

Treball de recerca

# L'energia solar fotovoltaica

2n de Batxillerat

Institut del Voltreganès

Curs 2011-2012

Les Masies de Voltregà, 27 de setembre de 2011



**“ A LLARG TERMINI, LA HUMANITAT NO TÉ ALTRE ALTERNATIVA  
QUE UTILITZAR L'ENERGIA SOLAR SI VOL SOBREVUIRE ”**

Hanz Ziegler, científic nuclear alemany (meitat del s. XX)

# Agraïments

Aquest treball no hagués pogut ser possible sense l'ajuda de les meves tutores, Dolors Vila Serra i Anna Folch Albareda, per l'assessorament i l'orientació durant la realització del treball, al Dr. Miquel Caballeria Suriñach, doctor en Ciències Físiques i professor de l'UVic, per facilitar-me informació i pel programa informàtic, al Sr. Oriol Güell Rosset, de ICF Equipaments, per facilitar-me les dades tècniques necessàries de la instal·lació fotovoltaica de l'Institut del Voltreganès, a l'Institut del Voltreganès per facilitar-me les dades del consum energètic de l'institut, a la família Trabal Sola per deixar-me el seu terrat per tirar les fotos a la instal·lació i a la meva família per ajudar-me durant tot el procés de realització d'aquest treball.

# ÍNDIX GENERAL

Justificació .....	6
0. Introducció .....	7
1. L'energia solar fotovoltaica .....	8
1.1. Una mica d'història .....	8
1.2. Situació actual .....	8
1.2.1. Normativa vigent .....	10
1.3. Com funciona? .....	12
1.3.1. El Sol .....	12
1.3.2. L'efecte fotovoltaic .....	13
1.3.3. Les cèl·lules fotovoltaïques .....	13
1.4. Tipus d'instal·lació .....	17
1.4.1. Instal·lacions autònomes .....	17
1.4.2. Instal·lacions connectades a la xarxa elèctrica .....	18
1.4.3. Instal·lacions híbrides .....	18
1.5. Elements de les instal·lacions .....	19
1.6. Avantatges i desavantatges .....	21
1.7. Impacte ambiental de l'energia fotovoltaica .....	22
2. Previsió de la producció elèctrica d'una instal·lació real .....	24
2.1. Instal·lació fotovoltaica de l'Institut del Voltreganès .....	24
2.2. Irradiació .....	26
2.2.1. Paràmetres .....	27
2.2.2. Resultats .....	35
2.3. Càlcul de la producció .....	36
2.4. Anàlisi de dades .....	38
3. Conclusió .....	42
4. Bibliografia .....	43
5. Annexos .....	46
5.1. Annex I: Mapes d'irradiació de Catalunya .....	46
5.2. Annex II: Procediment del càlcul d'energia .....	53
5.3. Annex III: Índex de figures .....	56
5.4. Annex IV: Glossari .....	58

# Justificació

Hi ha diversos motius pel qual he triat fer un estudi sobre l'energia solar fotovoltaica. Un d'ells és que crec que serà una font d'energia renovable molt important en un futur no gaire llunyà, ja que cada vegada més la població mundial està més sensibilitzada sobre el canvi climàtic i la necessitat de produir energia sense generar residus ni gasos contaminants, i perquè també saben que el petroli no durarà per sempre.

Un altre motiu és la meva curiositat a aprendre més coses sobre aquest tema, ja que sempre n'havíem parlat, però mai l'havíem estudiat a fons. Sabia que volia fer el treball de recerca sobre alguna energia renovable, però no sabia quina, i quan vaig saber que a l'institut instal·laven plaques solars, de seguida em vaig interessar en aprofundir-hi.

# 0. Introducció

Es consideren renovables les energies que utilitzen recursos naturals que es renoven constantment, com la força del vent (eòlica) o de l'aigua (hidràulica), la radiació del sol (solar), o la calor de les capes profundes de la Terra (geotèrmica), entre altres. També, s'acostuma a incloure en l'àmbit de les energies renovables les tecnologies d'estalvi del consum energètic.

Malgrat que aquestes energies han estat conegudes i utilitzades pels humans des de temps immemorials, pràcticament era la única font d'energia de la humanitat fins la revolució industrial, el seu descobriment data de fa tan sols unes dècades. Coincidint amb les crisis del petroli dels anys 1973 i 1979, els governs dels països més dependents del petroli van fer una mirada de complicitat cap a les velles fonts d'energia. Es busquen alternatives autòctones al petroli per ajudar a satisfer la demanda social cada vegada més exigent en favor d'un entorn mediambiental més saludable.

El ressorgir de les energies renovables i la seva posterior expansió té molt a veure amb la potencialitat d'aquestes fonts per resoldre els principals problemes del model energètic vigent, que són bàsicament el caràcter finit i la concentració geogràfica dels recursos, la inseguretat de l'abastament i l'impacte mediambiental. Davant d'això, les fonts d'energia renovable semblen ser la solució perfecta. Són inesgotables, estan àmpliament distribuïdes per tot el planeta, són autòctones, netes, no depenen exclusivament de la infraestructura de transport d'energia, afavoreixen el desenvolupament econòmic local i creen treball.

En aquest treball em centraré en estudiar i aprofundir en el coneixement de l'energia fotovoltaica i calcular, d'una manera aproximada, la producció d'energia durant tot un any de la instal·lació fotovoltaica de l'Institut del Voltreganès a partir de les dades meteorològiques i tècniques de la instal·lació.

Jo em pregunto si aquesta energia produïda serà suficient per cobrir la demanda energètica de l'institut o cobriria el 10%, 40% o 80%, ja que crec que és important saber si estalviariem d'emetre quilos o tones de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera. Per tant, la hipòtesi del meu treball és:

Les plaques instal·lades sobre l'edifici de l'Institut del Voltreganès podrien proporcionar l'energia elèctrica suficient per cobrir la demanda elèctrica de l'Institut del Voltreganès de tot un any.

# 1.L'energia solar fotovoltaica

## 1.1. Una mica d'història

El nom fotovoltaic prové de la unió del terme grec *photo* (llum) i *voltaic* (electricitat) en honor al físic italià Alessandro Volta. L'efecte fotovoltaic va ser descobert l'any 1839 pel físic francès Alexandre-Edmond Becquerel, qui va observar que en exposar determinats materials a la llum solar es produïa un corrent elèctric. En el 1904, Albert Einstein publica el seu treball sobre l'efecte fotovoltaic, que en el 1921 guanya un premi Nobel de Física sobre les seves teories que l'expliquen. En la pràctica, el desenvolupament científic i tecnològic dels dispositius fotovoltaics comença en els anys 50 del segle passat amb el naixement de les tecnologies dels semiconductors i l'electrònica, així com la carrera espacial i les necessitats del subministrament d'energia elèctrica dels primers satèl·lits. El primer dispositiu fotovoltaic fou desenvolupat pels laboratoris Bell en el 1954 amb un rendiment del 6% i ja el primer satèl·lit del tipus *Vanguard* (*Vanguard D*) llançat dos anys més tard, comptava amb un generador fotovoltaic per alimentar la seva ràdio. Actualment, els satèl·lits cobreixen les seves necessitats energètiques gràcies a l'energia fotovoltaica ja que pesa poc i no necessita combustible.

Gràcies als excedents de la indústria aeroespacial, les cèl·lules fotovoltaïques es van començar a utilitzar per espais aïllats de la xarxa elèctrica, com senyalització d'autopistes. Però no va tenir gaire sortida, ja que els costos eren massa elevats, fins que la crisi del petroli del 1973 va fer que els investigadors busquessin baixar el preu.

La producció mundial en l'any 2000 de dispositius fotovoltaics va ser superior als 200 MW i aquesta producció es dedica en la seva quasi totalitat a aplicacions terrestres, gràcies en part la superació de reptes tecnològics que han aconseguit en aquests anys reduir el cost dels dispositius fotovoltaics i augmentar el rendiment.

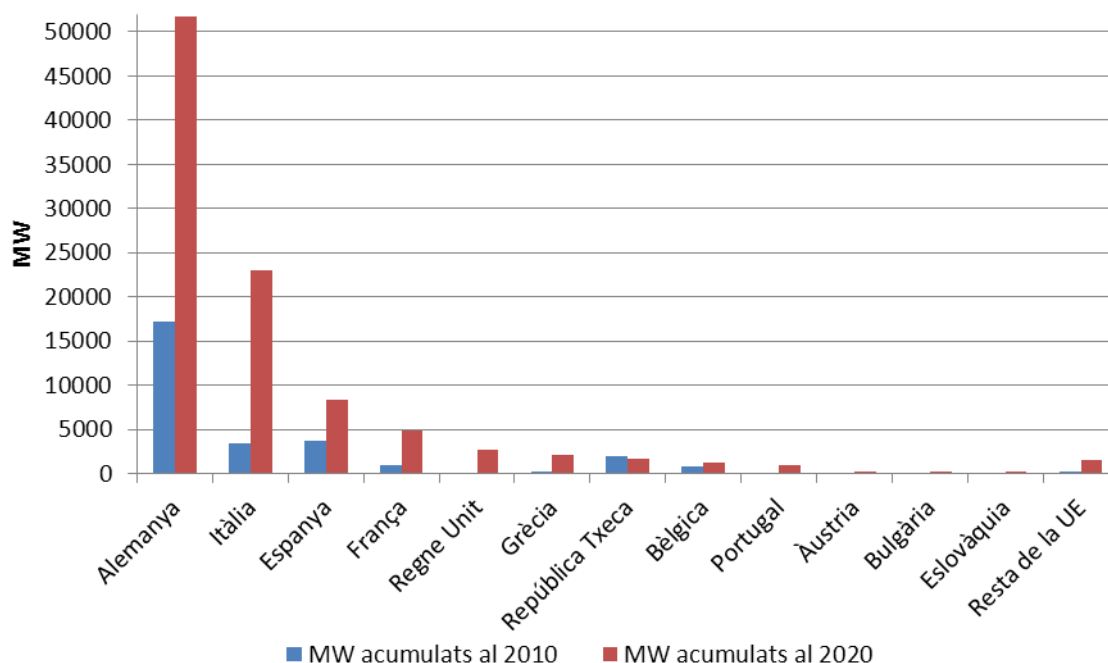
## 1.2. Situació actual

Per poder explicar la situació actual hem de tirar uns quants anys enrere, en el 2005, on hi havia el PER 2005-2010 (Pla d'Energies Renovables). Aquest pla volia aconseguir produir el 12% de l'energia consumida a partir de les energies renovables en el 2010, encara que en el 2007 ja es va complir, i en el 2008 es van instal·lar 2500



MW de potència (quan l'objectiu eren 400 MW al 2010). Els creixements insostenibles dels anys 2007 i 2008 van comportar la baixada dels preus de les tarifes i la paralització del mercat i de la indústria espanyola. Amb la crisi econòmica, el govern va posar sobre la taula el nou pla d'energies renovables, el PANER 2011-2020, l'objectiu del qual era cobrir el 20% de la demanda elèctrica a partir de les renovables, però va reduir les ajudes econòmiques (45% en els horts solars i 25% en les instal·lacions incorporades en edificis).

Pel què fa a la situació europea, Espanya és la segona potència en potència fotovoltaica instal·lada, però en el 2020 serà la tercera, ja que Itàlia tindrà 23000 MW acumulats (el seu objectiu anterior era aconseguir 8000 MW al 2020):



**Figura 1. Potència acumulada dels països de la Unió Europea en els anys 2010 i 2020. Font: European Photovoltaic Industry Association (EPIA).**

Com es pot veure, Espanya estarà a una gran distància d'Alemanya, que vol aconseguir 51753 MW. En la resta de països de la UE inclou Holanda, Romania, Xipre, Eslovènia, Luxemburg, Hongria, Malta, Finlàndia, Lituània, Suècia, Dinamarca, Polònia, Letònia, Irlanda i Estònia. Pel què fa a potència instal·lada l'any 2010, Espanya és la sisena (només va instal·lar uns 400 MW) per darrera de Alemanya, Itàlia, República Txeca, França i Bèlgica.

Pel què fa a la situació mundial, la UE és la primera potència, ja que Alemanya suposava el 50 % en potencia instal·lada l'any 2009, i UE 81% en l'any 2010. La potència total mundial acumulada fins l'any 2010 és de 39,5 GW, en comparació a la

total de l'any 2000, que era 1,5 GW. Aquest últim any s'han instal·lat 16700 MW, creixent el mercat mundial de la fotovoltaica un 130% ja que en l'any 2009 es van instal·lar 7200 MW. Però no ha set el creixement més gran, ja que en l'any 2008 va créixer un 145% (2,51 GW instal·lats l'any 2007 a 6,17 GW instal·lats l'any 2008) essent Espanya la culpable d'aquest augment. Alemanya és el país on la potència instal·lada per capita és la major, amb 2010,9 W per hab., seguida per la República Txeca i Espanya, amb 80,5 W per hab.

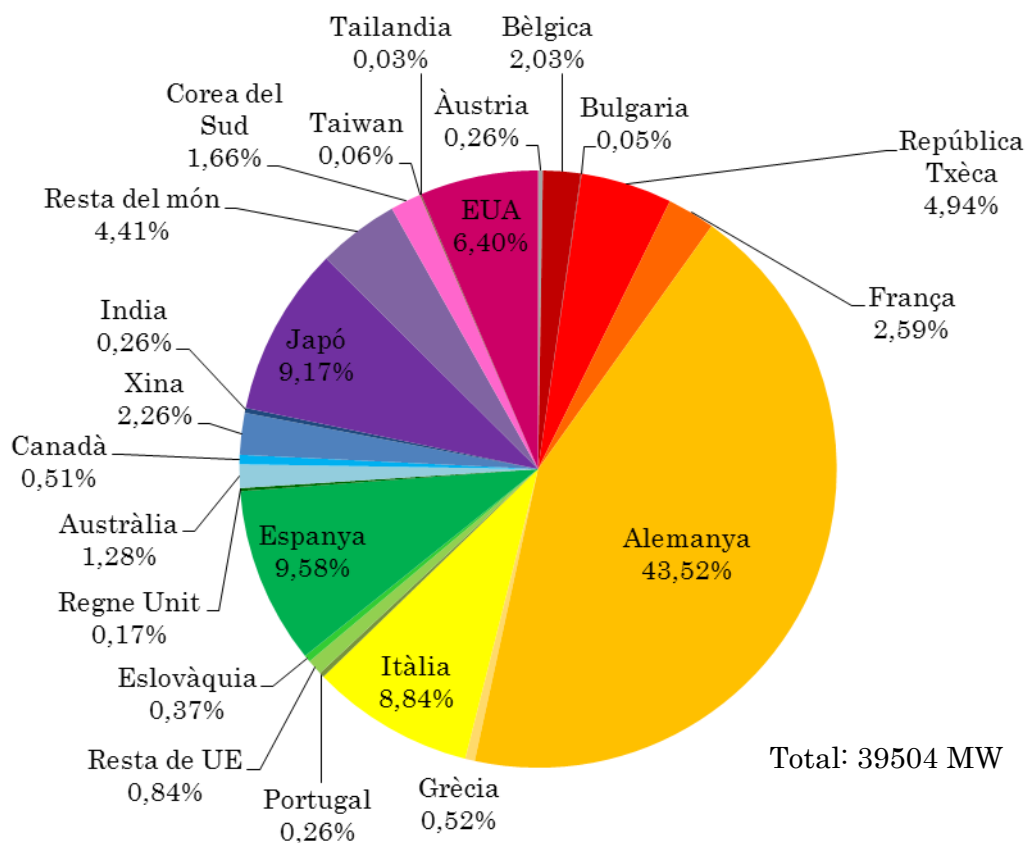
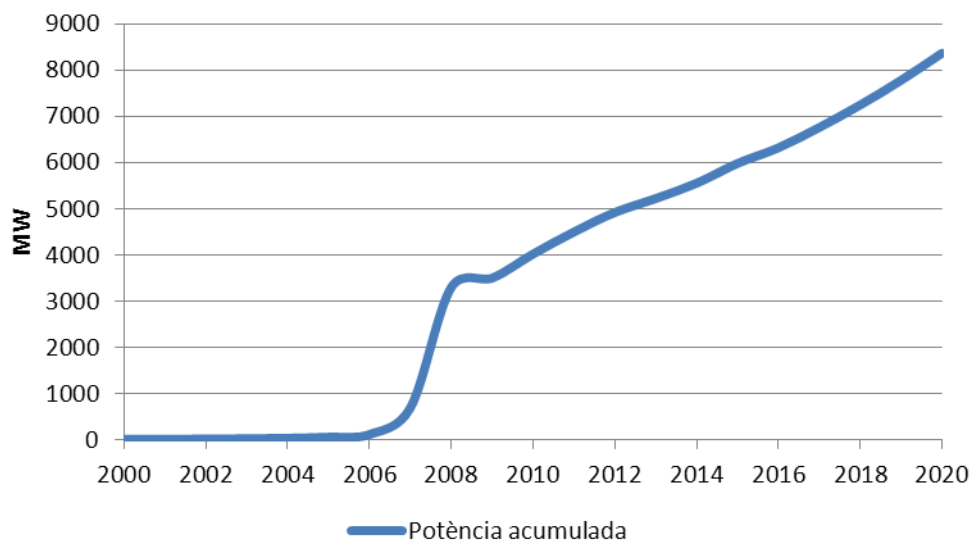


Figura 2. Potència acumulada de diferents països fins el 2010. Font: EPIA

### 1.2.1. Normativa vigent

La normativa sobre l'energia fotovoltaica ha canviat molt durant aquest últims anys per frenar i regular aquest creixement insostenible, sobretot el de l'any 2008. A continuació explicaré el pla d'energies renovables d'Espanya i enumeraré les principals normes respecte l'energia fotovoltaica:

- Pla d'Acció Nacional d'Energies Renovables (PANER) 2011-2020: document que substitueix el PER 2005-2010 (objectiu assolit en el 2007), en que es determina els objectius de cada tecnologia renovable per arribar a cobrir el 20% de la demanda energètica a finals del 2020. L'energia fotovoltaica cobrirà un 3,6% (67% en instal·lacions fixes en edificis i 33% en instal·lacions amb seguiment). Per arribar a aquest objectiu, la fotovoltaica ha d'augmentar la potència en 4346 MW entre el 2011 i 2020, obtenint com a potència final uns 8367 MW.



