\max} \text{ del regulador} > 1,10 \times \text{Intensitat màxima del camp de mòduls}$$

Exemple

Escollir el regulador de càrrega adient per a la instal·lació de la masia de l'exemple anterior.

$$I_{\max} \text{ del regulador} > 1,10 \times \text{Intensitat màxima del camp de mòduls}$$

Tenint en compte el muntatge de 10 mòduls de 120 W col·locats en 6 grups connectats en paral·lel i que cada mòdul té una intensitat màxima de treball de 7,05 A segons les especificacions del fabricant, obtenim:

$$I_{\max} \text{ del regulador} > 1,10 \times 6 \text{ grups en paral·lel de mòduls} \times 7,05 \text{ A/grup} \\ = 46,53 \text{ A}$$

Per tant, posaríem un regulador de 50 A a 24 V o bé fraccionaríem el camp en dos subcamps de 3 grups en paral·lel cada un col·locant a cada subcamp un regulador independent de 25 o de 30 A en funció dels valors disponibles en el catàleg del nostre subministrador.

7.9. Dimensionament del convertidor CC/CA

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 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.

Taula 7.4.

Aparell	Número	Potència (w)	Potència total (w)
Bombeta b. consum	4	15	60
Bombeta b. consum	3	11	33
TV petit	1	75	75
Ràdio	1	15	15
Planxa	1	800	800
Ordinador	1	250	250
Ràdio telèfon	1	6	6
Rentadora en fred	1	400	400
Nevera de baix consum	1	200	200
Congelador baix consum	1	350	350
Total potència instal·lada			2189

(suma de la potència nominal de tots els aparells de consum) x 0,75 > P_{convertidor} > (suma de la potència nominal de tots els aparells de consum) x 0,5

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, llavors, aquest aparell ens determinaria la potència mínima del convertidor. En aquest sentit, cal tenir en compte que alguns electrodomèstics que incorporen motor, demanen puntes de potència d'arrencada superiors a les nominals (fins a 4 vegades més). Per exemple, les neveres i també els televisors en color.

Exemple

Escollir el convertidor CC/CA adient per a la instal·lació de la masia de l'exemple anterior.

A partir de la taula de consums determinem el valor total de potència instal·lada en els consums:

Potència del convertidor:

> (suma de la potència nominal de tots els aparells de consum) * 0,5
< (suma de la potència nominal de tots els aparells de consum) * 0,75

Potència del convertidor < 2.189 W * 0,75 = 1.642 W

Potència del convertidor > 2.189 W * 0,5 = 1.094 W

Per tant, muntarem un convertidor de 1.000 o de 1.500 W en funció del rang disponible en catàleg del fabricant escollit.

7.10. Dimensionament del grup electrogen

Per al dimensionament del grup electrogen s'han de tenir en compte els modes de procedir següents:

Quan el grup electrogen alimenti exclusivament l'habitatge, la potència del grup serà, com a mínim, la potència total de l'habitatge. Aquest mode d'operació el podem anomenar "mode d'emergència" perquè l'inversor de la instal·lació fotovoltaica s'ha pogut espatllar 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 de bateries i l'abastament de l'habitatge, realitzant aquesta operació de manera automàtica.

Carregador independent de bateries. En aquest cas el grup electrogen alimenta el carregador i aquest carrega les bateries. El subministrament a l'habitatge 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.

Si s'utilitza la topologia anterior c) a la vegada que es vol donar subministrament a l'habitatge, llavors s'haurà d'implantar un quadre de commutació extern que desconnecti la sortida CA de l'inversor i connecti la derivació CA del grup electrogen a l'habitatge. La potència del grup serà la suma de les potències CA del carregador i de l'habitatge.

Exemple

Escollir el generador per a la instal·lació de la masia de l'exemple anterior.

A partir de la taula de consums, determinem el valor total de potència instal·lada en els consums.

Potència del generador: 2.189 kVA



8. Dimensionament d'instal·lacions fotovoltaïques per a bombament d'aigua

Les tipologies d'instal·lacions de bombament poden ser:

1. **Directes**, quan es comença a generar corrent, la bomba inicia l'extracció d'aigua, variant el cabal extret en funció de la disponibilitat energètica al llarg del dia.
2. **Indirectes**, la bomba funciona a potència nominal el temps adequat per a extreure el volum requerit d'aigua a partir de l'energia acumulada a les bateries.

En qualsevol cas, caldrà conèixer el volum total diari d'aigua requerida per tal d'avaluar -en funció dels rendiments i la radiació disponible- l'energia diària que ha d'aportar el camp solar.

8.1. Caracterització dels consums

Les característiques que defineixen completament els sistemes utilitzats per al bombament queden condicionades pels punts següents:

- Necessitats diàries, mensuals o anuals d'aigua, generalment expressades en metres cúbics.
- Alçada manomètrica total d'impulsió: fondària del pou, més elevació del dipòsit, més pèrdues de càrrega de la canonada.
- Capacitat disponible de la perforació expressada en cabal extraïble, temps d'esgotament i de reposició del nivell.
- Pressió del sistema en superfície, sobretot en sistemes de reg directe.
- Latitud. Zona geogràfica i insolació mitjana diària en les diferents èpoques de l'any.

El consum previst d'un sistema de bombament resultarà generalment d'aplicar ràtios estadístiques en funció de les aplicacions a cobrir: consum domèstic, ramaderia o reg. Per exemple, en consum domèstic es poden aplicar valors diaris de 90 a 150 l/persona.

8.2. Energia necessària per al bombament

En els casos de bombament indirecte caldrà escollir una bomba amb capacitat per a bombar prou cabal com per a extreure el volum total de consum en un temps prudential de funcionament, no superior a quatre hores. La potència nominal de la bomba multiplicada per les hores de funcionament requerides donarà com a resultat l'energia total que demanarà el sistema de bombament.

Al consum requerit per al bombament li aplicarem el rendiment global de la instal·lació:

1. 0,75 (75%) per a instal·lacions amb subministrament en CA.
2. 0,80 (80%) per a instal·lacions amb subministrament en CC.

Dividint el valor d'energia requerida pels consums (de la taula o àbac gràfic de consums) pel rendiment global, obtenim l'energia necessària que cal subministrar puntualment per al màxim rendiment de la bomba, tal i com mostra l'expressió següent:

$$\text{Potència màxima necessària} = \frac{\text{Potència màxima}}{\text{Rendiment del sistema}}$$

Exemple

Calcular la generació i consum energètic diari per al dimensionament d'una instal·lació solar fotovoltaica per al bombament indirecte d'aigua per a una família de 5 membres que utilitzen una bomba en CC de 200 W de potència amb un cabal d'extracció de 350 l/h a una fondària de 20 m.

El consum diari de la família, aplicant una ràtio de 125 l/persona seria de:

$$\text{Vdiari} = 5 \text{ persones} \times 125 \text{ l/persona} = 625 \text{ l}$$

A partir d'aquesta dada trobem el temps de funcionament diari de la bomba expressat en hores.

$$T_{\text{funcionament}} = \frac{\text{Volum}}{\text{Cabal}} = \frac{625}{350} = 1,78 \text{ h}$$

Coneguda la potència de la bomba i el temps de funcionament diari, podem calcular l'energia diària consumida com:

$$E_{\text{consumida}} = \text{Potència} \times T_{\text{funcionament}} = 200 \text{ W} \times 1,78 \text{ h} = 356 \text{ Wh}$$

Si apliquem un rendiment de 0,80 al sistema de producció-emmagatzematge, obtenim finalment que caldrà produir amb els mòduls una energia de:

$$E_{\text{necessària}} = \frac{E_{\text{consumida}}}{\eta} = \frac{356 \text{ Wh}}{0,80} = 445 \text{ Wh}$$

Cal tenir en compte que en el cas dels bombaments d'aigua indirectes, generalment integrats en instal·lacions d'electrificació autònoma, és molt important programar l'engegada de la bomba en horari d'incidència solar per tal de millorar el rendiment del sistema, evitant que gran part de l'energia hagi de sortir de la bateria i fent que directament s'utilitzi en la bomba l'energia que es produeix en el moment.

En el cas dels bombaments directes, sense bateria, el càlcul de necessitats es redueix a trobar el volum d'aigua a consumir i l'alçada total manomètrica, ja que els fabricants d'aquests sistemes donen les dades de potència de bomba i de potència de mòduls en forma d'àbacs gràfics.

8.3. Dimensionament d'equips solars per al bombament directe d'aigua

Tal i com s'ha indicat en l'apartat de càlcul de les necessitats, els bombaments d'aigua indirectes solen estar integrats com un consum més en les instal·lacions autònomes. En canvi, quan l'únic consum que ha de satisfer una instal·lació solar fotovoltaica és el bombament d'aigua, l'opció més eficaç és el bombament directe.

En aquest apartat s'ha seguit la metodologia proposada al *Manual de Bombeo Fotovoltaico* de l'Institut de Energia Solar (IES) i Ingeniería sin Fronteras (1999).

Cal aclarir que aquesta tipologia de bombament no s'utilitza per donar pressió a una xarxa de canonades d'abastament d'aigua potable o de reg, sinó que l'aigua bombada s'emmagatzema en un gran dipòsit situat a una cota superior a la dels punts d'abastament. L'aigua flueix per gravetat per tota la xarxa de canonades.

D'altra banda, a l'hora de dimensionar un sistema de bombament fotovoltaic s'ha de tenir en compte un conjunt de paràmetres que s'engloben en tres blocs:

- a) Paràmetres o dades del volum d'aigua diari, mensual o anual que es necessita en l'aplicació concreta (reg, abastaments a petits nuclis rurals aïllats, etc.).
- b) Dades de radiació solar de l'emplaçament geogràfic de la instal·lació (kWh/m²).
- c) Paràmetres o dades relacionades amb el pou i el dipòsit d'emmagatzematge.

Aquestes dades fan referència a la profunditat del pou, a l'abastament del nivell estàtic de l'aigua del pou, l'alçada del dipòsit respecte del nivell del pou i la longitud total de la canonada que connecta la bomba amb la descàrrega del dipòsit.

En l'esquema següent es mostren, de manera gràfica, els paràmetres anteriors:

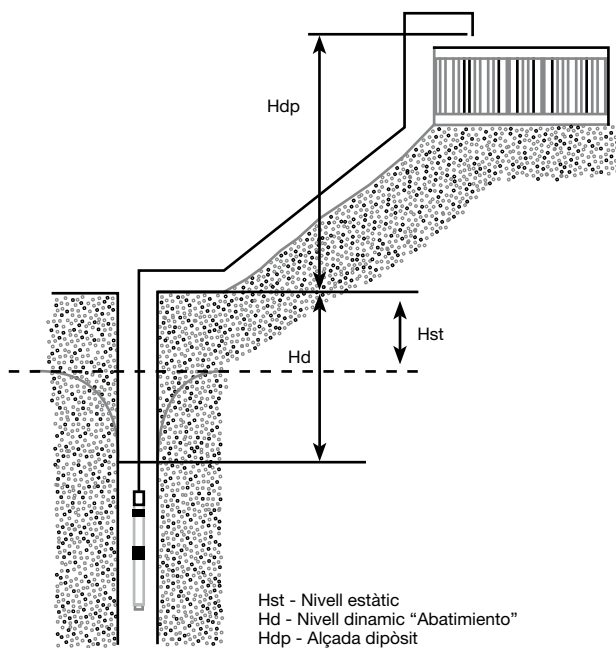


Figura 8.1. Representació gràfica d'un perfil de bombament.