**Figura 3. Potència fotovoltaica acumulada a Espanya entre el 2000 i el 2020. Font: Asociación de la Industria Fotovoltaica (ASIF).**

Aquest increment de les instal·lacions crearà 47527 llocs de treball, repartits entre 40873 en la fabricació i instal·lació i 6654 en el manteniment i operació, d'un total de 128373. Pel què fa l'emissió de gasos contaminants, s'evitaran a l'any 2020 2949347 tones de CO<sub>2</sub> respecte les centrals de gas, i entre el 2011 i el 2020 15209234 tones de CO<sub>2</sub>.

- Les normes són: Reial Decret 1003/2010, Reial Decret 1565/2010, Reial Decret-Llei 14/2010, Reial Decret 1578/2008, Reial Decret 661/2007, Reial Decret 314/2006 (Codi Tècnic de l'Edificació), Reial Decret 842/2002 (Reglament Electrotècnic per a Baixa Tensió), Resolució del 31 de maig de 2001, Decret 352/2001, Reial Decret 1663/2000, Reial Decret 1955/2000 i la Llei 54/1997 estableixen procediments jurídics, econòmics i administratius, condicions tècniques i regulen la producció d'energia i el preu d'ella (tarifes) de les instal·lacions fotovoltaïques i regulen el sector elèctric.

## 1.3. Com funciona?

### 1.3.1. El Sol

El Sol, l'astre rei del nostre sistema planetari, té una massa  $322 \cdot 10^3$  vegades més gran que la Terra i un radi de  $690 \cdot 10^3$  km (103 vegades el de la Terra). La seva energia procedeix de la fusió dels nuclis d'àtoms d'hidrogen en nuclis d'àtoms d'heli en el seu interior, on la temperatura arriba als  $15 \cdot 10^6$  °C. Aquesta nana groga, i futura gegant roja d'aquí 5000 milions d'anys, fa incidir sobre al Terra una potència d'irradiació de 173000 TW ( $173 \cdot 10^{12}$  kW), fracció molt petita de l'energia emesa, superant la potència total de totes les central elèctriques actuals del món. L'energia que ens emet la podem aprofitar de 3 maneres diferent: de manera indirecta (vent, ones...), mitjançant captació tèrmica (energia solar tèrmica de baixa, mitjana i alta temperatura) i captació fotovoltaica (energia solar fotovoltaica). Aquesta radiació es pot dividir en 3 grups:

- *Radiació directa*: els rajos de la llum solar són paral·lels entre ells i la seva trajectòria no ha estat modificada quan ha passat per l'atmosfera
- *Radiació difusa*: els rajos de la llum solar ja no són paral·lels entre ells per culpa de partícules i gasos atmosfèrics, és a dir, la llum està distorsionada.
- *Radiació reflectida*: els rajos de la llum solar arriben gràcies a la reflexió amb altres objectes.

La intensitat de radiació sobre la Terra és constant, però no ho és la que arriba a la superfície, ja que depèn de l'estació de l'any, la climatologia, la latitud, l'hora del dia i l'alçada. La mitjana és d'uns  $900 \text{ W/m}^2$ , i en comparació la resta de països europeus, a Espanya és un dels millor llocs, ja que arriba fins a uns  $1500 \text{ kWh/m}^2$  (1100  $\text{kWh/m}^2$  al nord d'Espanya i  $1900 \text{ kWh/m}^2$  a les Illes Canàries).

### 1.3.2. L'efecte fotovoltaic

L'efecte fotovoltaic és l'absorció de la llum per la matèria i la transformació de l'energia de la radiació, fotons, en corrent elèctric que pot ser directament aprofitat o emmagatzemat de forma convenient.

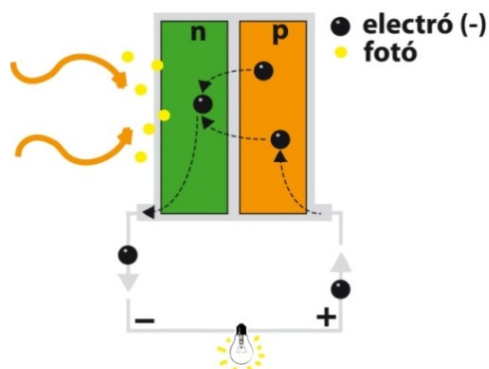


Figura 4. Esquema de l'efecte fotovoltaic

Per veure-ho més clar, aquest esquema senzill d'una cèl·lula solar. Quan el Sol il·lumina una cèl·lula fotovoltaica, els fotons més energètics i amb la freqüència adequada mouen els electrons situats al semiconductor N cap al semiconductor tipus P transferint la seva energia, passant per un cable que uneix les dues parts. Els electrons del semiconductor tipus P van als forats del semiconductor tipus N.

Es a dir, al semiconductor N es crea un pol negatiu i en el semiconductor P es crea un pol positiu, i si es tanca el circuit es produeix un flux d'electrons (corrent elèctrica) constant des del pol negatiu al pol positiu. La corrent es manté mentre el Sol il·lumina la cèl·lula.

### 1.3.3. Les cèl·lules fotovoltaiques

Aquest efecte es produeix en la cèl·lula solar o fotovoltaica. Està composta, bàsicament, per material semiconductor (silici) en què artificialment s'ha creat un camp elèctric. Hi podem trobar diferents capes:

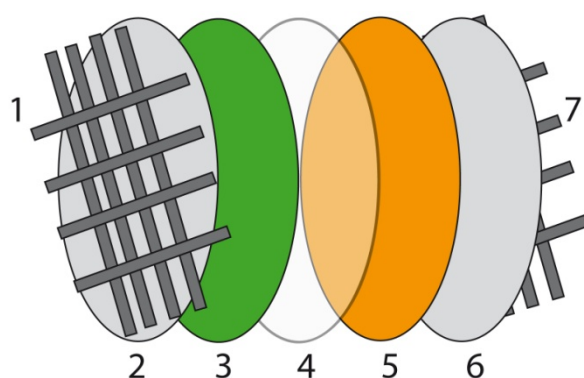


Figura 5. Cèl·lula fotovoltaica

1. Malla metàl·lica de contacte (-)
2. Contacte negatiu (-)
3. Semiconductor negatiu (-)
4. Zona de càrrega especial
5. Semiconductor positiu (+)
6. Contacte positiu (+)
7. Malla metàl·lica de contacte (+)

Aquests semiconductors negatiu i positiu també s'anomenen semiconductors de tipus N (negatiu) i tipus P (positiu). Els dos tenen com a base un semiconductor (silici) i un

altre componen anomenat dopant que pot ser l'alumini o l'antimoni depenent de les característiques que li volem donar. Si volem aconseguir un semiconductor de tipus N, és a dir, que augmenti el número de electrons, hem de buscar un element que ho pugui fer. Com que sabem que el silici té 4 electrons de valència, en que cadascun està

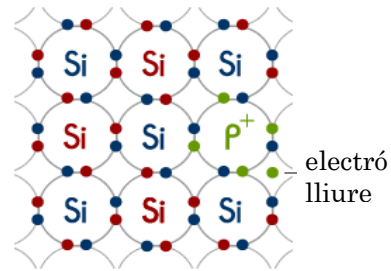


Figura 6. Semiconductor tipus N.

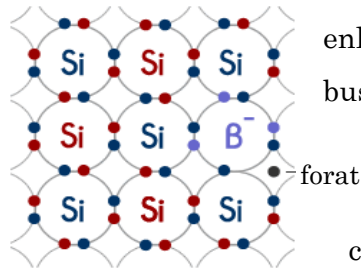


Figura 7. Semiconductor tipus P.

enllaçat covalentment amb 4 electrons més de silici, hem de buscar un element amb cinc electrons de valència (com l'arsènic, l'antimoni o el fòsfor). Quan s'incorpora un àtom de fòsfor, per exemple, a la xarxa cristal·lina en comptes d'un àtom de silici, un electró queda lliure, i com que no es podem crear forats per col·locar aquest electró, aleshores hi ha més electrons que forats, per això s'anomena semiconductor del tipus N. Si busquéssim un semiconductor del tipus P, és a dir, que hi hagués un excés de forats, s'hi haurien d'afegir àtoms amb 3 electrons de valència, com el bor o l'alumini. El resultat és que falta un electró en l'enllaç covalent, creant un semiconductor del tipus P.

Les cèl·lules solars es poden classificar, generalment, pel tipus de material semiconductor que actua com absorbidor de la radiació solar, establint els següents grups:

- a) Cèl·lules basades en el silici cristal·lí, monocristal·lí i policristal·lí:

Són les cèl·lules més utilitzades en el mercat. La seva estabilitat es pot considerar perfecta garantint la seva vida útil fins als 30 anys o més. Unes de les qüestions més importants són el material i el procés de producció.

Fa poc temps que no s'utilitzava un silici específic en d'indústria fotovoltaica, i s'utilitzava el de la microelectrònica.



Figura 8. Cèl·lula de silici monocristal·lí. Font: Solar Power Notes

Aquestes oblies, per purificar-les, estan sotmeses a processos altament costosos i amb un consum energètic molt elevat. Així, el procés de fabricació de mòduls fotovoltaics ha estat limitat per la disponibilitat de silici adequat per fabricar-les, i en quantitats convenientes.



Figura 9. Cèl·lula de silici policristal·lí. Font: Solarpv-co.uk

En quant a processos, es pot dir que en el laboratori s'han obtingut cèl·lules amb una eficiència d'un 25% i les disponibles comercialment quasi arriben al 17,5%. Això és degut que si la investigació en cèl·lules de silici ha avançat considerablement, els processos de fabricació són quasi com fa 20 anys. Això requereix que es desenvolupin processos de fabricació capaços de traslladar les característiques de les cèl·lules del laboratori al procés.

Per la producció de les cèl·lules s'utilitzen com a matèria prima roques riques en quars. A partir d'aquestes roques podem obtenir, per exemple, la quarsita, que s'obté silici d'alta puresa (quasi del 99%). El silici passa pel procés de Czochralski, on es fon a 1400 °C i provoca la seva cristallització, obtenint un lingot. El producte es talla a oblies molt primes (inferior al 0.5 mm) de mida 10x10 cm. Aquest procés és molt important ja que pot suposar pèrdues de fins un 50% de material. Després d'aquest procés, les futures cèl·lules es poleixen i s'eliminen les irregularitats o els defectes deguts al tall, així com les restes de pols o encenalls que puguin haver. Un cop netes, es realitza un tractament antireflectant per obtenir una superfície que absorbeixi més eficientment la radiació solar. Algunes d'aquestes làmines es contaminen lleugerament amb fòsfor i d'altres amb bor. En la unió p-n es forma un camp electrostàtic que és capaç de reconduir el moviment d'electrons en la direcció desitjada gràcies a l'efecte fotovoltaic, explicat anteriorment. Amb contactes metàl·lics en cada una de les cares de la cèl·lula fotovoltaica, es pot extreure l'energia elèctrica generada.

- b) Cèl·lules de làmina prima i en capa fina dels seus components actius, pel·lícules de silici, silici amorf i tel·luri de cadmi entre altres:

Es basen en l'aplicació de materials tan fins com 1 µm, presentant un avantatge vers la primera categoria, ja que utilitza menys material. En canvi, el seu estat de desenvolupament és menor en termes de costos de producció, rendiment, estabilitat i entrada al mercat. Les tecnologies que formen el conjunt de cèl·lules de làmina



**Figura 10. Cèl·lula de làmina prima. Font: ThomasNet**

prima presenten punts en comú en quant a processos de producció i algunes característiques físiques, presentant peculiaritats individuals:

- *Silici amorf* (a-Si): va ser el primer de làmina prima en sortir al mercat. El seu rendiment màxim no és superior al 15%. El seu inconvenient és la poca estabilitat ja que quan s'exposa al Sol, perd



eficiència. Actualment, els mòduls comercials de a-Si presenten rendiments estables del 10%. A més a més de poder ser flexibles i semitransparents, aquest tipus de cèl·lula és ideal per a la integració com elements arquitectònics. Però la seva producció és complicada i costosa a causa de la utilització de gasos, tòxics o explosius delicats de controlar.

- *Pel·lícules de silici*: combina la utilització de làmines primes de baix cost amb el rendiment del silici. El seu rendiment és d'un 12%.
- *Tel·luri de cadmi (CdTe)*: presenten un rendiment superior al 10% amb estabilitat, mentre que en els laboratoris presenten rendiments del 16%. El seu inconvenient és que està format per metalls pesants tòxics, bàsicament el cadmi, i això fa pensar que provoqui un rebuig per part del consumidor.

c) Cèl·lules III-V o d'alta eficiència:

Es basen en la utilització de semiconductors del grup III-V de la taula periòdica i els seus aliatges, principalment l'arseniür de gal·li (GaAs), per captar tot l'espectre



**Figura 11. Cèl·lula d'alta eficiència. Font: Larkinized**

solar, ja que el silici només capta els fotos amb una energia determinada. Per exemple, per captar la llum ultravioleta es fa servir GaInP (fosfur de gal·li i indi), per la llum visible GaInAs (arseniür de gal·li i indi) i per la llum infraroja Ge (germani). Aquestes cèl·lules s'utilitzen en l'àmbit espacial, degut al seu alt rendiment (fins al 42% en laboratoris), resistent a la radiació i fiabilitat. L'alt cost de les cèl·lules d'alta eficiència restringeixen l'ús terrestre, encara que es podria superar si s'utilitzés l'estructura de les làmines fines.

d) Cèl·lules solars orgàniques:

Aquestes cèl·lules han sorgit gràcies a la investigació més recent per tal d'abaratir costos, una fabricació més fàcil i produir un impacte ambiental menor. Els avantatges que té envers la cèl·lula de silici, és que per produir-se no es necessiten les elevades temperatures, i per tant, no necessiten tanta energia, essent un punt clau quan parlem d'energies renovables. Estan constituïdes per molècules orgàniques.

El seu objectiu no és competir amb les de silici (ja que el seu rendiment



**Figura 12. Cèl·lula solar orgànica. Font: Greentechmedia**



arriba fins al 8%, comparat amb el 20% de les de silici), sinó que es vol fer servir en els camps del tèxtil (ja que són flexibles) o dels telèfons mòbils, per exemple.

## 1.4. Tipus d'instal·lació

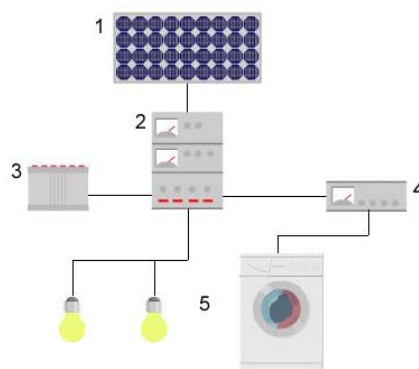
### 1.4.1. Instal·lacions autònomes

En aquest grup, l'energia generada s'utilitza, o per cobrir petits consums elèctrics o per tenir una autosuficiència energètica, i es consumeix al mateix lloc on s'ha generat. Aquestes instal·lacions les podem trobar en:

- Habitatges rurals que estan allunyades de la xarxa elèctrica.
- Aplicacions agràries com el bombeig d'aigua, la il·luminació de les granges, subministrament als sistemes de munyiment...
- Serveis i enllumenat públic per a fanals en parcs, carrers, parades de bus... Gràcies a les plaques, s'eviten les rases, canalitzacions, connexió a la xarxa elèctrica...
- Senyalització de carreteres, aèria (senyals d'altura i de pistes), marítima (fars, boies), vies de ferrocarril...
- Telecomunicacions: cabines telefòniques aïllades, estacions de presa de dades, estacions meteorològiques, repetidors de radio i televisió...

Els elements que la conformen són:

1. Mòduls fotovoltaics: transformen l'energia del Sol en energia elèctrica.
2. Regulador de càrrega: gradua l'entrada i la sortida del corrent de les bateries, que al mateix temps fa de protecció de sobrecarregues i de descàrrega excessiva per aquestes.
3. Acumulador o bateria: emmagatzema l'energia elèctrica per utilitzar-la quan no hi incideix radiació solar al panell.
4. Inversor (o ondulador o convertidor): transforma el corrent continu que generen les plaques en corrent altern.
5. Objectes de consum en corrent altern i corrent continu.



**Figura 13. Instal·lació autònoma.**  
Font: Solcaisur

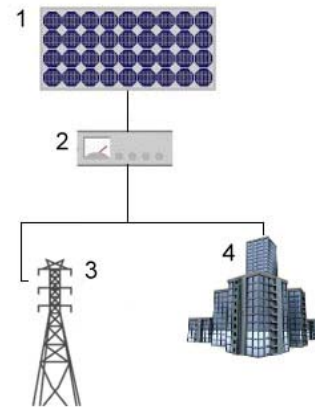
## 1.4.2. Instal·lacions connectades a la xarxa elèctrica

Podem trobar dos tipus instal·lacions connectades a la xarxa elèctrica:

- Les centrals fotovoltaïques o fotoelèctriques, en que l'energia elèctrica generada s'envia a la xarxa elèctrica, con qualsevol central convencional que generi electricitat.
- Els edificis amb sistemes fotovoltaïcs, en que una part de l'energia generada s'utilitza en el mateix edifici, i l'excedent s'envia a la xarxa elèctrica. Una altra possibilitat és entregar tota l'energia elèctrica a la xarxa mentre que l'usuari rep electricitat de la xarxa com un client normal.