Els sistemes de bombament directe fotovoltaic es dimensionen a partir de gràfics o àbacs que subministra el fabricant del sistema mateix i estan basats en l'experimentació de condicions reals i/o simulacions complexes.

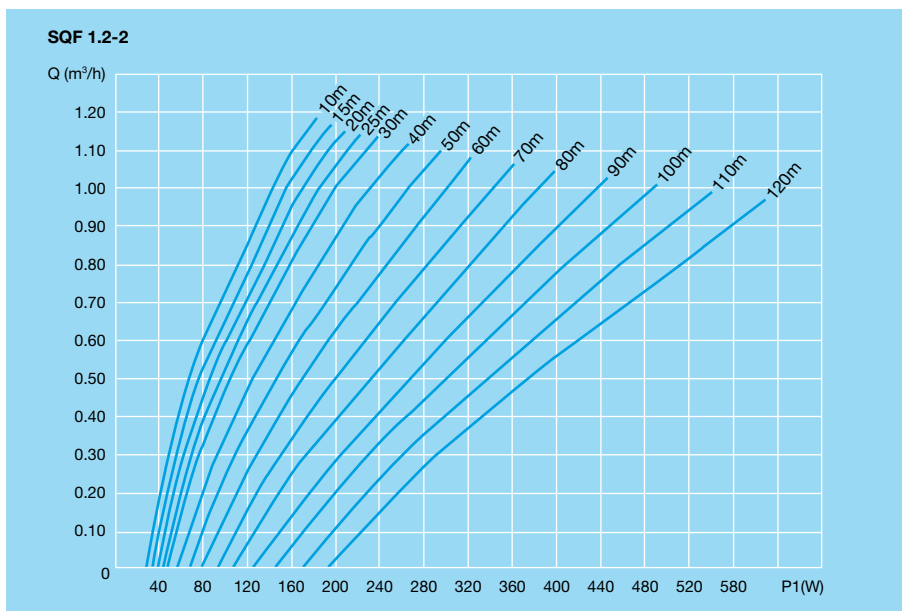


Figura 8.2. Àbac tipus per a la selecció d'equips de bombament directe.

Els àbacs emprats, com el representat a la figura anterior, presenten les dades següents:

- Q: cabal de bombament de la bomba seleccionada (m³/h).
- P₁: potència elèctrica absorbida pel motor de la bomba (W).
- Línies d'alçada total de bombament HT, definida com la suma de les alçades geomètriques del pou i el dipòsit i les pèrdues per fricció de canonades i accessoris H_{fricció}.

$$\mathbf{HT = (H_d + H_{dp} + H_{fricció}) \text{ (m.c.a) [metres columna d'aigua]}}$$

De manera complementària als àbacs dels fabricants, es necessita avaluar la potència hidràulica de bombament (P_H), la potència elèctrica del motor de la bomba (P₁) i la potència elèctrica del generador fotovoltaic (P_{EL}).

$$\mathbf{P_H = 2,725 \times Q \times HT}$$

En què:

P_H, és la potència hidràulica de bombament (W).

Q, és el cabal de bombament (m³/h).

H_T, és l'alçada total de bombament (mca).

La potència elèctrica de la bomba és:

$$\mathbf{P_1 = P_{HT} / \eta_{MB}}$$

En què:

η_{MB}, és el rendiment del motor-bomba.

El rendiment del grup motor-bomba és funció particular de cada fabricant i característiques constructives de l'equip. De l'àbac anterior es pot extreure un rendiment aproximat del grup motor-bomba d'aquest fabricant, tot i que oscil·la entre valors de 0,48 a 0,55. Prendrem el valor més conservador a efectes del dimensionament: 0,48.

Per últim, la potència elèctrica del generador fotovoltaic (P_{EL}) es pot avaluar de la manera següent:

$$\mathbf{P_{EL} = P_{NOM} \times (G/G_{REF}) \times \eta_1 \times \eta_2}$$

En què:

P_{EL}, és la potència elèctrica lliurada pel generador fotovoltaic (W).

P_{NOM}, és la potència nominal del generador fotovoltaic en condicions estàndard de mesurament (CEM) (W_p).

G/G_{REF}, és 0,733 (corresponent a una irradiància mitjana per als mesos d'estiu a Tarragona de 733 W/m²).

η₁, és l'eficiència del generador fotovoltaic.

η₂, és l'eficiència de l'inversor.

L'eficiència del generador fotovoltaic (η_1) té en compte les pèrdues de temperatura, pèrdues de cablejat, dispersió de paràmetres, etc. que, de manera general, s'assumirà que té un valor de 0,86.

L'eficiència de l'inversor (η_2) s'assumeix que és 0,90.

El rendiment global queda establert, de manera general, en:

$$\mathbf{0,88 \times 0,98 = 0,77}$$

Exemple

Dimensionar una instal·lació solar fotovoltaica per al bombament directe amb unes necessitats als mesos d'estiu de 15 m^3 , en una finca de Tarragona.

Dades:

Demanda diària (Q_d) mesos d'estiu: $15 \text{ m}^3/\text{dia}$.

$H_d = 30 \text{ m}$.

$H_{dp} = 19 \text{ m}$.

Long. canonada diàmetre 25 = 100 m .

Inclinació dels mòduls fotovoltaics $\beta = 25^\circ$.

Orientació $\alpha = 0^\circ$.

Radiació ($0^\circ, 25^\circ$) = $6,6 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$.