Els element que la formen són:

1. Mòduls fotovoltaïcs: transformar l'energia del Sol en energia elèctrica.
2. Inversor (o ondulador o convertidor): transforma el corrent continu que generen les plaques en corrent altern.
3. Xarxa elèctrica: és on s'envia tota l'energia elèctrica o l'excedent.
4. Edifici: és on s'utilitza una part l'energia elèctrica produïda.



**Figura 14. Instal·lació connectada a la xarxa elèctrica**

## 1.4.3. Instal·lacions híbrides

Són les instal·lacions que combinen un sistema fotovoltaïc amb alguna altra font de subministrament d'energia elèctrica que no sigui la xarxa elèctrica, per exemple el dièsel o la eòlica. Aquestes instal·lacions són utilitzades quan es necessita un subministrament d'energia continuat que no pot ser garantit sempre pel sistema fotovoltaïc.

## 1.5. Elements de les instal·lacions

- Mòduls fotovoltaics:

Els mòduls fotovoltaics estan dissenyats per suportar les condicions que es donen a



l'aire lliure i solen durar uns 25-30 anys. Produeixen electricitat en forma de corrent continu i la unitat de la potència que donen és el Wp (Watts pic), que es correspon a la

potència donada pels mòduls treballant en CEM

**Figura 15. Mòdul fotovoltaic.**  
Font: GeoSolution

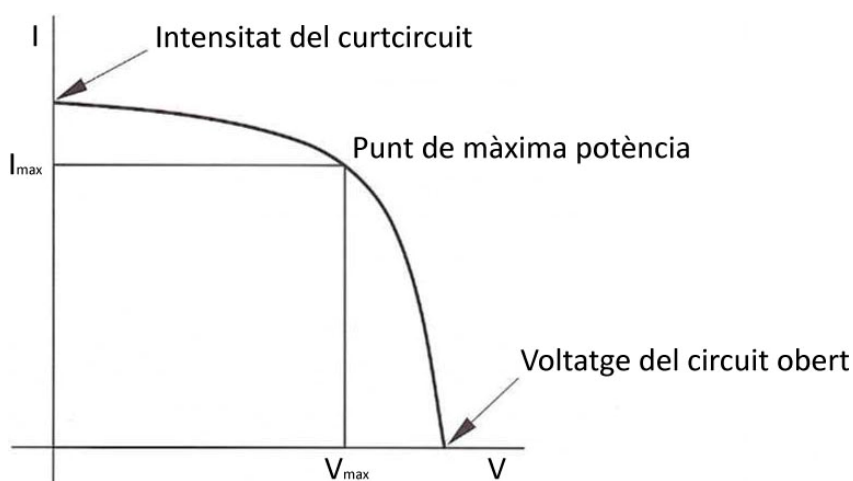
(condicions estàndard de mesura), es a dir, a una

temperatura de 25°C i amb una radiació de 1000 W/m<sup>2</sup>. Per saber quina és la

màxima potència fem servir la corba I-V (corba intensitat-voltatge), que ens

proporciona els diferents valors d'intensitat i de tensió que pot proporcionar aquest

mòdul. La corba es caracteritza per diferents paràmetres:



**Figura 16. Corba I-V.** Font: ITACAnet

La intensitat del curtcircuit ( $I_{sc}$ ) és la intensitat màxima del mòdul solar en CEM. El voltatge del circuit obert ( $V_{oc}$ ) és el voltatge màxim del mòdul solar en CEM. El punt de màxima potència ( $P_{max}$ ) és la potència màxima del mòdul fotovoltaic en CEM. La intensitat i el voltatge en el punt de màxima potència ( $I_{max}$  i  $V_{max}$ ) són els valors reals màxims, que el producte del quals dóna la potència màxima, ja que la  $I_{sc}$  i  $V_{oc}$  són casos extrems que es calculen sense cap connexió.

Aquesta corba pot variar segons la temperatura i la irradiància. La temperatura fa variar el voltatge (si la temperatura augmenta, el voltatge del circuit obert disminueix un 2,3 mV/°C) però la intensitat no varia tant (augmenta un 1,5 mA/°C).

La irradiància és proporcional a la intensitat del curtcircuit, però el voltatge no experimenta grans canvis.

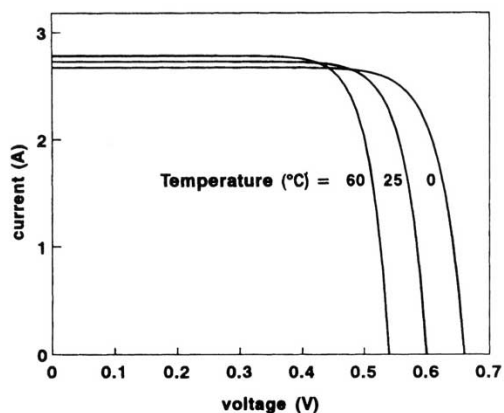


Figura 18. Corba I-V segons la temperatura.  
Font: ITACAnet

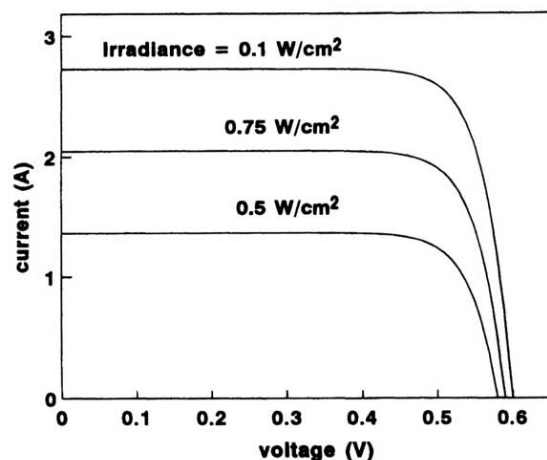


Figura 17. Corba I-V segons la irradiació. Font: ITACAnet

Els mòduls fotovoltaics, constituïts de diverses cèl·lules fotovoltaïques connectades entre elles en sèrie i/o en paral·lel, es basen en l'efecte fotovoltaic per generar electricitat.

- Bateria:

La seva funció és acumular energia que es produeix durant les hores de lluminositat per poder ésser utilitzada durant la nit o en períodes de mal temps. En els sistemes connectats a la xarxa elèctrica no és necessari la utilització de bateries ja que hi ha un contacte amb la companyia elèctrica, i l'electricitat s'envia directament a la xarxa. Les bateries més utilitzades són les de plom-àcid.



Figura 19. Bateria.  
Font: zeliangindustry

- Regulador:

La funció bàsica del regulador és de protegir la bateria de sobrecàrregues i també de descàrregues excessives. En cas de sobrecàrrega, el regulador talla el corrent del acumuladors, mentre que en el cas contrari, talla el corren del consumidor. També té la funció d'aportar informació al usuari, com d'alarmar de que la bateria està bastant descarregada.



Figura 20. Regulador.  
Font: SoloStocks

- Inversor:

La seva funció és de transformar el corrent continu (CC) generat per les plaques a corrent altern (CA), que és el que utilitzen els electrodomèstics i la xarxa de distribució elèctrica. Les seves característiques són la potencia d'entrada (depèn del generador fotovoltaic), la potencia de sortida i l'eficiència. Alguns aspectes importants que haurien de complir és que tinguessin una eficiència alta (ja que sinó s'hauria de posar més mòduls fotovoltaics per arribar a l'energia desitjada), que estiguessin protegits de sobrecàrregues, que siguin de baix consum i que compleixin els requisits que estableix el REBT (Reglament Elèctric de Baixa Tensió).



**Figura 21.**  
**Inversor. Font:**  
**Ecoesfera**

## 1.6. Avantatges i desavantatges

Avantatges:

- La llum solar és infinita.
- Al no produir cap tipus de combustió mentre genera electricitat, no desprèn cap gas contaminant a l'atmosfera ni dóna lloc a la contaminació acústica.
- Genera entre deu i vint vegades més d'energia de la que s'ha necessitat per produir-la.
- El silici, material fonamental de les cèl·lules fotovoltaïques, és molt abundant i no és necessari explotar jaciments de manera intensiva.
- Al ser una energia normalment local, evita cables, pals, grans línies elèctriques i el seu impacte visual és reduït.
- Els panells solars duren fins a 30 anys.
- És fàcil augmentar la superfície dels panells afegint noves plaques.
- Al migdia, quan la demanda d'energia és més gran, és quan produeix més energia elèctrica.
- Per l'aspecte modular, poden ser instal·lades en qualsevol lloc.
- Benefici econòmic pels edificis que venen l'energia generada pel panell, ja que les companyies elèctriques estan obligades a pagar tota l'energia.

Desavantatges:

- Impacte en el procés de fabricació de les plaques: extracció del silici, fabricació de les cèl·lules...
- Pel què fa a les centrals fotovoltaïques, es necessiten grans extensions de terreny, i provoquen un impacte visual.
- El preu dels materials i de la instal·lació és molt alt i poc assequible.
- S'han d'utilitzar bateries per emmagatzemar l'energia recollida per utilitzar-la quan les condicions atmosfèriques no son adequades, es a dir, quan no hi hagi Sol.
- Baix rendiment en el procés de transformar l'energia solar a elèctrica.

## 1.7. Impacte ambiental de l'energia fotovoltaica

L'energia solar fotovoltaica, respecte les altres renovables, és una de les energies que respecte més el medi ambient, ja que no fa soroll, no vibra i el seu impacte visual és petit ja que tan es poden posar en un camp com sobre una teulada. Però el seu impacte ambiental no és nul. Per veure quin és l'impacte, observarem la contaminació de la seva producció, la utilització de territori, l'impacte visual i l'impacte sobre la flora i la fauna de l'ambient.

- La contaminació produïda per la fabricació de la tecnologia fotovoltaica depèn del material. Les cèl·lules de silici, en principi, no utilitzen cap producte tòxic o contaminant, i el silici és un element molt abundant a la Terra. Però si s'utilitza cèl·lules de CdTe, que inclou petites quantitats de Cadmi (que és tòxic), si es provoqués un incendi, es contaminaria l'entorn. Per això, hi ha fabricants que reciclen aquests mòduls per aprofitar els residus.
- La utilització de territori depèn del tipus d'instal·lació. Si és una instal·lació petita, es pot col·locar sobre les teulades de l'edifici o les parets. Però les instal·lacions grans sí que necessiten grans extensions de superfície per produir una gran quantitat d'energia.
- L'impacte visual depèn també del tipus d'instal·lació. Si és una instal·lació petita, els mòduls poden quedar ben integrats als edificis, però si és mitjana o gran, no es pot evitar el seu impacte. Un dels problemes és la superfície reflectant, ja que pot ser un perill en les carreteres o pot provocar molèsties

en els llocs habitats. Es pot solucionar posant arbres o panells entre les plaques i el punt d'observació.

- L'impacte sobre la fauna i la flora és només present en les instal·lacions grans, ja que les petites no ocupen el terra. En el cas de les grans, un del problema és que roben la radiació que haurà d'anar a les plantes.

Com es pot veure, l'energia fotovoltaica provoquen un petit impacte ambiental si les compares amb les tecnologies de producció d'energia tradicional. Tot això ens diu que si s'estudia el projecte i s'elabora pensant en el medi ambient, s'evitarà al màxim l'impacte ambiental.



## 2.Previsió de la producció elèctrica d'una instal·lació real

En aquest apartat demostraré si la hipòtesi del principi és certa o falsa. Començaré fent una demostració de la instal·lació, amb les seves característiques i tot seguit explicaré les dades que necessito per trobar l'energia produïda i com les puc trobar, finalitzant amb la comparació de l'energia generada i energia consumida.

### 2.1. Instal·lació fotovoltaica de l'Institut del Voltreganès

La instal·lació de la qual calcularé la producció està situada a la teulada de l'edifici l'Institut del Voltreganès a la població de les Masies de Voltregà de la comarca d'Osona de Catalunya. En la fotografia següent es pot observar la situació de l'edifici:



Figura 22. Emplaçament de la instal·lació. Font: Google Maps



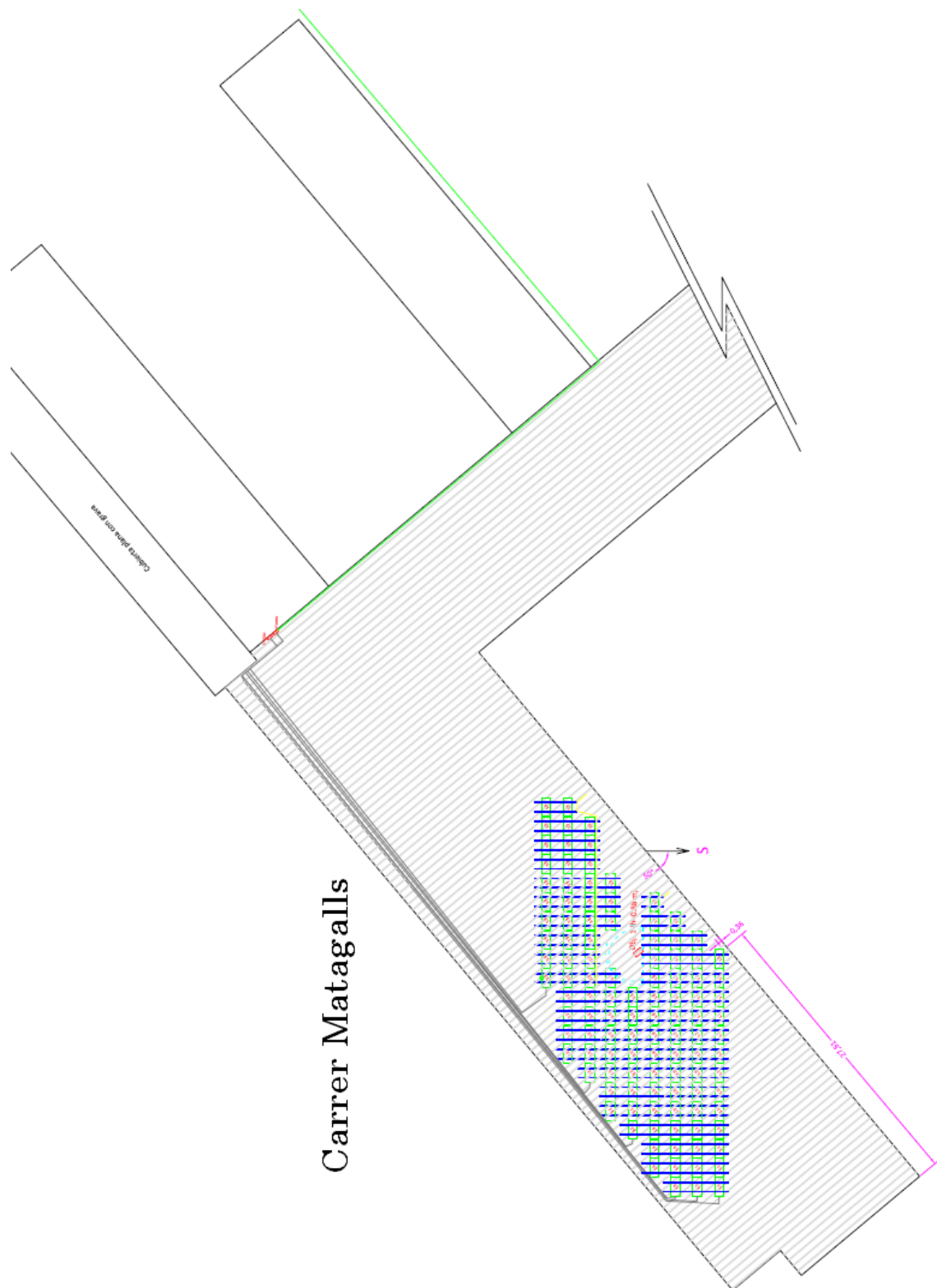


Figura 23. Plànol d'implantació de la instal·lació solar fotovoltaica. Font: ICF Equipaments



**Figura 24.** Edifici de l'Institut del Voltreganès



**Figura 25.** Imatge de les plaques fotovoltaïques.

És una instal·lació connectada a la xarxa elèctrica de l'empresa ICF Equipaments,



**Figura 27.**  
Inversor Sunway  
Font: Sunway

constituïda per un conjunt de 106 plaques fotovoltaïques amb una potència total de 22,81kWp (32 plaques de 210Wp, 38 plaques de 215Wp i 36 plaques de 220Wp) del model Evergreen Solar ES-E de l'empresa Evergreen Solar. Orientades al sud i amb una inclinació de 25°, cada mòdul conté 120 cèl·lules fotovoltaïques de silici policristal·lí amb un rendiment del 13,1%. Pel que fa als inversors, hi ha dues unitats del model Sunway de 10 kW.



**Figura 26.**  
Mòdul ES-E.  
Font: Evergreen Solar

## 2.2. Irradiació

Per calcular la irradiació i, posteriorment, les hores solars pic de la instal·lació que em faran servei a l'hora de calcular l'energia produïda, faig servir un programa cedit per Dr. Miquel Caballeria Suriñach de la Universitat de Vic, on introduint certs valors en una taula, el programa calcula irradiació mitjana mensual diària i les hores solars pic. En aquest apartat, primer explicaré què són aquests valors i altres càlculs que fa servir el programa per arribar a la dada que volem, que és l'hora solar pic de cada mes, i en el segon apartat ja mostraré la taula amb els resultats.

## 2.2.1. Paràmetres

### 2.2.1.1. El moviment del Sol:

#### a) Constant solar (S):

És l'energia solar total (tota l'energia radiada de totes les longituds d'ones) per unitat de temps i superfície que incideix sobre una superfície perpendicular als raigs del Sol, a fora l'atmosfera i a una distància aproximada a 1 UA, és a dir, la distància mitjana entre el Sol i la Terra que és de  $1,496 \cdot 10^{11}$  m. La mitjana de la constant solar és  $1353 \text{ W/m}^2$ , però degut a l'excentricitat de l'òrbita de la Terra i la variació de l'energia radiada del Sol, aquesta constant pateix variacions en el temps, i per trobar-les fem servir aquesta equació:

$$S(n) = \left[ 1 + 0,034 \cdot \cos\left(360^\circ \cdot \frac{n}{365}\right) \right]$$

on  $n$  és el dia de l'any, prenen valors entre 1 i 365 (per exemple, l'1 de gener és  $n=1$ , el 20 de febrer és  $n=51$ , el 2 de març és  $n=61$ , etc.).

#### b) Declinació del Sol ( $\delta$ ):

És l'angle format per la línia que uneix el centres del Sol i de la Terra (direcció Sol-Terra) i el pla equatorial. La declinació pot agafar com a valors màxims  $+23,45^\circ$  (solstici d'estiu) i  $-23,45^\circ$  (solstici d'hivern). La declinació és  $0^\circ$  durant els dos equinoccis.

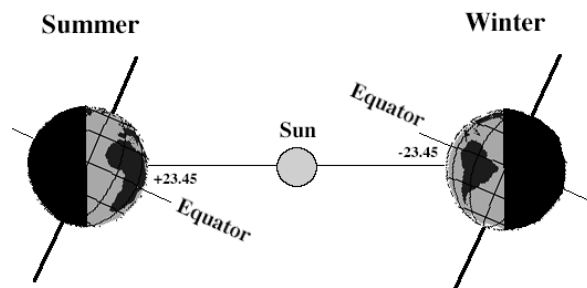


Figura 28. Declinació. Font: AGS Astronomy

Per calcular la declinació un dia concret es fa servir expressió:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(360^\circ \cdot \frac{284 + n}{365}\right)$$

on  $n$  és el dia de l'any, com en l'equació anterior.

### 2.2.1.2. La posició solar

#### a) Latitud ( $\Phi$ ):

La latitud d'un punt és l'angle que forma la línia que va des del punt fins el centre de la Terra i el pla equatorial. Depenent de la posició del punt, el signe variarà (si està

a l'hemisferi nord serà positiu i si està a l'hemisferi sud serà negatiu). Els angles varien entre  $0^\circ$  (l'equador),  $90^\circ$  (el pol nord) i  $-90^\circ$  (el pol sud).

b) Longitud ( $\lambda$ ):

La longitud d'un punt és l'angle que formen el pla meridional que passa pel punt i el pla meridional de Greenwich. El signe també varia, ja que si és a l'est del meridià de Greenwich, la longitud és positiva, i si és a l'oest negativa.

c) Angle horari ( $\omega$ ):

És l'angle mesurat sobre l'equador celeste (projecció de l'equador terrestre a l'espai) en sentit horari des del meridià local (meridià que passa pel punt on està l'observador) fins el meridià que passa pel sol. És zero en el migdia solar local, i s'incrementa  $15^\circ$  cada hora que falti per arribar al migdia (si passen 24h, l'angle horari ha incrementat un  $-360^\circ$ ). Podem relacionar l'angle horari amb l'hora solar veritable,  $t_{sv}$ , i amb l'hora local de la zona,  $t_{zone}$  (és l'hora oficial menys 2 hores a l'estiu i menys 1 hora a l'hivern):

$$\omega = 15^\circ \cdot (12 - t_{sv})$$

$$\omega = 360^\circ \cdot \left( \frac{12 - t_{zone}}{24} \right) - (\lambda - \lambda_{zone}) - TEQ$$

on  $\lambda$  és la longitud de l'emplaçament desitjat,  $\lambda_{zone}$  és la longitud del meridià que defineix l'hora local i TEQ (equation of time) és una correcció que té en compte la influència de les variacions de la velocitat de la Terra en l'òrbita al voltat del Sol. Els valors de TEQ varien segons el dia de l'any, i venen donats en radians per l'expressió:

$1 \leq n \leq 20$	$TEQ = -0,113 - 0,0019 \cdot n$
$20 < n \leq 135$	$TEQ = -0,0227 - 0,0393 \cdot \cos[0,0357(n - 37)]$
$135 < n \leq 240$	$TEQ = -0,0061 + 0,0218 \cdot \cos[0,0449(n - 135)]$
$240 < n \leq 335$	$TEQ = -0,0275 + 0,0436 \cdot \cos[0,036(n - 306)]$
$335 < n$	$TEQ = -0,002 \cdot (n - 359)$

on  $n$  és el dia de l'any, com en la constant solar o la declinació del Sol.

d) Angle d'alçada solar ( $\alpha_s$ ):

És l'angle format per la direcció Sol-Terra i el pla horitzontal de l'emplaçament seleccionat. Aquest angle varia de signe: és positiu durant el matí ja que el Sol està per sobre del pla horitzontal, i és negatiu durant la nit ja que el Sol està per sota del pla horitzontal.

L'angle d'alçada solar també el podem trobar a partir dels angles anteriors (latitud, declinació i angle horari) gràcies a la geometria esfèrica de la Terra:

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$$

Per trobar l'angle màxim de l'alçada solar, que serà en el migdia solar, fem servir aquesta expressió:

$$\alpha_s = 90^\circ - \phi + \delta$$

I per trobar l'angle horari de sortida i posta del Sol ( $\omega_{sp}$ ), el calculem a partir de l'equació de l'angle d'alçada solar relacionada amb els altres angles, prenent  $\alpha_s = 0$  i aïllant  $\omega_{sp}$ :

$$\sin 0 = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_{sp} \rightarrow \omega_{sp} = \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta)$$

e) Angle azimutal ( $\gamma_s$ ):

És l'angle format per projecció de la direcció Sol-Terra sobre el pla horitzontal i la direcció sud. L'angle és positiu quan s'obre cap a l'est i negatiu quan s'obre cap a l'oest.

També el podem trobar gràcies a les relacions entre els angles:

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \alpha_s}$$

f) Angle zenital ( $\theta_z$ ):

És l'angle que formen els raigs del Sol amb la perpendicular al pla horitzontal.

En el migdia solar ( $\omega = 0$ ), quan estem més a prop del Sol, podem relacionar la latitud, la declinació i l'angle zenital:

$$\theta_z = \phi - \delta$$

També podem veure que l'angle d'alçada solar és l'angle complementari de l'angle zenital:

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha_s$$

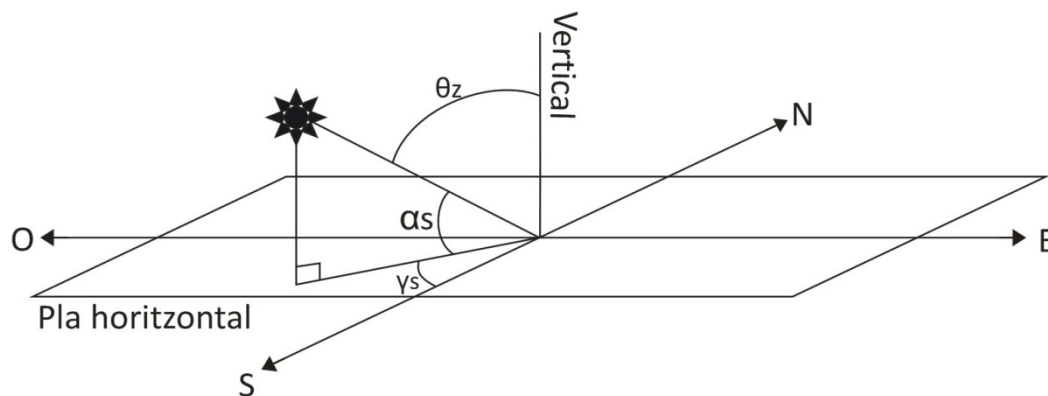


Figura 29. Representació de l'angle zenital, azimutal i d'alçada solar

### 2.2.1.3. La irradiació:

La irradiació és l'energia solar incident per unitat de superfície durant un temps determinat. Es calcula integrant la irradiància (potència incident per unitat de superfície, kW/m<sup>2</sup>) en un temps establert. La seva unitat pot ser MJ/m<sup>2</sup>, kWh/m<sup>2</sup>, kWh/m<sup>2</sup>·dia...

La irradiació sobre una superfície plana ( $\bar{G}_{h \text{ dia}}$ ) es pot trobar a la web del Servei Meteorològic de Catalunya. Jo he utilitzat les dades de l'estació de Gurb, ja que era l'emplaçament més a prop de la instal·lació i amb les condicions meteorològiques més similars. En la taula següent mostraré en kWh/m<sup>2</sup>·dia la mitjana mensual de irradiació:

	GEN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DES	ANY
2001	1,58	3,06	3,97	5,03	5,31	6,58	5,97	5,94	4,44	3,19	1,78	1,53	4,03
2002	1,67	2,89	3,67	4,44	5,22	6,33	5,97	4,97	4,06	3,00	1,83	1,22	3,78
2003	1,89	2,06	4,00	5,08	5,50	6,47	6,47	5,86	3,19	2,61	1,83	1,42	3,89
2007	1,94	2,47	4,06	4,14	5,94	6,78	6,81	5,36	4,64	3,22	2,42	1,89	4,14
2008	1,97	2,67	4,00	5,28	4,64	6,06	6,50	2,97	4,14	2,83	1,92	1,42	3,92
2009	1,83	2,86	4,08	4,42	6,39	6,58	6,39	5,72	4,56	3,44	2,22	1,44	4,17
2010	1,53	2,61	4,14	4,97	5,89	6,25	6,86	6,19	4,44	3,17	2,06	1,61	4,17
Mitjana	1,77	2,67	3,96	4,73	5,50	6,47	6,35	5,14	4,17	3,05	2,00	1,49	3,99

A l'apartat d'annexos es poden veure els mapes de la irradiació mensuals diària de Catalunya, extrets de la pàgina web del Servei Meteorològic de Catalunya.

2.2.1.4. La irradiació sobre l'atmosfera:

a) Irradiació externa sobre una superfície horitzontal durant un dia ( $G_{0h \text{ dia}}$ ):

La irradiància fora de l'atmosfera sobre una superfície horitzontal és:

$$G_{0h} = S(n) \cdot \cos \theta_z$$

on  $S(n)$  és la constant solar donada per la primera equació, la de la constant solar.

A partir d'aquesta equació, també en podem trobar una altra, que és a partir de la relació de l'angle zenital i l'alçada solar, que són complementaris ( $\cos \theta_z = \sin \alpha_s$ ):

$$S_{0h} = S(n) \cdot \sin \alpha_s \rightarrow S_{0h} = S(n) \cdot (\sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega)$$

La irradiació fora de l'atmosfera d'una superfície horitzontal durant un període de temps és:

$$dG_{0h} = S_{0h} \cdot dt = S(n) \cdot (\sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \cdot dt$$

i la irradiació fora de l'atmosfera d'una superfície horitzontal durant un dia és:

$$G_{0h \text{ dia}} = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} \cdot S(n) \cdot (\omega_s \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s)$$

on  $\omega_s$  és l'angle horari de la sortida del Sol del dia  $n$  per una superfície horitzontal

b) Irradiació externa sobre una superfície inclinada durant un dia ( $G_{0t \text{ dia}}$ ):

La irradiància externa sobre una superfície inclinada és:

$$S_{0t} = S(n) \cdot \cos i$$

on  $i$  és l'angle d'incidència de la radiació solar directe, i es calcula a partir d'aquesta expressió:

$$\begin{aligned} \cos i &= \sin s \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega + \sin \delta \cdot (\cos s \cdot \sin \phi - \sin s \cdot \cos \gamma \cdot \cos \phi) \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot (\cos s \cdot \cos \phi + \sin s \cdot \cos \gamma \cdot \sin \phi) \end{aligned}$$

La irradiació fora de l'atmosfera d'una superfície inclinada durant un dia és:

$$G_{0dia} = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} \cdot S(n) \cdot \left[ \begin{array}{l} -\sin s \cdot \sin \gamma \cdot \cos \delta \cdot (\cos \omega_s \cdot \cos \omega_p) + \\ \sin \delta \cdot (\cos s \cdot \sin \phi - \sin s \cdot \cos \gamma \cdot \cos \phi) \cdot (\omega_s \cdot \omega_p) + \\ \cos \delta \cdot (\sin \omega_s \cdot \sin \omega_p) \cdot (\cos s \cdot \cos \phi + \sin s \cdot \cos \gamma \cdot \sin \phi) \end{array} \right]$$

Com que per fer servir aquesta equació hem de fer servir  $\omega_s$  i  $\omega_p$ , que són els angles de la sortida i posta de Sol respectivament, que no són gaire fàcils de determinar per a una superfície inclinada, imaginarem la situació de  $\gamma_s = 0$  i que estem al l'hemisferi nord, que sí que són fàcils de determinar aquests angles.

Com que  $\gamma_s = 0$ , podem veure que els angles  $\omega_s$  i  $\omega_p$  estan simètricament posats respecte el migdia solar, per tant  $\omega_p = -\omega_s$ . A l'expressió passa a ser:

$$G_{0dia} = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} \cdot S(n) \cdot \left[ \begin{array}{l} \sin \delta \cdot (\cos s \cdot \sin \phi - \sin s \cdot \cos \phi) \cdot \omega_s + \\ \cos \delta \cdot (\cos s \cdot \cos \phi + \sin s \cdot \sin \phi) \cdot \sin \omega_s \end{array} \right]$$

on  $\omega_s$  es pot calcular a partir de:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi - s) \cdot \tan \delta]$$

### 2.2.1.5. La irradiació sobre la Terra:

a) Dies significatius de cada mes (n):

Per trobar la irradiació solar durant els diferents mesos de l'any s'agafa un dia de cada mes de manera que la mitjana de la irradiació del mes coincideixi amb la irradiació d'aquest dia. Els dies significatius recomanats són els següents:

Mes	Data	n
Gener	17 de gener	17
Febrer	16 de febrer	47
Març	16 de març	75
Abril	15 d'abril	105
Maig	15 de maig	135
Juny	11 de juny	162
Juliol	17 de juliol	198
Agost	16 d'agost	228



Setembre	15 de setembre	258
Octubre	15 d'octubre	288
Novembre	14 de novembre	318
Desembre	10 de desembre	344

b) Relació mitjana mensual d'irradiació diària sobre una superfície inclinada i horitzontal ( $\bar{R}$ ):

Per calcular la mitjana mensual d'irradiació diària sobre una superfície inclinada ( $\bar{G}_{t \text{ dia}}$ ) la podem calcular a través de la mitjana mensual d'irradiació diària sobre una superfície horitzontal ( $\bar{G}_{h \text{ dia}}$ ) (que la podem consolar en una pàgina web on mostrin les dades de les xarxes meteorològiques) i el factor de proporcionalitat  $\bar{R}$ :

$$\bar{G}_{tdia} = \bar{R} \cdot \bar{G}_{hdia}$$

Aquesta barra que porten a sobre vol dir que són mitjanes mensuals, i la barra de la  $\bar{R}$  vol dir que aquest factor de proporcionalitat prové de mitjanes mensuals.

Aquest factor  $\bar{R}$  és tot el conjunt de la radiació, és a dir, té en compte la radiació directa, difusa i reflectida:

$$\bar{R} = \underbrace{\left(1 - \frac{\bar{G}_{dhdia}}{\bar{G}_{hdia}}\right)}_{directa} \cdot \bar{R}_b + \underbrace{\left(\frac{\bar{G}_{dhdia}}{\bar{G}_{hdia}}\right)}_{difusa} \cdot f_d + \underbrace{\rho \cdot f_r}_{reflectida}$$

on  $\bar{G}_{d \text{ h dia}}$  és la mitjana mensual de radiació difusa per dia en una superfície horitzontal,  $\bar{R}_b$  és el quocient enter la mitjana mensual de radiació directe entre superfície inclinada i horitzontal ( $\bar{R}_b = \frac{\bar{G}_{hdia}}{\bar{G}_{tdia}}$ ),  $\rho$  és el coeficient de reflectància del

sol, que pot variar entre 0,2 en superfície de pedra de color clar i 0,7 en superfícies cobertes de neu i  $f_d$  i  $f_r$  són factors que tenen en compte l'angle d'inclinació de la placa en la contribució de radiació difusa i reflectida.

La irradiació solar difusa ( $\bar{G}_{d \text{ h dia}}$ ) varia molt dependent de les condicions meteorològiques, però el quocient entre la irradiació solar i la total està relacionat amb l'índex de nuvolositat gràcies a la correlació de Liu i Jordan:

$$\frac{\overline{G}_{dhdia}}{\overline{G}_{hdia}} = 1,39 - 4,027 \cdot \overline{K}_T + 5,531 \cdot \overline{K}_T^2 - 3,108 \cdot \overline{K}_T^3$$

on  $\overline{K}_T$  és l'índex de nuvolositat, que es pot obtenir a partir de la fracció enter la irradiació sobre una superfície horitzontal a la Terra i sobre l'atmosfera:

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{G}_{hdia}}{\overline{G}_{0hdia}}$$

Aquells dos factors de la radiació difusa i reflectida es poden calcular a partir d'aquestes expressions:

$$f_d = \frac{1 + \cos s}{2}$$

$$f_r = \frac{1 - \cos s}{2}$$

on  $s$  és la inclinació de la placa.