Com a inici s'avalua el cabal aparent (Q_{AP}), que és un cabal mitjà al llarg del dia, corresponent a la demanda diària. Una bona aproximació basada en l'anàlisi de casos reals és la següent:

$$\mathbf{Q_{AP} = 0,047 \times Q_d}$$

$$\mathbf{Q_{AP} = 0,047 \times 15 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,705 \text{ m}^3/\text{h}}$$

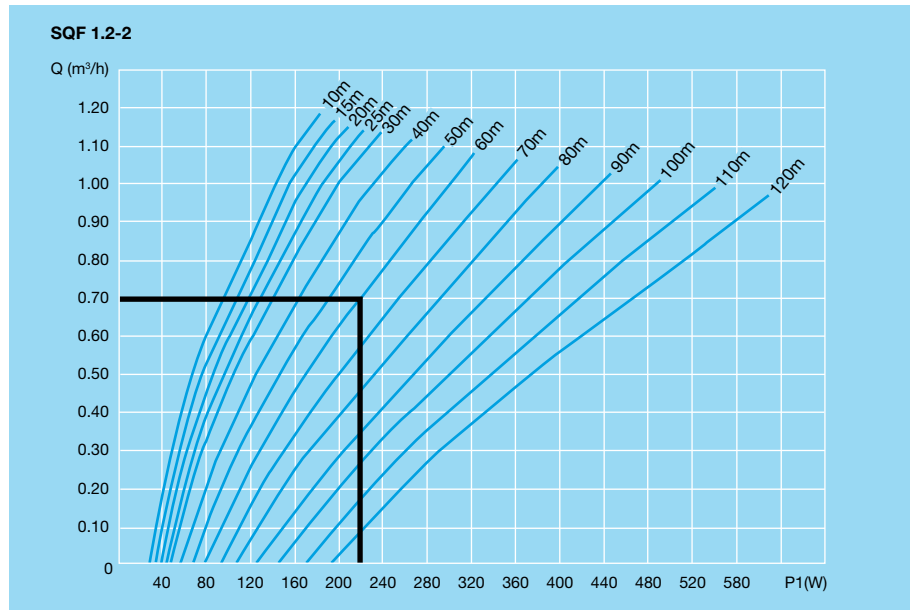
Amb aquest cabal i una canonada de 25 mm de diàmetre interior aquesta té unes pèrdues per fricció de $0,9 \text{ m}/100 \text{ m}$ de canonada.

L'alçada total (HT) serà: $30 \text{ m} + 19 \text{ m} + 0,9 \text{ m} = 49,9 \text{ m}$.

A l'àbac del fabricant de la bomba, es marca una línia horitzontal partint del valor de $0,705 \text{ m}^3/\text{h}$ fins tallar la corba de 50 m; a continuació es traça una línia perpendicular des d'aquest punt fins a l'eix de les potències elèctriques de la bomba (P_1) que dóna un valor de 191 W aproximadament.

A l'àbac de la figura 8.3 es mostra aquest procediment.

Figura 8.3.



Aquesta potència és la que ha d'aportar el generador fotovoltaic, tenint en compte les pèrdues i el fet que la irradiància solar varia al llarg del dia.

Per tant, i aplicant l'expressió analítica anteriorment definida, queda determinada la potència del grup de mòduls fotovoltaics:

$$P_{\text{NOM}} = P_{\text{EL}} / ((G/G_{\text{REF}}) \times \eta_1 \times \eta_2)$$

$$P_{\text{NOM}} = 191 \text{ W} / (0,733 \times 0,77) = 339 \text{ Wp}$$

En el cas d'utilitzar un mòdul de 100 Wp, la quantitat equivalent aproximada necessària per a produir la potència calculada anteriorment serà de:

$$\text{Nombre de mòduls} = 339 \text{ Wp} / 100 \text{ Wp} = 3,39 \approx 4 \text{ mòduls}$$



9. Dimensionament d'instal·lacions fotovoltaïques connectades a xarxa

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

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

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 a la xarxa al llarg de l'any per unitat de potència pic fotovoltaïca instal·lada.

En aquest sentit i basant-se en seguiments empírics d'instal·lacions en servei, es poden establir els valors de 900 a 1.350 kWh anuals per cada kWp instal·lat com un valor realista de la producció estimada quan no hi ha 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 (W_p/m^2) de les dues tecnologies que actualment hi ha disponibles al mercat: el silici cristal·lí i la capa prima.

Tecnologia	Potència específica (W_p/m^2)
Silici mono i policristal·lí	123-151
CIS, CdTe	65-104

Taula 9.1.

D'aquestes dues tecnologies, el silici cristal·lí ha estat i és, actualment, el més estès tot i que les cèl·lules de capa prima (CIS i CdTe) comencen a tenir una important implantació en el sector a causa, principalment, del seu baix cost amb relació al silici cristal·lí.

Exemple

Quina potència màxima es pot instal·lar sobre una coberta inclinada al sud si l'espai útil disponible és de 5 x 4 m.

El càlcul correcte es faria en funció no només de la superfície total sinó també de la geometria descrita i de les dimensions reals del mòdul a emprar, però, com a dada aproximativa, podem calcular:

$$P_{\text{instal·lable}} (\text{Wp}) = S (\text{m}^2) \times P_{\text{específica}} (\text{Wp/m}^2)$$

Els resultats es mostren a la taula següent per a la superfície $S = 20 \text{ m}^2$.

Taula 9.2.

Tecnologia	Potència específica (Wp/m ²)	Potència a instal·lar (Wp)
Silici mono i policristal·lí	123 – 151	2.460 – 3.080
CIS, CdTe	65 – 104	1.300 – 2.080

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

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

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.

Exemple

Calcular la potència de convertidor requerit en la instal·lació de l'exemple anterior.

Aplicant l'expressió comentada obtenim:

$$\text{Silici policristal·lí } P = 2.460 \text{ Wp} / 1,25 = 1.968 \text{ W}$$

$$\text{Capa prima } P = 1.300 \text{ Wp} / 1,25 = 1.040 \text{ W}$$

Per tant, en aquest cas buscaríem algun model al mercat de 2 kW i 1 kW de potència nominal, respectivament.