Posaré uns exemples per veure més clar aquests dos factors: en el primer, si la superfície està horitzontal ( $s = 0^\circ$ ) i es pot veure tot el cel des de la placa, el factor serà  $f_d = 1$ . Però si la superfície està en posició vertical ( $s = 90^\circ$ ), només es pot veure mig cel des de la placa, per tant el factor es reduirà ( $f_d = 0,5$ ) ja que només arriba la meitat de la radiació difusa. En el segon factor, el de la radiació reflectida, si la superfície està horitzontal ( $s = 0^\circ$ ), el factor serà  $f_r = 0$ , ja que la radiació reflectida del sòl no pot incidir en la placa. Però si la superfície està en posició vertical ( $s = 90^\circ$ ), ja hi ha una part de sòl que pot enviar la radiació reflectida cap a la placa, i per això el factor augmenta fins a  $f_r = 0,5$ .

Hi ha un cas particular, però que és molt freqüent, que és quan les plaques estan orientades cap al sud ( $\gamma_s = 0^\circ$ ), i en aquest cas podem calcular  $\overline{R}_b$  amb aquesta equació:

$$\overline{R}_b = \frac{\sin(\phi - s) \cdot \sin \delta \cdot \omega'_s + \cos(\phi - s) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega'_s}{\sin \phi \cdot \sin \delta \cdot \omega_s + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s}$$

on  $\omega'_s$  és l'angle horari de la sortida del Sol per una placa inclinada, i es pot calcular a partir d'aquesta equació (només en l'hemisferi nord):

$$\omega'_s = \omega_s \quad \delta \leq 0$$

$$\omega'_s = \arccos[\tan(\phi - s) \cdot \tan \delta] \quad \delta \geq 0$$

## 2.2.2. Resultats

Per calcular la producció mitjana anual, és necessari la irradiació sobre una superfície horitzontal. La irradiació s'ha calculat a partir de la mitjana entre els anys 2001-2010 (falten els anys 2004,2005 i 2006) de l'estació de Gurb, mostrada en l'apartat anterior.

A partir de les mitjanes de la irradiació, la latitud (42,00°) i la inclinació del captador (25°), he pogut calcular la irradiació solar  $\overline{G}_{t \text{ dia}}$  i les  $h_{sp}$  a partir del programa informàtic. Els resultats, que els podreu veure en la taula següent, els utilitzaré en l'apartat següent per calcular la producció d'energia:

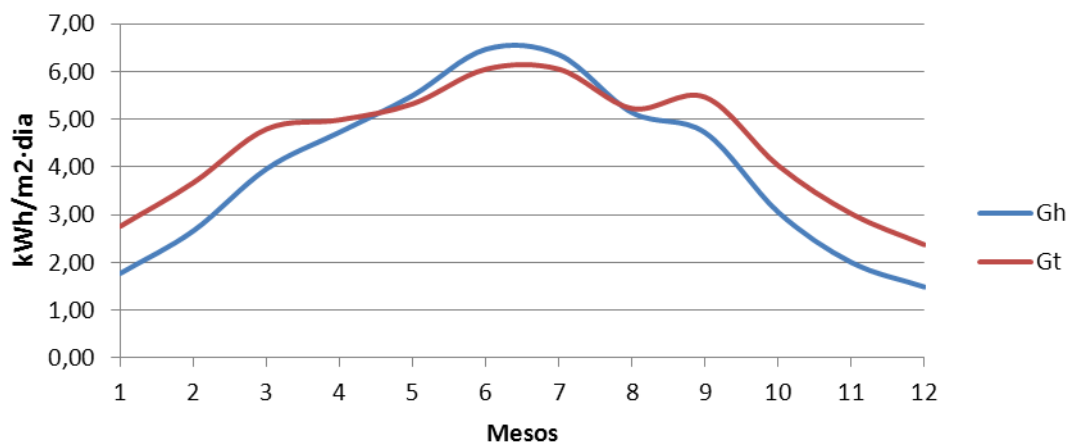
MES	n	$\varphi$	s	Gh	Gh	$\delta$	$\omega_s$	$\omega_s$	$\alpha_s$	G0h	Kt
	n°dia	graus	graus	Wh/m²dia	kWh/m²dia	graus	radians	graus	graus	kWh/m²dia	adim.
GEN	17	42,00	25	1773,81	1,77	-20,92	1,22	69,87	27,08	3,85	0,46
FEB	47	42,00	25	2666,67	2,67	-12,95	1,36	78,05	35,05	5,33	0,50
MAR	75	42,00	25	3962,96	3,96	-2,42	1,53	87,82	45,58	7,29	0,54
ABR	105	42,00	25	4731,48	4,73	9,41	1,72	98,59	57,41	9,36	0,51
MAI	135	42,00	25	5500,00	5,50	18,79	1,88	107,84	66,79	10,86	0,51
JUN	162	42,00	25	6467,59	6,47	23,09	1,96	112,57	71,09	11,47	0,56
JUL	198	42,00	25	6351,85	6,35	21,18	1,93	110,42	69,18	11,15	0,57
AGO	228	42,00	25	5138,89	5,14	13,45	1,79	102,44	61,45	9,93	0,52
SET	258	42,00	25	4717,30	4,72	2,22	1,61	92,00	50,22	8,03	0,59
OCT	288	42,00	25	3050,93	3,05	-9,60	1,42	81,24	38,40	5,90	0,52
NOV	318	42,00	25	2000,00	2,00	-18,91	1,26	72,03	29,09	4,19	0,48
DES	344	42,00	25	1486,11	1,49	-23,05	1,18	67,47	24,95	3,45	0,43

MES	Gdh/Gh	1-Gdh/Gh	$\omega_s'$	Rb	Radiació directe	Radiació difusa	Radiació reflectida	R	Gt	$h_{sp}$
	adim.	adim.	graus	adim.	adim.	adim.	adim.	adim.	kWh/m²dia	h
GEN	0,40	0,60	69,87	1,97	1,18	0,35	0,03	1,56	2,76	<b>2,76</b>
FEB	0,37	0,63	78,05	1,63	1,03	0,32	0,03	1,38	3,67	<b>3,67</b>
MAR	0,34	0,66	87,82	1,34	0,89	0,29	0,03	1,21	4,80	<b>4,80</b>
ABR	0,37	0,63	90,00	1,12	0,71	0,32	0,03	1,05	4,99	<b>4,99</b>
MAI	0,37	0,63	90,00	0,98	0,62	0,32	0,03	0,97	5,32	<b>5,32</b>
JUN	0,32	0,68	90,00	0,92	0,63	0,28	0,03	0,94	6,05	<b>6,05</b>
JUL	0,32	0,68	90,00	0,95	0,65	0,28	0,03	0,95	6,05	<b>6,05</b>
AGO	0,36	0,64	90,00	1,05	0,68	0,31	0,03	1,02	5,23	<b>5,23</b>
SET	0,30	0,70	90,00	1,24	0,87	0,26	0,03	1,16	5,46	<b>5,46</b>
OCT	0,36	0,64	81,24	1,52	0,98	0,31	0,03	1,32	4,03	<b>4,03</b>
NOV	0,39	0,61	72,03	1,87	1,14	0,34	0,03	1,51	3,02	<b>3,02</b>
DES	0,43	0,57	67,47	2,10	1,19	0,38	0,03	1,60	2,37	<b>2,37</b>

Irradiació anual (kWh/m²·any) 1595,42

Gt mitjana anual de la irradiació diària (kWh/m²·any) 4,37

Com es veu, he remarcat en negreta el resultat que faré servir per calcular posteriorment la producció d'energia elèctrica de la instal·lació fotovoltaica de l'Institut del Voltreganès. A continuació, per poder observar la quantitat de irradiació captada pel mòdul depenent de si està inclinat o horitzontal, mostraré un gràfic comparant els dos casos diferents:



**Figura 30. Irradiació solar a l'Institut del Voltreganès**

Aquesta diferència és deguda a l'angle dels raigs solars que arriben a la placa, ja que si està inclinada, els raigs, quan la declinació és negativa, arribaran amb un angle més semblant a 90°. En canvi, els raigs, quan la declinació és positiva, arribaran amb un angle més semblant a 90° quan la superfície és plana.

## 2.3. Càlcul de la producció

Per poder fer el càlcul de la producció d'energia necessitem saber abans algunes fórmules. Aquestes fórmules estan pensades per utilitzar-les d'una altra manera, és a dir, s'utilitzen per calcular en nombre de mòduls a partir de l'energia necessària i de la radiació incident ( $h_{sp}$ ). Jo les utilitzaré per calcular l'energia a partir del nombre de mòduls i de la radiació incident ( $h_{sp}$ ):

$$E_n = \frac{E_c}{f_r}$$

$$n_m = \frac{E_n}{P_{max} \cdot h_{sp}}$$

on  $E_c$  és l'energia del consum energètic diari,  $f_r$  és un factor de rendiment (engloba el rendiment del regulador, l'acumulador i el convertidor, i és 0,75),  $E_n$  és l'energia que s'obté a partir del mòdul abans de passar pel regulador, convertidor i/o acumulador,

$P_{\max}$  és la potència pic del mòdul,  $h_{sp}$  és les hores solars pic i  $n_m$  és el número de mòduls.

En principi, s'utilitzen aquestes fórmules per calcular el número de mòduls necessaris per cobrir les necessitats del consumidor ( $E_c$ ). S'introdueix l'energia necessària i les hores solar pic i obtens el número de mòduls. Però en el meu cas, com que se quants mòduls hi ha en la instal·lació i les hores solars pic, puc calcular l' $E_c$ , que en el meu cas serà  $E_p$ , és a dir, energia produïda i apunt per ser utilitzada. Ara mostraré la previsió d'energia produïda al dia durant el mes de gener, aplicant aquestes fórmules:

$$n_m = \frac{E_n}{P_{\max} \cdot h_{sp}} \qquad E_{total} = 62960,66 \frac{Wh}{dia}$$

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 2,76} \rightarrow E_n = 18548,69 \frac{Wh}{dia} \qquad E_n = \frac{E_p}{f_r}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 2,76} \rightarrow E_n = 22551,01 \frac{Wh}{dia} \qquad 62960,66 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{pgener} =$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 2,76} \rightarrow E_n = 21860,96 \frac{Wh}{dia} \qquad = 47220,50 \frac{Wh}{dia} = 47,22 \frac{kWh}{dia}$$

Primer calculo l'energia que sortirà dels 3 tipus diferents de mòduls (ja que no tots els mòduls tenen la mateixa potència) amb la segona fórmula a partir del nombre de mòduls, de la potència de cada mòdul  $P_{\max}$  (explicats en l'apartat 3.1) i de les hores solars pic  $h_{sp}$ , que varien al llarg de l'any (calculades en l'apartat 3.2.2). Un cop he trobat aquesta energia, utilitzo la primera fórmula per calcular l'energia que s'enviarà a la xarxa a partir de l'energia  $E_n$  i el factor de rendiment  $f_r$ .

Per no ocupar moltes pàgines amb les mateixos procediments per a cada mes, només mostraré el resultat final, i el procediment el podeu veure a l'apartat d'annexos:

$$E_{pgener} = 47,22 \frac{kWh}{dia} \qquad E_{pabril} = 85,32 \frac{kWh}{dia}$$

$$E_{pfebrer} = 62,85 \frac{kWh}{dia} \qquad E_{pmaig} = 91,09 \frac{kWh}{dia}$$

$$E_{pmarç} = 82,06 \frac{kWh}{dia} \qquad E_{pjuny} = 103,50 \frac{kWh}{dia}$$

$$E_{p\text{ juliol}} = 103,46 \frac{kWh}{dia}$$

$$E_{p\text{ octubre}} = 68,88 \frac{kWh}{dia}$$

$$E_{p\text{ agost}} = 89,39 \frac{kWh}{dia}$$

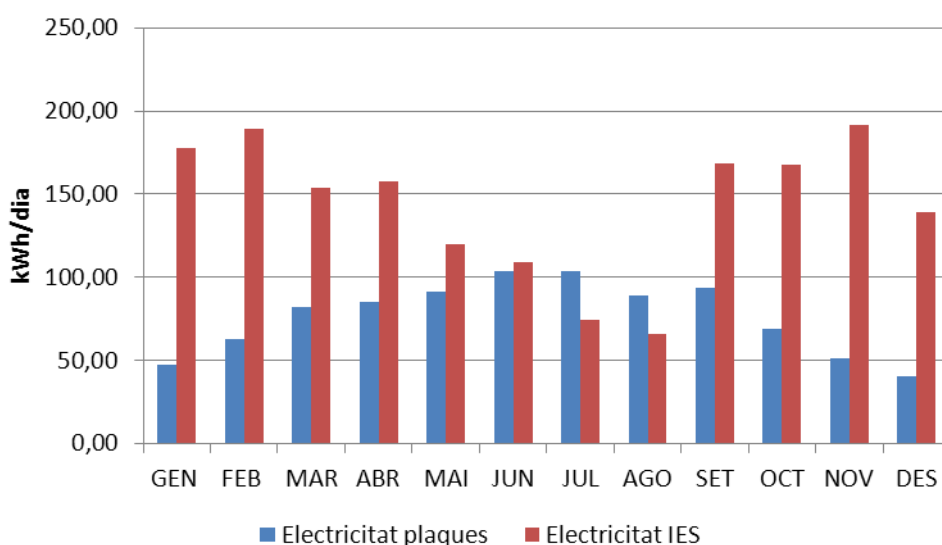
$$E_{p\text{ novembre}} = 51,66 \frac{kWh}{dia}$$

$$E_{p\text{ setembre}} = 93,45 \frac{kWh}{dia}$$

$$E_{p\text{ desembre}} = 40,57 \frac{kWh}{dia}$$

## 2.4. Anàlisi de dades

Per poder saber si la instal·lació produeix molta o poca electricitat i si cobriria la demanda energètica de l'institut, he comparat el resultat amb el consum d'energia de l'institut del 2008-2010 i amb l'ajut d'un gràfic es veurà més clar:



**Figura 31. Comparació de l'energia produïda amb l'energia gastada. Font: IES del Voltreganès**

Com podeu veure, durant la majoria dels mesos l'electricitat produïda per les plaques no és suficient per cobrir la demanda energètica de l'institut, encara que durant els mesos de juliol i agost se supera la demanda, ja que són els dos mesos amb menys activitat dintre l'institut. Durant els mesos d'hivern (DES-FEB), l'electricitat de les plaques cobreix entre el 26% i el 33% de la demanda, durant la primavera (MAR-MAI) entre un 53% i 76%, en la tardor (SET-NOV) entre un 27% i 56% i l'estiu el mes de juny cobreix un 95%, mentre que el juliol i l'agost supera la demanda en un 38% i 40% respectivament. Com a percentatge final, puc dir que

l'electricitat produïda per les plaques cobreix un 55% de l'electricitat gastada de l'institut.

A continuació, mostraré els procediments de com he arribat a obtenir quin és el percentatge d'energia que cobriria la instal·lació fotovoltaica:

1. Començo passant els resultats obtinguts en l'apartat 3.3, que és l'energia produïda en kWh/dia, a kWh/mes. Per passar-ho faig servir aquest factor de conversió, que dependrà del mes, ja que hi ha mesos que tenen 31 dies, n'hi ha que tenen 30 i amb el febrer, com que l'any 2008 va tenir 29 dies, he fet la mitjana amb els altres anys (2001,2002,2003,2007,2009 i 2010) i m'ha donat el nombre de 28,14 dies. Per això, hi he posat una X en el lloc on aniran variant els dies de cada mes:

$$\frac{kWh}{dia} \cdot \frac{Xdies}{1mes} = \frac{kWh}{mes}$$

En la taula següent mostro les dades de producció d'energia en les dues unitats:

MES	kWh/dia	kWh/mes
GEN	47,22	1463,84
FEB	62,85	1768,79
MAR	82,06	2543,75
ABR	85,32	2559,68
MAI	91,09	2823,86
JUN	103,50	3104,90
JUL	103,46	3207,22
AGO	89,39	2771,23
SET	93,45	2803,42
OCT	68,88	2135,19
NOV	51,66	1549,81
DES	40,57	1257,53

**Figura 32. Energia produïda per a la instal·lació en kWh/dia i en kWh/mes**

2. Sumo els resultat obtinguts en el procediment anterior i els passo a kWh/any.

En total, la instal·lació produeix 27989,22 kWh/12mesos.

$$27989,22 \frac{kWh}{12mesos} \cdot \frac{12mesos}{1any} = 27989,22 \frac{kWh}{any}$$

3. Faig els 2 mateixos procediments anterior amb l'energia gastada per l'institut. Faig servir les dades utilitzades per crear la figura 31 i el mateix factor de conversió que en el pas 1 per passar-ho a kWh/mes. En aquest cas, com que només tinc les dades de l'energia gastada dels anys 2008, 2009 i 2010, quan passi d'unitats en el mes de febrer, utilitzaré la mitjana del 29,28 i 28. Les dades de la figura 33 corresponen a l'energia gastada per tota la il·luminació de l'edifici i de tots els aparells connectats als endolls, com poden ser els ordinadors, les serres elèctriques...

MES	2008	2009	2010	Mitjana
GEN	179,71	151,26	202,87	177,95
FEB	190,79	181,39	195,36	189,18
MAR	134,55	176,19	149,77	153,51
ABR	159,13	134,10	180,73	157,99
MAI	105,26	122,61	132,10	119,99
JUN	74,83	107,70	144,90	109,14
JUL	77,32	77,97	69,00	74,76
AGO	43,94	83,00	69,90	65,61
SET	117,93	199,63	187,27	168,28
OCT	158,00	109,26	235,00	167,42
NOV	185,07	181,77	208,63	191,82
DES	176,42	139,71	101,81	139,31

Figura 33. Energia elèctrica gastada per l'Institut del Voltreganès (kWh/dia). Font: Institut del Voltreganès

MES	kWh/dia	kWh/mes
GEN	177,95	5516,33
FEB	189,18	5360,13
MAR	153,51	4758,67
ABR	157,99	4739,67
MAI	119,99	3719,67
JUN	109,14	3274,33
JUL	74,76	2317,67
AGO	65,61	2034,00
SET	168,28	5048,33
OCT	167,42	5190,00
NOV	191,82	5754,67
DES	139,31	4318,67

Figura 34. Energia elèctrica gastada per l'Institut del Voltreganès en kWh/dia i en kWh/mes

En total, l'Institut del Voltreganès gasta 52032,13 kWh/12mesos.

$$52032,13 \frac{kWh}{12mesos} \cdot \frac{12mesos}{1any} = 52032,13 \frac{kWh}{any}$$

4. Obtinc el percentatge fent el quocient entre ells i multiplicant-lo per 100:

$$\% = \frac{27989,22}{52032,13} \cdot 100 = 53,79\%$$

Com a resultat obtinc que l'energia produïda per la instal·lació fotovoltaica cobriria un 55% de les necessitats energètiques de l'institut.

Una cosa que m'ha sorprès és que la producció del mes d'agost ha estat superada per la del juliol i per la de juny. Però quan hi vaig pensar, vaig veure que era possible, ja



que és el mes amb les temperatures més altes, i les temperatures altes fan baixar el rendiment de les plaques, per això el mes de juny, que les temperatures no són tan altes (estan molt a prop dels 25 °C) la producció d'electricitat és més elevada.

Si comparem els resultats de l'energia produïda per les plaques de l'Institut del Voltreganès amb les dades d'altres instituts que també tenen plaques solars fotovoltaïques, com l'Institut Giola (Llinars del Vallès), l'Institut Celestí Bellera (Granollers) o l'Institut Bisbe Sivilla (Calella), podem veure una diferència d'uns 24 MWh/any, on l'Institut del Voltreganès genera uns 27989,22 kWh/any, i la mitjana de l'energia produïda dels altres instituts és de 3726,67 kWh/any. Aquesta diferència és deguda a que els kW instal·lats també són diferents (l'Institut del Voltreganès amb 22,81 kWp i els altres instituts amb una mitjana de 2,7 kWp), encara que la irradiació sigui més gran en els altres instituts.

Per trobar el percentatge d'energia elèctrica dels altres instituts, he suposat que gasten la mateixa energia elèctrica que l'institut ja que no he trobat quan gastaven, però crec que en el meu cas, que el percentatge només és orientatiu i el faig servir per comparar-lo amb el percentatge de la instal·lació de l'institut del Voltreganès, no és important que la dada d'energia consumida sigui exacte.

Els procediments que he seguit són molt semblants als anteriors, ja que jo coneixia el que produïen les seves plaques durant un any i el que suposadament gasta l'institut durant un any.

1. Començo fent la mitjana de l'energia produïda per les plaques de les 3 instal·lacions:

$$E_{mitjana} = \frac{4380 + 3800 + 3000}{3} = 3726,67 \frac{kWh}{any}$$

2. Faig el quocient entre la mitjana de l'energia produïda amb l'energia gastada:

$$\% = \frac{3726,67}{52032,13} \cdot 100 = 7,16\%$$

I el resultat obtingut és que l'energia mitjana produïda per les altres instal·lacions cobririen un 7% de la demanda energètica de l'institut.

### 3. Conclusió

La meua hipòtesi plantejava que l'energia produïda per les plaques era suficient per cobrir la demanda energètica de l'institut durant un any, però l'estudi de la producció d'energia mostra que cobriria, de mitjana, el 55%, com heu pogut observar en la figura 30.

Com a energia renovable que fem servir per produir energia, crec que està molt bé aquest percentatge, ja que si comparéssim el tant per cent d'energia que cobriria la demanda energètica en els altres instituts que he mencionat, no cobririen ni el 7%.

Per tant, puc dir que la meua hipòtesi és falsa.

Encara que la hipòtesi sigui falsa, estic molt sorprès de la diferència d'energia produïda de l'institut amb la dels altres instituts, ja que és molt gran.

Una altra conclusió és que els governs de tot el món consideren l'energia solar fotovoltaica com una opció molt sostenible a llarg termini per cobrir les seves demandes energètiques, i els experts com una de les fonts d'energies més importants en el futur. Jo també ho crec, ja que si s'investiga per millorar el rendiment i el preu, un dia podríem acabar que cada casa tingués la seva petita central elèctrica que cobriria una part de les seves necessitats energètiques.

## 4. Bibliografia

### Llibres i articles

**Anta, Javier. 2010.** Mals temps per a l'energia fotovoltaica. *el Periódico*. 14 / desembre / 2010, p. 44.

**ASIF. 2010.** *Hacia la implantación internacional de la fotovoltaica española*. Madrid : s.n., 2010.

—. **2011.** *Informe ASIF: Hacia el crecimiento sostenido de la fotovoltaica en España*. Madrid : s.n., 2011.

**Castellana Méndez, Francesc i Caballeria Suriñach, Miquel. 2006.** *Energies Renovables*. Vic : Universitat de Vic, 2006. Vol. II, IV i V.

**Ciemat. 2001.** *Tecnologías energéticas e impacto ambiental*. Madrid : McGraw-Hill, 2001.

**Encyclopædia Britannica. 2008.** *Britannica Gran Atlas de la Ciencia. Energía y movimiento*. s.l. : Sol 90, 2008.

**EPIA. 2011.** *Global market outlook for photovoltaics until 2015*. Brussel·les : s.n., 2011.

—. **2010.** *Global market outlook fot photovoltaics until 2014*. Brussel·les : s.n., 2010.

**IDAE; UPM; CIEMAT. 2002.** *Pliego de condiciones técnicas para instalaciones conectadas a la red PCT-C*. 2002.

**Institut Català d'Energia; Universitat Politècnica de Catalunya. 2001.** *Atlas de radiació solar a Catalunya*. Barcelona : s.n., 2001.

**Mitjà, Albert i d'Energia, Institut Català. 2002.** *Energia solar fotovoltaica: curs de formació*. Barcelona : s.n., 2002.

**MITyC; IDAE. 2007.** *Energia Solar en España 2007*. Madrid : s.n., 2007.

—. **2010.** *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011-2020*. Madrid : s.n., 2010.

—. 2005. *Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010*. Madrid : s.n., 2005.

**Pedro Quadri, Nestor.** 1996. *Energía solar*. Segunda. Buenos Aires : Librería y editorial Alsina, 1996.

**Romero Tous, Marcelo.** 2010. *Energía solar fotovoltaica*. Barcelona : Ediciones CEAC, 2010.

**Solanki, Chetan Singh.** 2009. *Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications*. New Delhi : PHI Learning, 2009.

### Webs principals

Asociación de la Industria Fotovoltaica. [En línea] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://asif.org>.

Diccionari de la llengua catalana. [En línea] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://dlc.iec.cat/>.

Enciclopèdia Catalana. [En línea] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://www.enciclopedia.cat/>.

European Photovoltaic Industry Association. [En línea] [Data: 6 / setembre / 2011.] <http://www.epia.org>.

Evergreen Solar. [En línea] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://evergreensolar.com/en/view-panels/>.

Generalitat de Catalunya. [En línea] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://www.gencat.cat>.

Greentechsolar. [En línea] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://www.greentechmedia.com/articles/read/organic-photovoltaics-with-intel-inside/>.

Institut Bisbe Sivilla. [En línea] [Data: 14 / setembre / 2011.]  
[http://www20.gencat.cat/docs/icaen/06\\_Relacions%20Institucionals%20I%20C%20omunicacio/04\\_Publicacions/Energia%20DEMO/Documents/Energia%20Demo%201\\_99%20PDFs/energiaDEMO%201-99%20Pdfs/demo\\_84\\_cat.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/icaen/06_Relacions%20Institucionals%20I%20C%20omunicacio/04_Publicacions/Energia%20DEMO/Documents/Energia%20Demo%201_99%20PDFs/energiaDEMO%201-99%20Pdfs/demo_84_cat.pdf).

Institut Celestí Bellera. [En línia] [Data: 14 / setembre / 2011.]  
[http://www.bellera.cat/fotovoltaica/documents/energia\\_demo\\_76\\_catala.pdf](http://www.bellera.cat/fotovoltaica/documents/energia_demo_76_catala.pdf).

Institut Giola. [En línia] [Data: 14 / setembre / 2011.]  
<http://agora.xtec.cat/iesgiola/intranet/index.php?module=contingut&func=view&pid=33>.

Instituto para la Diversificacion y Ahorro de la Energía. [En línia] [Data: 6 / setembre / 2011.] <http://www.idae.es>.

Noticias Jurídicas. [En línia] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://noticias.juridicas.com>.

Servei Meteorològic de Catalunya. [En línia] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://www.meteo.cat>.

Solar,viento,y todo lo que me parece. [En línia] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://www.larkinized.com/es/2011/02/new-multilayered-solar-cell-boosts-efficiency-solar-power-gets-boost/>.

Solarpowernotes. [En línia] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://www.solarpowernotes.com/how-solar-cells-works.html>.

SolarPV.co.uk. [En línia] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://www.solarpv.co.uk/solar-pv-cells.html>.

Sunways AG. [En línia] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://www.sunways.eu/es/>.

ThomasNet. [En línia] [Data: 6 / setembre / 2011.]  
<http://www.thomasnet.com/articles/plant-facility-equipment/solar-thin-film>.

### **Fonts personals:**

- Miquel Caballeria Suriñach (Doctor en Ciències Físiques i professor de la Universitat de Vic).

## 5. Annexos

### 5.1. Annex I: Mapes d'irradiació de Catalunya

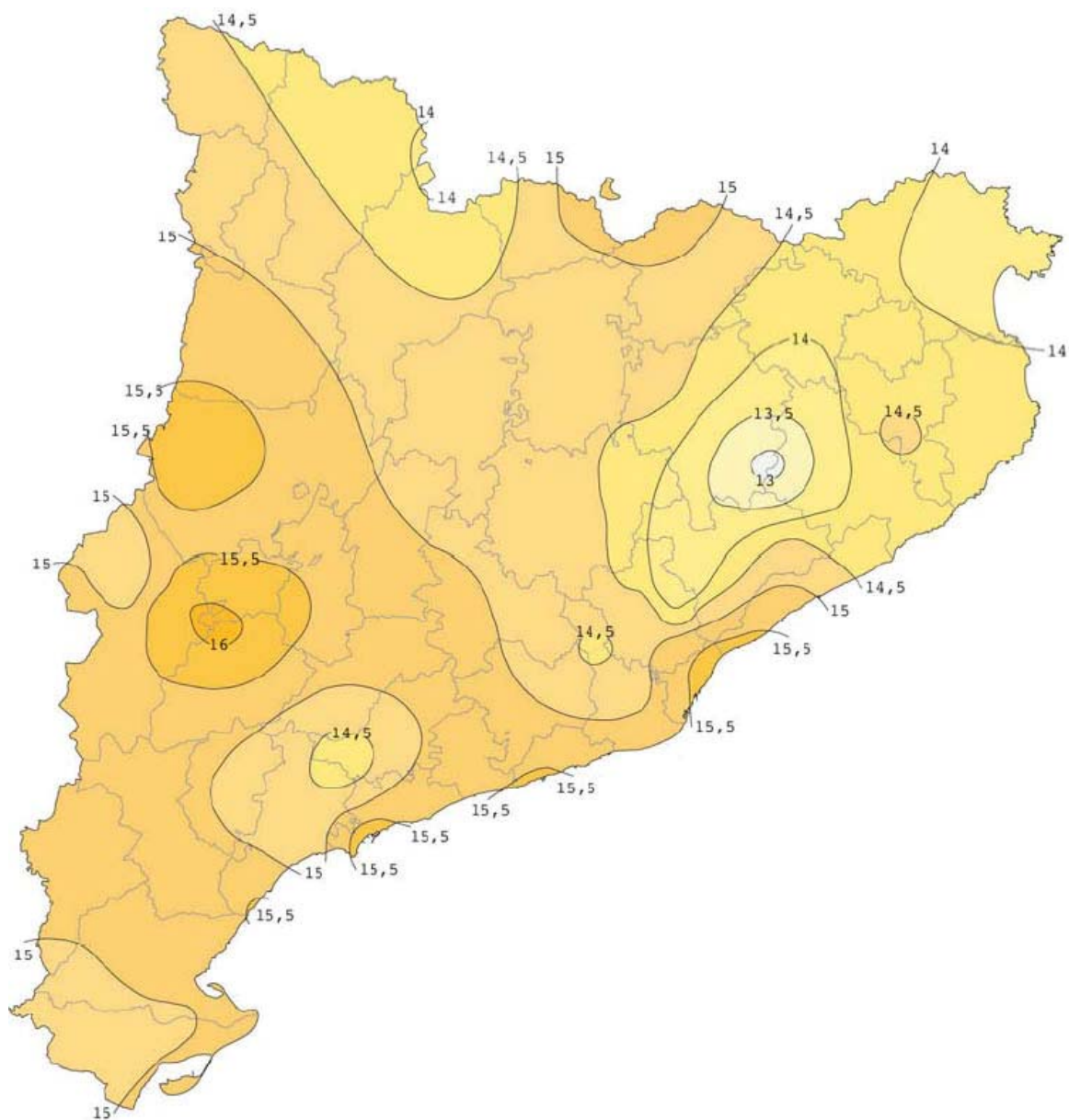


Figura 35. Mapa d'irradiació global diària, mitjana anual (MJ/m²). Font: Servei Meteorològic de Catalunya

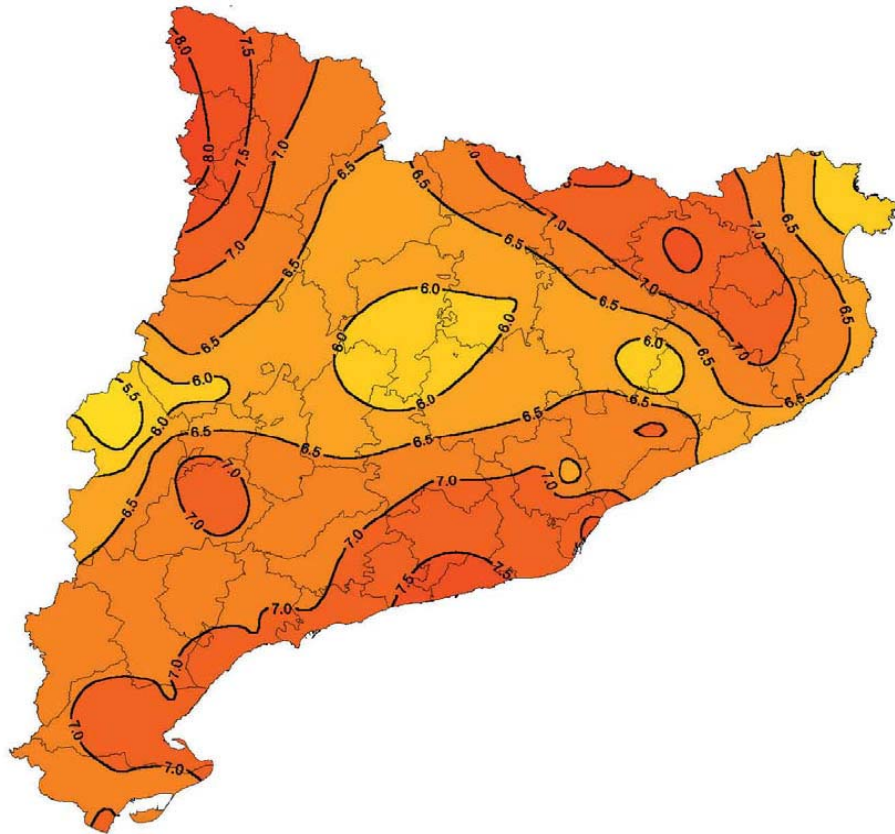


Figura 36. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de gener (MJ/m<sup>2</sup>)

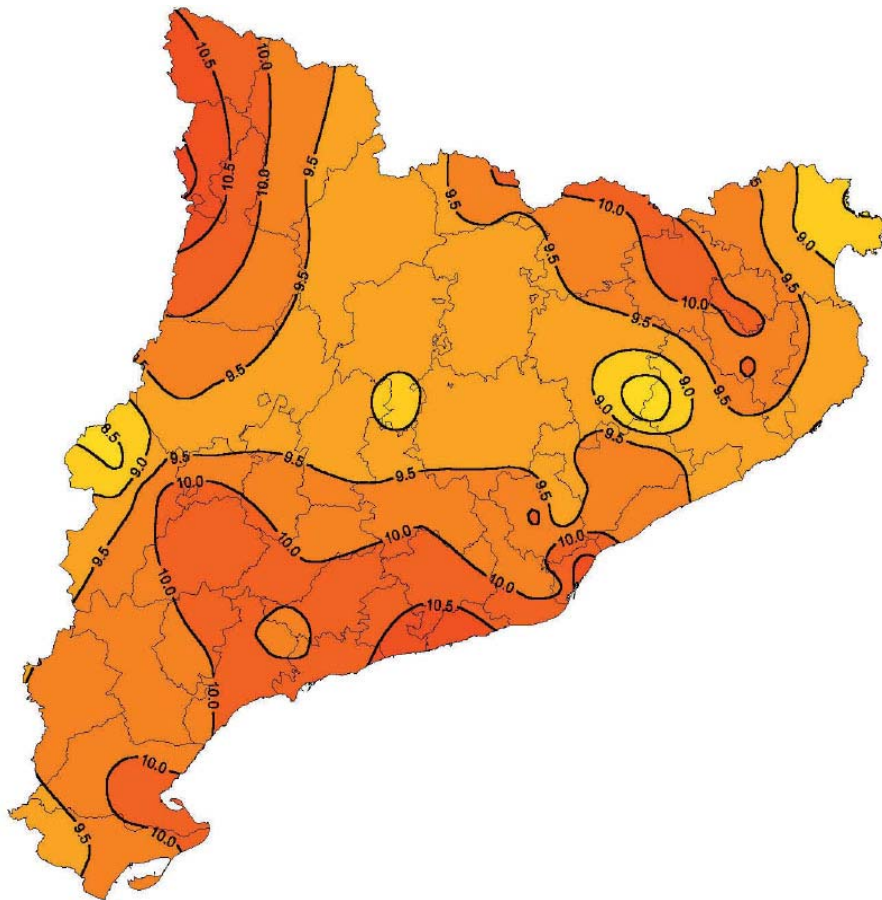


Figura 37. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de febrer (MJ/m<sup>2</sup>)