Pel que fa a la qüestió del cost (inversió), per 1 kWp de plaques solars amb connexió a la xarxa elèctrica amb estructura fixa, cal comptar entorn de 6.000€ en instal·lacions de fins a 5 kWp, que baixa cap els 5.000€ en sistemes de més potència i on no calgui obra civil important per a fer la col·locació.

Si tenim en compte una capacitat de generació mitjana entorn de 1.000 kWh/any per cada kWp, encara que es mantinguin les actuals bonificacions, i sense tenir en compte ni despeses de finançament, ni de manteniment, ni assegurances, ni altres incentius, el període per amortitzar la inversió realitzada és entre 8 i 12 anys. Aquest termini es pot veure reduït fins a un 30% en els propers anys.

Una de les fórmules que fan més interessants les instal·lacions solars fotovoltaïques connectades a la xarxa és la seva capacitat d'integració arquitectònica que ofereix els avantatges següents:

1. Substitueix elements constructius convencionals, cosa que millora el període d'amortització.
2. No hipoteca la utilització de sòl en zones amb molta pressió urbanística, a les ciutats.
3. Elimina el rebuig per raons estètiques.
4. Pot cobrir altres necessitats de l'edifici, d'ombra, de preescalfament d'aire de calefacció, etc.

9.1. Dimensionament d'una instal·lació

Es vol instal·lar sobre la coberta inclinada d'un habitatge, a la ciutat de Barcelona, una instal·lació fotovoltaïca connectada a xarxa de baixa tensió i amb una potència nominal de 5 kW (és la potència de l'inversor). L'orientació d'aquesta coberta és al sud ($\alpha = 0^\circ$) i la seva inclinació és de $\beta = 15^\circ$. No hi ha ombres sobre la coberta.

El fabricant dels equips que es volen muntar ha suggerit, en cas que la coberta de l'habitatge disposi d'espai suficient, la configuració bàsica següent de la instal·lació, definida per la potència del generador fotovoltaïc i la potència de l'inversor corresponent:

Potència generador fotovoltaïc en CC: 6,12 kWp
Potència de l'inversor en CA: 5 kW

Les característiques del mòdul fotovoltaïc que es vol instal·lar són aquestes:

Paràmetres del mòdul	Valor
V_{oc} STC	44.4 V
I_{sc} STC	5.27 A
V_{pmp}	35.5 V
I_{pmp}	4.79 A
Potència P_{mpp} (Wp)	170 Wp

Taula 9.3.

El nombre de mòduls fotovoltaïcs que conformen el generador de 6,12 kWp serà doncs de 36 unitats que s'hauran de configurar elèctricament de manera que els paràmetres de tensió i intensitat s'ajustin als rangs d'entrada de l'inversor. A l'apartat de Càlcul de l'aparellatge elèctric d'aquest exemple es descriu de manera detallada aquest ajustament de paràmetres.

D'altra banda, cal observar que la potència del generador fotovoltaïc és superior a la potència de l'inversor per tal que aquest treballi al màxim de la seva potència nominal la major part del temps.

Amb caràcter general, el sobredimensionament del generador fotovoltaïc és d'un 20 a un 30% més gran que la potència de l'inversor, és a dir:

$$P_{GFV} = (1,2 \text{ a } 1,3) \cdot P_{INV}$$

9.2. Radiació solar disponible

Les dades de radiació solar per als càlculs de qualsevol sistema solar fotovoltaic s'han d'obtenir d'entitats o organismes acreditats. En el cas de Catalunya, s'haurà de consultar l'*Atlas de Radiació Solar de Catalunya*, edició 2000, elaborat per l'Institut Català d'Energia (ICAEN).

A partir d'aquest document busquem una de les estacions de mesurament més properes al lloc d'ubicació de la instal·lació i prenem les dades de la radiació solar global diària. Una vegada s'ha determinat l'orientació i la inclinació del generador fotovoltaic escollim la taula que s'ajusti més a aquests valors. En la columna "inclinació" de la taula prenem la fila corresponent a la inclinació del generador i obtenim els valors de radiació solar global diària a la inclinació escollida de cada mes de l'any i la mitjana diària anual. Utilitzarem aquest últim valor, la mitjana diària anual, per a la realització del càlcul energètic.

Iniciant l'exemple, si introduïm el valor de $\beta = 15^\circ$ en la taula de radiació de Barcelona amb Orientació 0° ($\alpha = 0^\circ$), obtenim:

$$\begin{aligned} G_{da} &= 16,78 \text{ MJ} / \text{m}^2 \text{ dia} = 4,66 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ dia} \\ G_a &= 4,66 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ dia} \times 365 \text{ dies} = 1.701,3 \text{ kWh} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

Aquest valor correspon a la radiació mitjana anual en la superfície de la coberta, que és la mateixa que en la superfície del generador fotovoltaic (energia incident).

9.3. Pèrdues dels components

Generador fotovoltaic

Les pèrdues en els mòduls fotovoltaics, de manera resumida, són degudes als efectes de la temperatura (a més temperatura, menys rendiment), i a la brutícia del vidre (pols...). Aquestes pèrdues poden adoptar un valor entorn del 9% (rendiment restant, 0,91).

Inversor

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

Cablejat i dispersió de paràmetres

En aquest cas és molt normal establir unes pèrdues del 5% (rendiment, 0,95).

Interrupcions de servei

Es refereix al coeficient de funcionament real de la instal·lació fotovoltaica, descomptant les aturades del sistema per valors fora de rang o problemes a la xarxa, etc. Aquest coeficient pot assumir un valor del 0,93 (és a dir, que 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 fotovoltaica connectada a xarxa.

$$\mathbf{PR = 0,91 \times 0,92 \times 0,95 \times 0,93 = 0,74}$$

9.4. Càlcul de la producció energètica

La fórmula que proporciona l'energia elèctrica injectada a la xarxa en un any és:

$$\mathbf{E_{AC} = P_{GFV} \cdot (G_{da} / G^*) \cdot FS \cdot PR}$$

En què:

E_{AC} , és l'energia anual injectada a xarxa (kWh).

P_{GFV} , és la potència pic del generador fotovoltaic (kWp).

G_{da} , és la radiació anual (kWh/m²).

G^* , és la irradiància estàndard (1.000 W/m²).

FS, és el factor d'ombres.

PR, és el rendiment global de la instal·lació.

Continuant amb l'exemple, la fórmula anterior queda de la manera següent:

$$\mathbf{E_{AC} = 6,12 \text{ kWp} \cdot (1701,3 \text{ kWh/m}^2 / 1 \text{ kW/m}^2) \cdot 1 \cdot 0,74}$$

$$\mathbf{E_{AC} = 7.704,8 \text{ kWh / any}}$$

Caldrà aclarir alguns aspectes relacionats amb el resultat anterior i són els següents:

En el cas d'haver-hi ombres sobre el generador fotovoltaic, aquestes s'avaluaran pel mètode establert al CTE-HE 5 i el percentatge de pèrdues anual (en percentatge) s'afegirà a FS com a coeficient: 8% de pèrdues anuals d'ombres → FS = 0,92.

Un segon aspecte important és la potència real del mòdul respecte de la declarada pel fabricant al seu certificat. A falta d'experiència real convé tenir en compte unes pèrdues per aquest concepte i que podrien ser del 5% (potència real, 0,95).

Continuant amb l'exemple de càlcul, si hi afegim les pèrdues d'ombres i les de potència del mòdul, la producció calculada serà:

$$\mathbf{E_{AC} = 7.704,8 \cdot 0,92 \cdot 0,95 = 6.734 \text{ kWh/ any}}$$

9.5. Càlcul de l'aparellatge elèctric

Secció dels conductors elèctrics des de mòduls fins a l'entrada de l'inversor

En aquest punt del procés de dimensionament cal fer la configuració elèctrica del generador fotovoltaic, és a dir, definir el nombre de mòduls fotovoltaics en sèrie (això estableix els voltatges V_{oc} i V_{mpp} d'entrada a l'inversor) i el nombre de sèries en paral·lel (això estableix la intensitat I_{mpp} total del corrent elèctric del generador fotovoltaic a l'entrada a l'inversor). Cal tenir cura que els valors d'aquests paràmetres estigui dins el rang de funcionament de l'inversor.

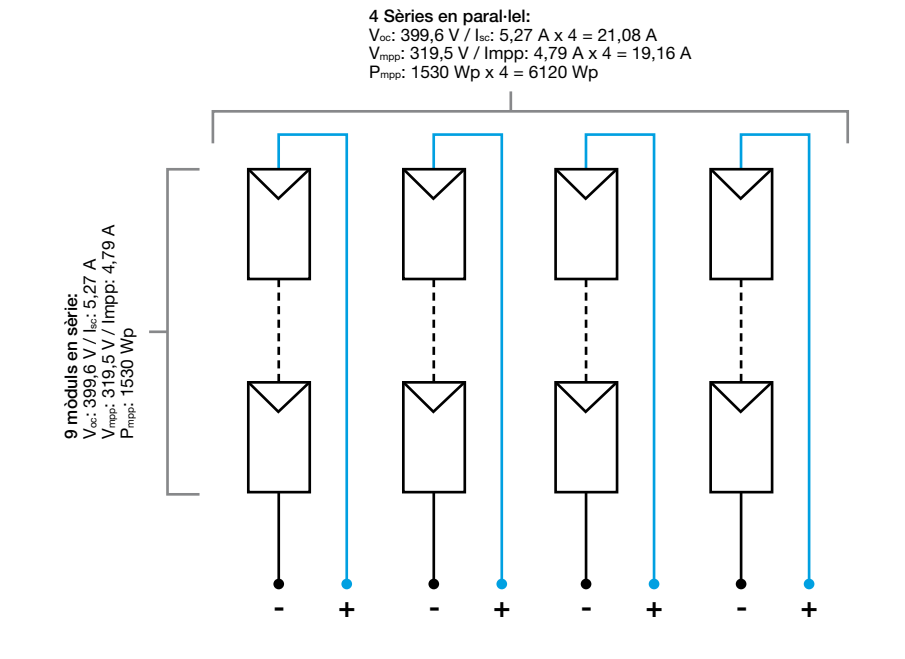
En el nostre exemple s'utilitza un inversor comercial monofàsic de 5 kWn de potència en CA amb les característiques elèctriques següents d'entrada CC:

Taula 9.4.

Paràmetres de l'inversor	Valor
Potència de connexió CC	4.600 - 6.700 Wp
Rang de voltatge de MPPT	150 - 400 Vcc
Màxima tensió d'entrada	530 Vcc
Nombre d'entrades CC	5
Intensitat màxima total d'entrada (40°C)	35,8 A

Com que el nombre de mòduls fotovoltaics és de 36, la configuració elèctrica del generador fotovoltaic queda determinada tal i com es mostra a la figura següent:

Figura 9.1. Configuració del camp fotovoltaic.



Aquesta configuració compleix els paràmetres de l'inversor en CC tal i com es mostra a continuació:

$V_{oc} < 530 V_{cc}$ (màx. tensió de l'inversor)
 $I_{mpp} \text{ total} < 35,8 A$ (màx. intensitat de l'inversor)
 $150 V < 319,5 V_{mpp} < 400 V$ (rang de voltatge de MPPT)

Una vegada definits els paràmetres de tensió i intensitat de cada sèrie de mòduls, es procedeix a calcular la secció dels conductors elèctrics que connecten els panells amb l'inversor. Assumirem que, per a l'exemple de càlcul, la longitud del tram simple, des del grup més llunyà de 9 mòduls fins a l'entrada de l'inversor, és de 25 m. Aquest tram discorre per la façana lateral de l'habitatge fins a l'arribada a l'inversor i, per tant, anirà protegit amb tub plàstic de PVC o similar.