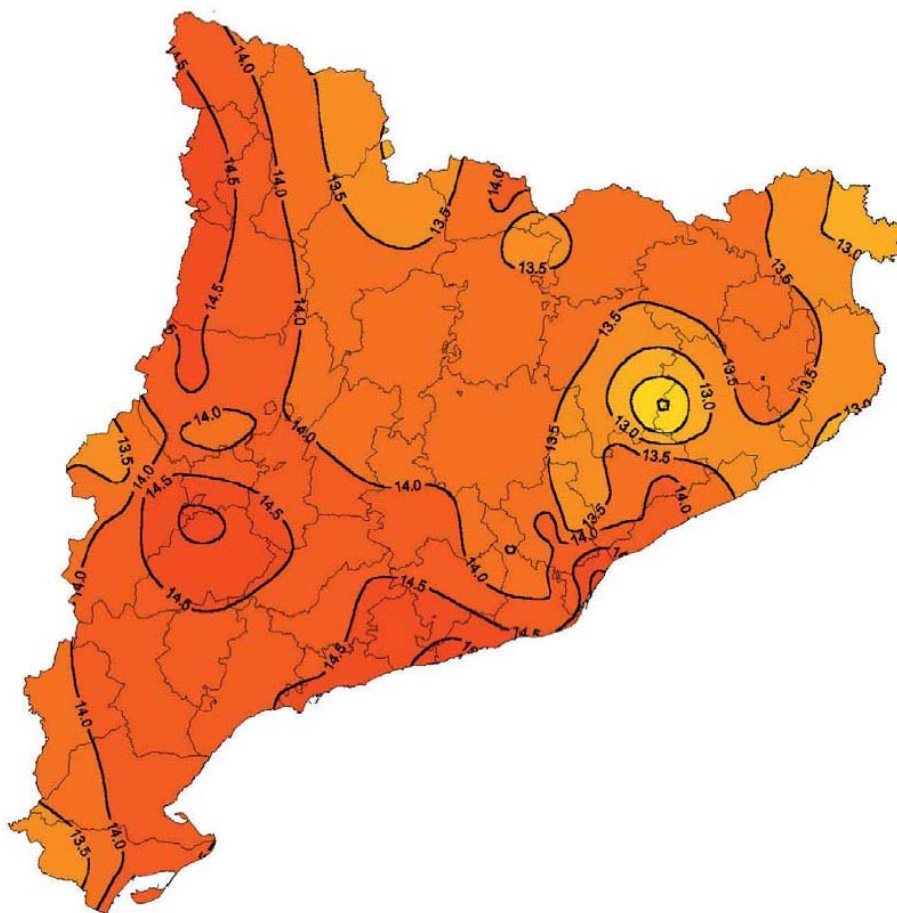


Figura 38. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de març (MJ/m²)

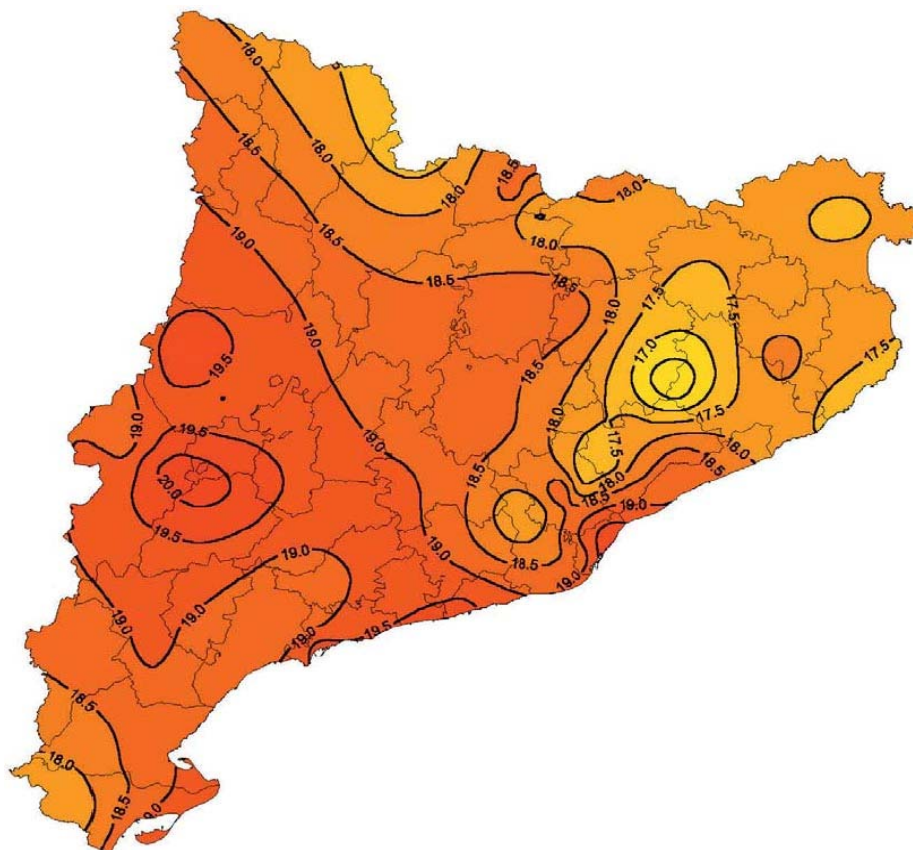


Figura 39. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes d'abril (MJ/m²)



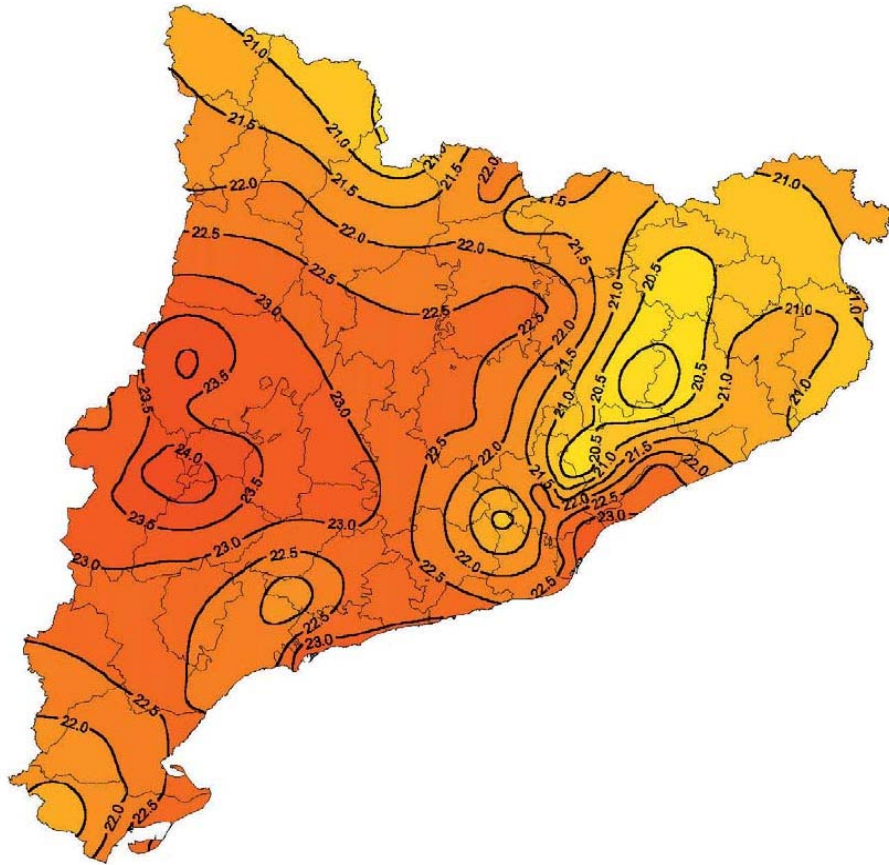


Figura 40. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de maig (MJ/m²)

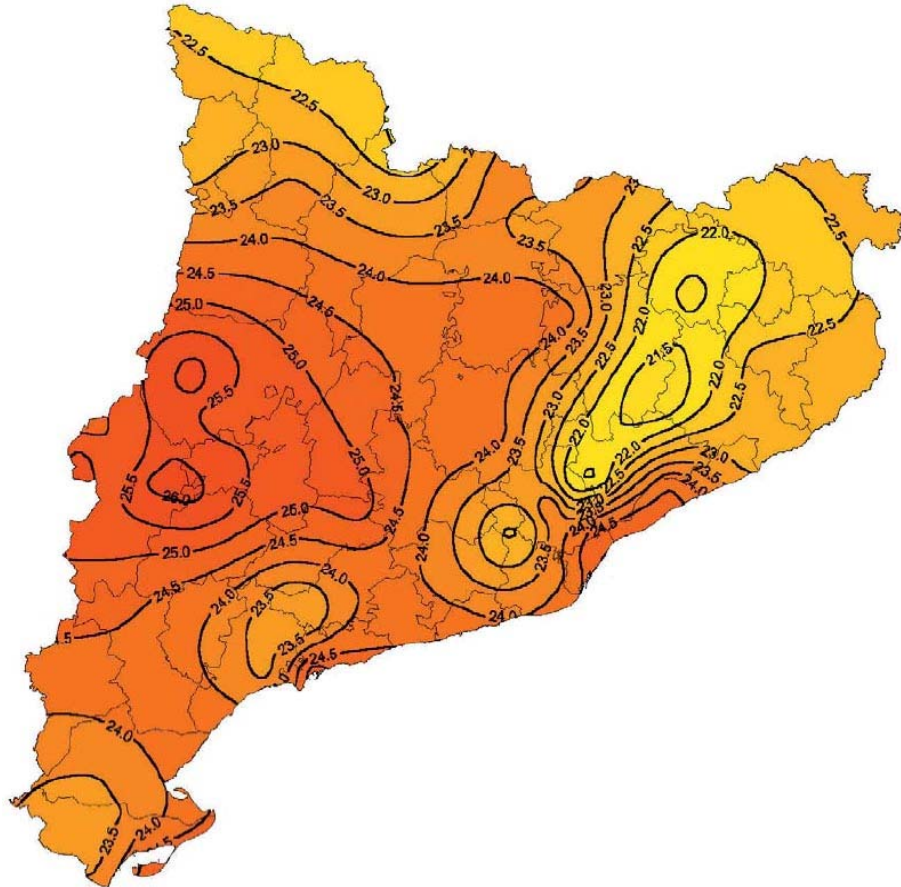


Figura 41. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de juny (MJ/m²)

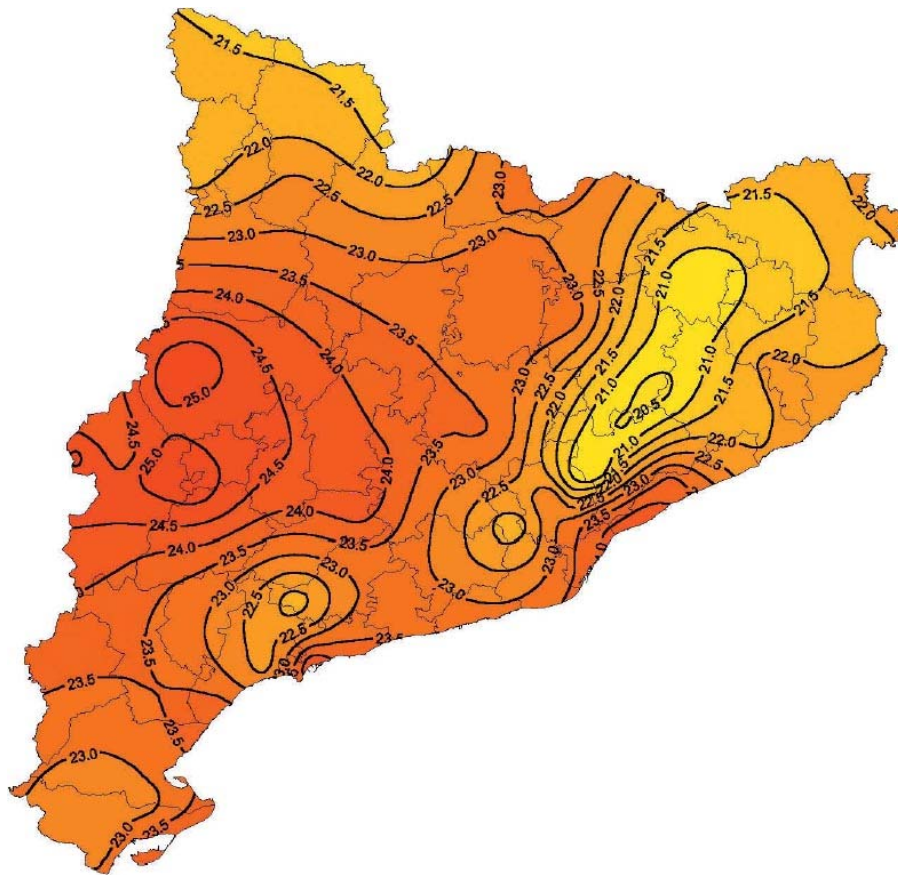


Figura 42. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de juliol (MJ/m<sup>2</sup>)

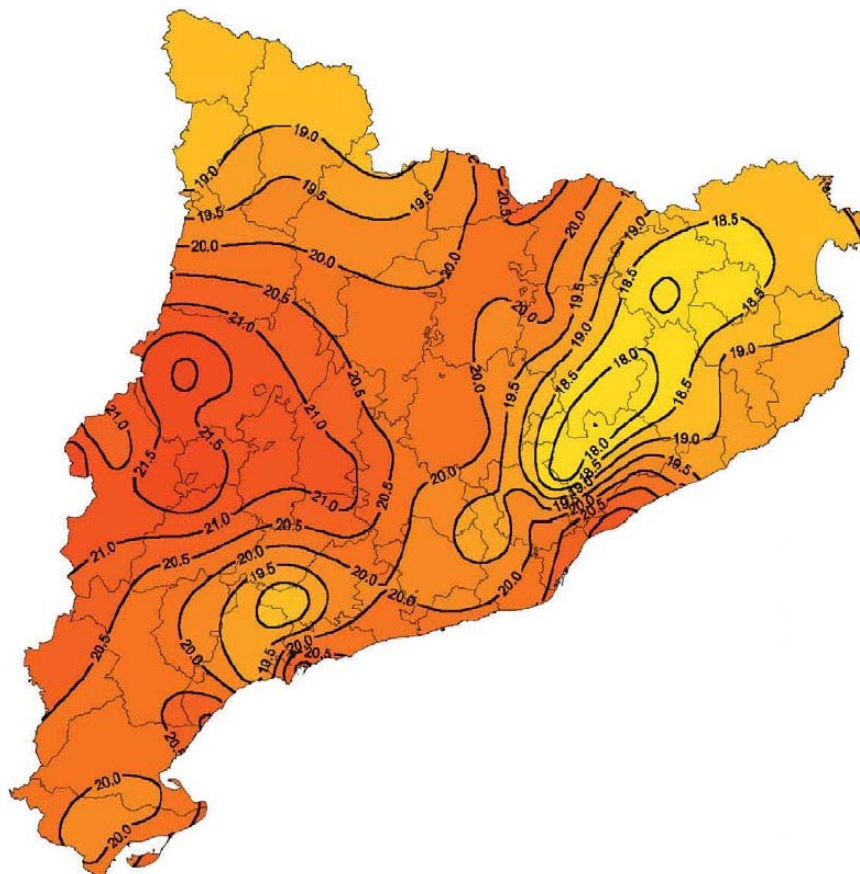


Figura 43. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes d'agost (MJ/m<sup>2</sup>)



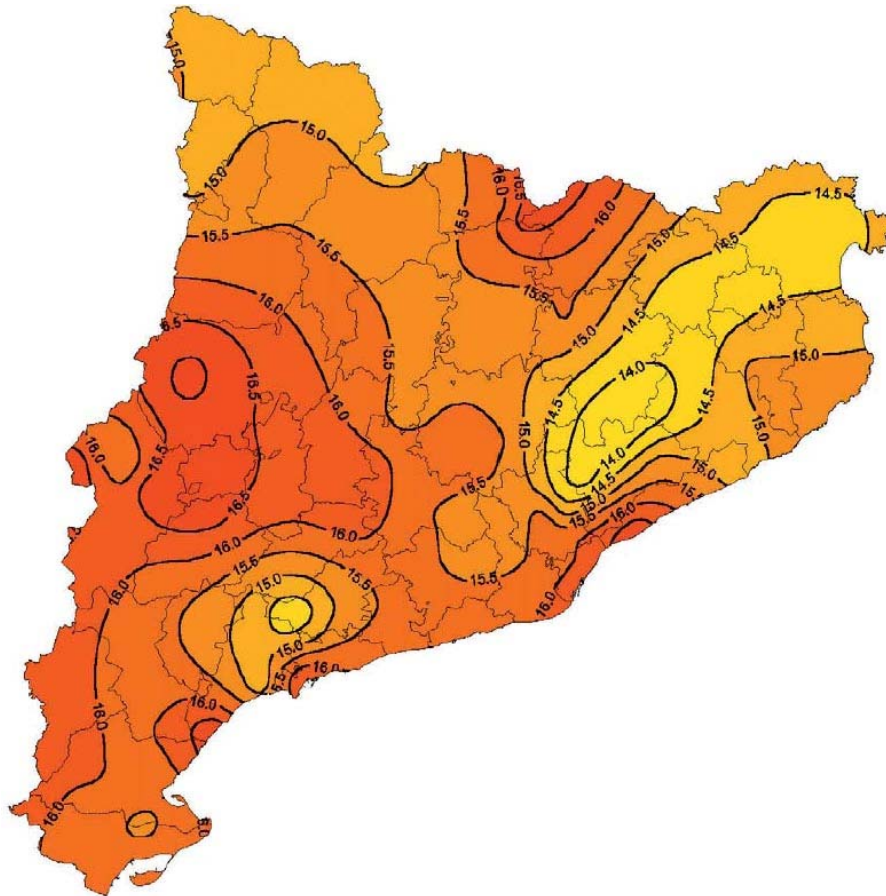


Figura 44. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de setembre (MJ/m²)