Aplicant les equacions de la secció de conductors per a corrent continu en funció de la intensitat I_{mpp} de la sèrie tenim el resultat següent:

Long (m)	I_{mpp} (A)	V_{mpp} (V)	C.D.T (%)	$S_{càlcul}$ (mm ²)	$U_{càlcul}$ (V)	S_{triada} (mm ²)	U_{triada} (V)
25	4,79	319,5	1,5	0,89	1,07	4	0,33

Taula 9.5.

A continuació es fan els comentaris següents relacionats amb el resultat anterior:

- La secció calculada ($S_{càlcul}$) és de 0,89 mm² amb una cdt (caiguda de tensió) d'1,07 V i, no obstant això, s'hauria de triar la mínima secció normalitzada que és d'1,5 mm². En canvi s'ha triat una secció (S_{triada}) de 4 mm² per homogeneïtzar-la amb la secció dels dos cables conductors del mòdul fotovoltaic amb què vénen equipats de fàbrica. Aquesta secció té una cdt de 0,33 V, que és dins el rang establert.
- Amb aquesta secció triada (4mm²) de cable s'ha de comprovar que la intensitat de 4,79 A sigui inferior a la màxima intensitat assolible pel conductor segons el REBT, ITC BT 19 (taula 1, fila B, columna 9), per a conductors unipolars protegits amb tub i instal·lats en superfície. En aquest cas, compleix amb seguretat: 4,79 A < 34 A (taula 1 ICT BT-19).

9.6. Dispositius de protecció de CC

Fusibles

La utilització dels fusibles a la part CC de la instal·lació fotovoltaica permet el seccionament i desconnexió del camp fotovoltaic de l'inversor per raons de manteniment o reparació. Cal aclarir que els fusibles no són dispositius de seccionament amb càrrega, és a dir, no es poden utilitzar per a desconnectar el generador fotovoltaic de l'inversor quan aquest està connectat i injectant a xarxa, ja que aquesta acció provocaria un arc elèctric en el fusible amb el perill de cremades i incendi.

Per tant, el seccionament del generador fotovoltaic amb els fusibles solament es pot realitzar quan l'inversor ha estat desconnectat prèviament de la xarxa per l'inter ruptor automàtic de CA de sortida de l'equip.

Càlcul del fusible:

$$I_B = 4,79 \text{ A (intensitat de la sèrie o string)}$$

$$I_Z = 34 \text{ A (màxima intensitat del conductor)}$$

$$I_N = 10 \text{ A (intensitat nominal del fusible seleccionat)}$$

Si s'aplica la primera condició de protecció de conductors, $I_B \leq I_N \leq I_Z$, es veu que el fusible seleccionat la compleix.

A continuació es verifica el criteri de protecció dels fusibles gG:

$$I_f \leq 1,60 I_N \rightarrow I_f = 1,60 \cdot 10 \text{ A} = 16 \text{ A}$$

Es calcula la segona condició de protecció:

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z \rightarrow I_2 = 1,45 \cdot 34 \text{ A} = 49,3 \text{ A}$$

Per últim, es comprova que la intensitat de protecció del fusible (I_f) és inferior o igual a la intensitat de la segona condició de protecció (I_2), és a dir:

$$I_f \leq I_2$$

$$16 \text{ A} \leq 49,3 \text{ A}$$

S'observa que el fusible seleccionat ($I_N = 10 \text{ A}$) compleix el requisit de protecció del conductor.

Protecció contra sobretensions de CC (varistors)

Els protectors contra sobretensions transitòries (d'origen atmosfèric) són dispositius que limiten les tensions atmosfèriques (descàrrega de llamp) que poden arribar als equips electrònics de la instal·lació (inversors) perquè no se sobrepassin uns valors màxims de seguretat. Aquests valors oscil·len entorn d'1,2 kV a 1,5 kV.

Atès que no hi ha un únic dispositiu que protegeixi de manera eficaç els equips electrònics, s'opta per la utilització de diferents dispositius de protecció esglaonats i cadascun amb un nivell de protecció específic en funció de la seva ubicació en la instal·lació i del tipus d'equip a protegir.

En l'exemple de dimensionament de la instal·lació fotovoltaica s'instal·larà, com a mínim, un protector de CLASSE II, o tipus II, ja que és el protector que cobreix el ventall de riscos més ampli. Un protector d'aquesta categoria haurà de complir els requisits tècnics de protecció següents:

Característiques tècniques d'un protector classe II	
Tensió màxima de servei U_c	600 Vcc
Nivell de protecció U_p	$\leq 1,2-1,5$ kV
Corrent nominal de descàrrega I_n	20 kA (8/20)
Corrent màxima de descàrrega I_{max}	40 kA (8/20)

Taula 9.6.

La tensió màxima de servei (U_c) del protector haurà de ser superior a la màxima tensió de circuit obert del generador fotovoltaic (V_{oc}) en un dia fred d'hivern i a la màxima radiació incident.

La ubicació d'aquest protector serà dins el quadre de proteccions de CC de la instal·lació i la seva missió serà protegir l'inversor en el costat de CC.

En el cas que la nostra instal·lació estigués ubicada en una zona geogràfica rural, aïllada o muntanyosa, s'hauria d'implantar la protecció anterior amb una nova protecció de capçalera, CLASSE I, instal·lada a la sortida del camp fotovoltaic. Aquesta protecció té la funció d'eliminar, derivant-los a terra, corrents elèctrics elevats procedents de llamps amb forta intensitat i que superarien la capacitat de protecció del dispositiu CLASSE II.

9.7. Secció dels conductors elèctrics des de l'inversor al punt de connexió

Se suposa que la longitud del tram simple des de l'inversor fins al punt de connexió és de 10 m. Aquest tram discorre per la zona interior i anirà protegit per tub o canal.

D'altra banda, la cdt d'aquest tram serà de, com a màxim, l'1,5% i s'haurà de dimensionar per al 125% de la màxima intensitat de l'inversor (ITC-BT-40).

Aplicant les equacions de la secció de conductors per a corrent continu, tenim el resultat següent:

Long (m)	I (A)	$I \times 1,25$ (A)	CA (V)	c.d.t (%)	$S_{càlcul}$ (mm ²)	S_{triada} (mm ²)	U_{triada} (V)
10	20	25	230	1,5	2,81	10	0,97

Taula 9.7.

S'ha escollit una secció de 10 mm² per a fer-la homogènia amb la secció del tram que discorre des de les proteccions de connexió fins al mateix punt de connexió. Aquesta secció és la mínima acceptada per la companyia distribuïdora.

La I_{max} admissible del conductor de 10 mm² per a instal·lació superficial i amb tub protector i dos conductors unipolars és de 50 A (ITC BT 19 taula 1, Fila B). Per tant, el conductor seleccionat compleix la intensitat de l'inversor.

El tipus de conductor serà RZ 0,6/1 kV Cu, de doble aïllament.

9.8. Dispositius de protecció de CA

Interruptor automàtic de CA de l'inversor

Aquest dispositiu permet el seccionament amb càrrega de l'inversor alhora que protegeix contra sobrecàrregues i curtcircuits de la instal·lació.

Se selecciona un interruptor automàtic magnetotèrmic de tall bipolar, amb una intensitat nominal I_N= 25 A que compleix la primera condició de protecció contra sobrecàrrega:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \rightarrow (20A \leq 25A \leq 50A)$$

A continuació es comprova la segona condició de protecció que la intensitat de disparament per curtcircuit estigui per sota de la intensitat màxima que suporta el cable:

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z \rightarrow I_2 = 1,45 \cdot 50 A = 72,5 A$$

La condició de l'interruptor automàtic és:

$$I_2 \leq 1,45 I_N \rightarrow I_2 = 1,45 \cdot 20 A = 29 A$$

Per tant, l'interruptor seleccionat compleix les condicions de protecció de sobrecàrregues del conductor.

El poder de tall de l'interruptor automàtic serà de, com a mínim, la intensitat màxima de curtcircuit en el punt de la instal·lació on s'ubica. En l'exemple de càlcul, el dispositiu tindrà un poder de tall mínim de 6kA.

Interruptor diferencial, ID

Aquest dispositiu de protecció contra els contactes indirectes provocats per defectes de la instal·lació de CA ha de tenir una sensibilitat de I_{ΔN}= 30 mA, com a màxim i una intensitat nominal I_N= 40 A o d'una intensitat superior a la màxima que circula pel conductor.

Interruptor de control de potència, ICP

L'interruptor de control de potència de l'exemple es podrà seleccionar amb un valor màxim del 130% de la potència de generació de l'inversor, és a dir:

$$I_{ICP} = 1,30 \cdot I = 1,30 \cdot 20A = 26 A \text{ (màxim)}$$

Per tant, se selecciona un ICP de 25 A.

El poder de tall (kA) d'aquest dispositiu serà superior a la potència de curtcircuit establerta, al punt de connexió, per l'empresa distribuïdora.

Fusibles del punt de connexió

Per al seu dimensionament s'aplica el mateix procediment que en el cas de CC, tenint en compte que el poder de tall (kA) del dispositiu en aquesta part de la instal·lació ha de ser superior a la potència de curtcircuit establerta, al punt de connexió, per l'empresa distribuïdora.

Per a l'exemple se selecciona un fusible de tipus gG amb $I_N = 32$ A.

Comptador de l'energia elèctrica

El comptador de l'energia elèctrica de l'exemple serà un comptador electrònic bidi-reccional monofàsic (230V_{ca}, 50Hz) de lectura directa de l'energia activa (kWh) en ambdós sentits.

La seva classe de lectura serà CLASSE 2 o superior i d'una intensitat o CALIBRE de 10(60) A.

El comptador anirà ubicat en un mòdul de doble aïllament i amb possibilitat de ser precintat per la companyia distribuïdora.

9.9. Presa de terra

La presa de terra de la instal·lació fotovoltaica serà un terra diferent del terra del neutre de la companyia distribuïdora, és a dir, un terra independent.

Una vegada seleccionat el punt on s'ubica la javalina de terra, es fa la mesura de la resistència. Aquesta haurà de ser inferior a:

$$R_t = V / I$$

En què:

V, equival a 24 V, la tensió de defecte en locals humits i terres conductors.

I, és una intensitat del defecte equivalent a la d'actuació del dispositiu de protecció diferencial (30 mA).

$$R_t = 24 \text{ V} / 0,03 \text{ A} = 833,33 \text{ } \Omega$$

Cal aclarir que, a la part CA de la instal·lació, és on hi ha el dispositiu de protecció diferencial (ID). A la part CC, és a dir, als mòduls fotovoltaics, la protecció de defectes serà mitjançant el vigilant del control d'aïllament, ja que els dispositius diferencials utilitzats normalment a les instal·lacions de CA no funcionen per a defectes de CC.

Per tal d'assegurar una bona terra de protecció, convé obtenir mesuraments entorn de 7 a 10 Ohms, ja que aquests valors poden variar i, de fet ho fan, amb el nivell d'humitat del terreny en èpoques de l'any diferents a les que s'ha realitzat el mesurament.

Caldrà, no obstant, tenir en compte el que s'estableix a les ITC-BT-18 i ITC-BT-40 del REBT.