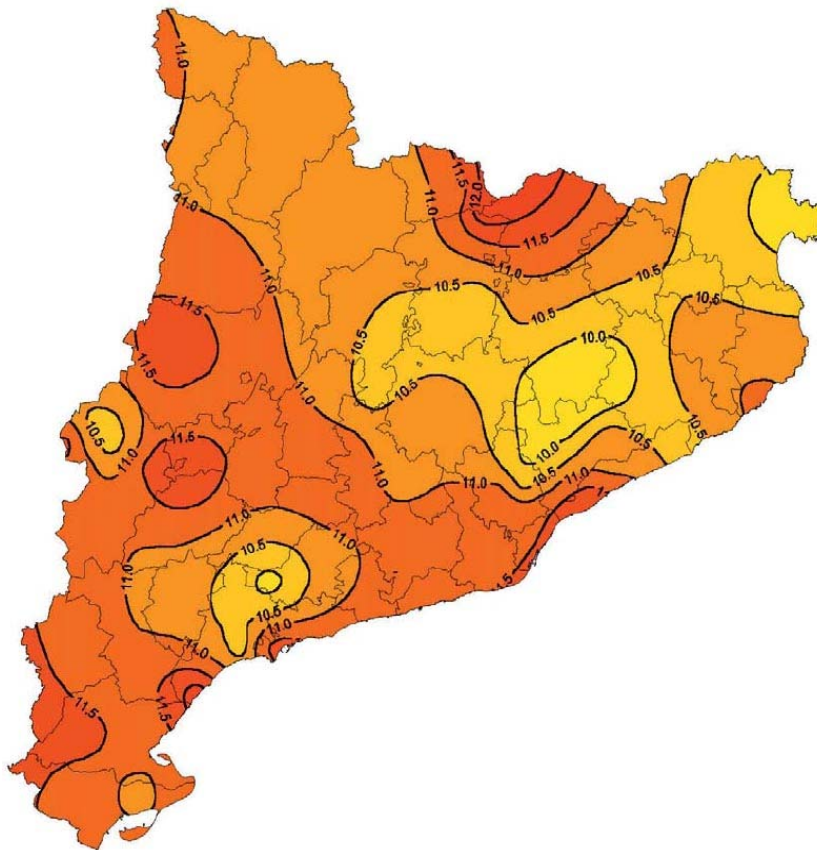


Figura 45. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de octubre (MJ/m²)

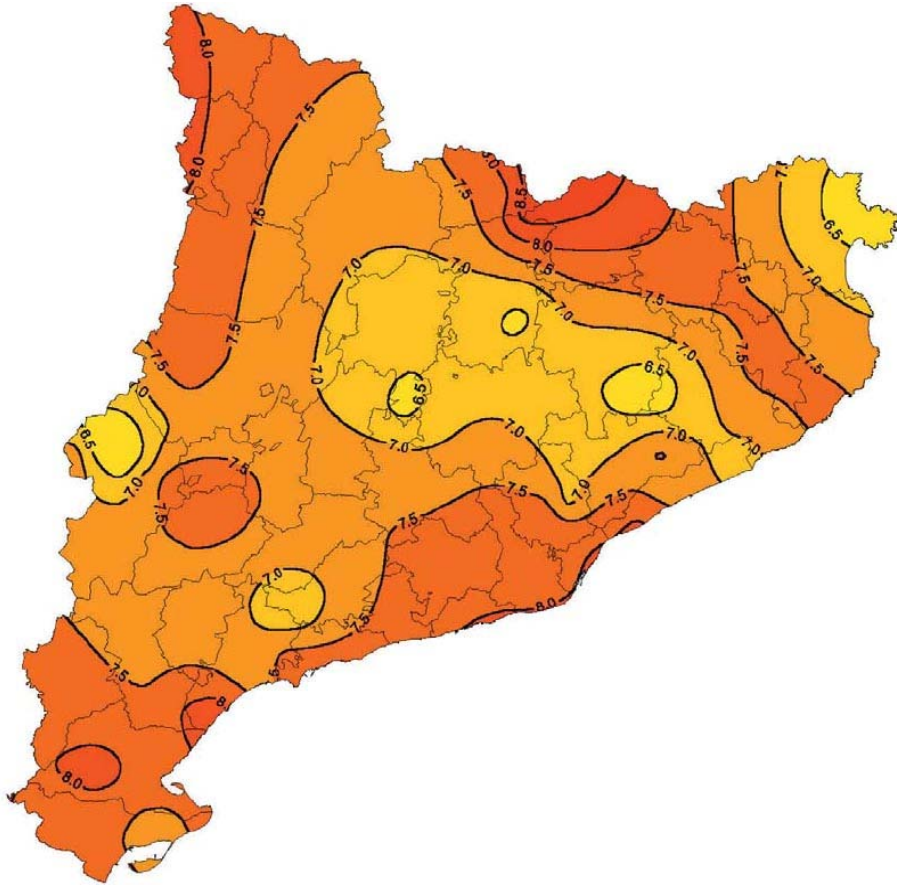


Figura 46. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de novembre (MJ/m²)

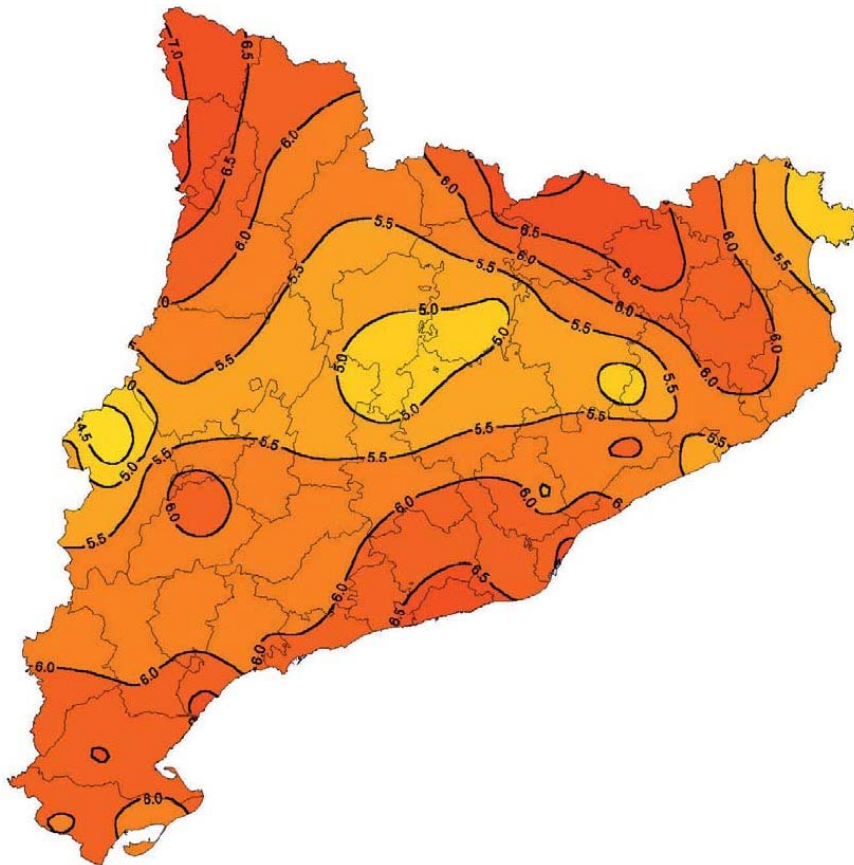


Figura 47. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de desembre (MJ/m²)

## 5.2. Annex II: Procediment del càlcul d'energia

Mes de febrer:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 3,67} \rightarrow E_n = 24688,31 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{ntotal} = 83800,66 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 3,67} \rightarrow E_n = 30015,41 \frac{Wh}{dia}$$

$$83800,66 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{pfebrer} =$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 3,67} \rightarrow E_n = 29096,94 \frac{Wh}{dia}$$

$$= 62850,50 \frac{Wh}{dia} = 62,85 \frac{kWh}{dia}$$

Mes de març:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 4,80} \rightarrow E_n = 32232,67 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{ntotal} = 109408,8 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 4,80} \rightarrow E_n = 39187,63 \frac{Wh}{dia}$$

$$109408,8 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{pmarç} =$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 4,80} \rightarrow E_n = 37988,5 \frac{Wh}{dia}$$

$$= 82056,6 \frac{Wh}{dia} = 82,06 \frac{kWh}{dia}$$

Mes d'abril:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 4,99} \rightarrow E_n = 33515,6 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{ntotal} = 113763,51 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 4,99} \rightarrow E_n = 40747,38 \frac{Wh}{dia}$$

$$113763,51 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{pabril} =$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 4,99} \rightarrow E_n = 39500,52 \frac{Wh}{dia}$$

$$= 85322,63 \frac{Wh}{dia} = 85,32 \frac{kWh}{dia}$$

Mes de maig:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 5,32} \rightarrow E_n = 35781,99 \frac{Wh}{dia}$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 5,32} \rightarrow E_n = 42171,63 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 5,32} \rightarrow E_n = 43502,81 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{ntotal} = 121456,43 \frac{Wh}{dia}$$

$$121456,43 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{p\text{maig}} = 91092,32 \frac{Wh}{dia} = 91,09 \frac{kWh}{dia}$$

Mes de juny:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 6,05} \rightarrow E_n = 40654,55 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{total} = 137995,58 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 6,05} \rightarrow E_n = 49426,74 \frac{Wh}{dia}$$

$$137995,58 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{p\text{juny}} =$$

$$= 103496,69 \frac{Wh}{dia} = 103,5 \frac{kWh}{dia}$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 6,05} \rightarrow E_n = 47914,29 \frac{Wh}{dia}$$

Mes de juliol:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 6,05} \rightarrow E_n = 40639,67 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{total} = 137945,05 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 6,05} \rightarrow E_n = 49408,64 \frac{Wh}{dia}$$

$$137945,05 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{p\text{juliol}} =$$

$$= 103458,79 \frac{Wh}{dia} = 103,46 \frac{kWh}{dia}$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 6,05} \rightarrow E_n = 47896,75 \frac{Wh}{dia}$$

Mes d'agost:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 5,23} \rightarrow E_n = 35116,09 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{total} = 119192,74 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 5,23} \rightarrow E_n = 42692,01 \frac{Wh}{dia}$$

$$119192,74 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{p\text{agost}} =$$

$$= 89394,56 \frac{Wh}{dia} = 89,39 \frac{kWh}{dia}$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 5,23} \rightarrow E_n = 41385,64 \frac{Wh}{dia}$$

Mes de setembre:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 5,46} \rightarrow E_n = 36707,04 \frac{Wh}{dia}$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 5,46} \rightarrow E_n = 43261,87 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 5,46} \rightarrow E_n = 44627,46 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{total} = 124596,39 \frac{Wh}{dia}$$

$$124596,39 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{psetembre} = 93447,27 \frac{Wh}{dia} = 93,45 \frac{kWh}{dia}$$

Mes d'octubre:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 4,03} \rightarrow E_n = 27055,58 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{ntotal} = 91835,96 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 4,03} \rightarrow E_n = 32893,46 \frac{Wh}{dia}$$

$$91835,96 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{pocembre} =$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 4,03} \rightarrow E_n = 31886,93 \frac{Wh}{dia}$$

$$= 68876,97 \frac{Wh}{dia} = 68,88 \frac{kWh}{dia}$$

Mes de novembre:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 3,02} \rightarrow E_n = 20292,7 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{ntotal} = 68880,43 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 3,02} \rightarrow E_n = 24671,34 \frac{Wh}{dia}$$

$$68880,43 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{pnovembre} =$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 3,02} \rightarrow E_n = 23916,4 \frac{Wh}{dia}$$

$$= 51660,33 \frac{Wh}{dia} = 51,66 \frac{kWh}{dia}$$

Mes de desembre:

$$32 = \frac{E_n}{210 \cdot 2,37} \rightarrow E_n = 15934,53 \frac{Wh}{dia}$$

$$E_{ntotal} = 54087,3 \frac{Wh}{dia}$$

$$38 = \frac{E_n}{215 \cdot 2,37} \rightarrow E_n = 19372,79 \frac{Wh}{dia}$$

$$54087,3 = \frac{E_p}{0,75} \rightarrow E_{pdesembre} =$$

$$36 = \frac{E_n}{220 \cdot 2,37} \rightarrow E_n = 18779,98 \frac{Wh}{dia}$$

$$= 40565,48 \frac{Wh}{dia} = 40,57 \frac{kWh}{dia}$$

## 5.3. Annex III: Índex de figures

Figura 1. Potència acumulada dels països de la Unió Europea en els anys 2010 i 2020. Font: European Photovoltaic Industry Association (EPIA). .....	9
Figura 2. Potència acumulada de diferents països fins el 2010. Font: EPIA .....	10
Figura 3. Potència fotovoltaica acumulada a Espanya entre el 2000 i el 2020. Font: Asociación de la Industria Fotovoltaica (ASIF). .....	11
Figura 4. Esquema de l'efecte fotovoltaic .....	13
Figura 5. Cèl·lula fotovoltaica .....	13
Figura 6. Semiconductor tipus N.....	14
Figura 7. Semiconductor tipus P. ....	14
Figura 8. Cèl·lula de silici monocristal·lí. Font: Solar Power Notes .....	14
Figura 9. Cèl·lula de silici policristal·lí. Font: Solarpv-co.uk .....	14
Figura 10. Cèl·lula de làmina prima. Font: ThomasNet.....	15
Figura 11. Cèl·lula d'alta eficiència. Font: Larkinized.....	16
Figura 12. Cèl·lula solar orgànica. Font: Greentechmedia .....	16
Figura 13. Instal·lació autònoma. Font: Solcaisur .....	17
Figura 14. Instal·lació connectada a la xarxa elèctrica.....	18
Figura 15. Mòdul fotovoltaic. Font: GeoSolution.....	19
Figura 16. Corba I-V. Font: ITACAnet.....	19
Figura 17. Corba I-V segons la irradiació. Font: ITACAnet .....	20
Figura 18. Corba I-V segons la temperatura. Font: ITACAnet .....	20
Figura 19. Bateria. Font: zeliangindustry .....	20
Figura 20. Regulador. Font: SoloStocks .....	20
Figura 21. Inversor. Font: Ecoesfera.....	21
Figura 22. Emplaçament de la instal·lació. Font: Google Maps .....	24
Figura 23. Plànol d'implantació de la instal·lació solar fotovoltaica. Font: ICF Equipaments.....	25
Figura 24. Edifici de l'Institut del Voltreganès .....	26
Figura 25. Imatge de les plaques fotovoltaïques. ....	26
Figura 26. Mòdul ES-E. Font: Evergreen Solar.....	26
Figura 27. Inversor Sunway Font: Sunway .....	26
Figura 28. Declinació. Font: AGS Astronomy.....	27
Figura 29. Representació de l'angle zenital, azimutal i d'alçada solar .....	30
Figura 30. Irradiació solar a l'Institut del Voltreganès.....	36



Figura 31. Comparació de l'energia produïda amb l'energia gastada. Font: IES del Voltreganès .....	38
Figura 32. Energia produïda per a la instal·lació en kWh/dia i en kWh/mes .....	39
Figura 33. Energia elèctrica gastada per l'Institut del Voltreganès (kWh/dia). Font: Institut del Voltreganès .....	40
Figura 34. Energia elèctrica gastada per l'Institut del Voltreganès en kWh/dia i en kWh/mes.....	40
Figura 35. Mapa d'irradiació global diària, mitjana anual (MJ/m <sup>2</sup> ). Font: Servei Meteorològic de Catalunya.....	46
Figura 36. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de gener (MJ/m <sup>2</sup> ).....	47
Figura 37. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de febrer (MJ/m <sup>2</sup> ) .....	47
Figura 38. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de març (MJ/m <sup>2</sup> ).....	48
Figura 39. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes d'abril (MJ/m <sup>2</sup> ) .....	48
Figura 40. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de maig (MJ/m <sup>2</sup> ).....	49
Figura 41. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de juny (MJ/m <sup>2</sup> ).....	49
Figura 42. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de juliol (MJ/m <sup>2</sup> ).....	50
Figura 43. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes d'agost (MJ/m <sup>2</sup> ) .....	50
Figura 44. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de setembre (MJ/m <sup>2</sup> )...	51
Figura 45. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de octubre (MJ/m <sup>2</sup> ).....	51
Figura 46. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de novembre (MJ/m <sup>2</sup> )..	52
Figura 47. Mapa d'irradiació global diària, mitjana del mes de desembre (MJ/m <sup>2</sup> ) ..	52

## 5.4. Annex IV: Glossari

**Angles complementaris:** La suma dels dos angles té com a resultat  $90^\circ$ .

**Excentricitat:** Quocient de la distància entre els dos focus i el diàmetre principal en una el·lipse o hipèrbola. Si el valor és més igual a zero, la figura s'assembla més a una circumferència; si és superior a zero però inferior a 1, és una el·lipse; si és 1, és una paràbola; si és superior a 1, és una hipèrbola; i si és infinit, és una recta. Pel que fa al moviment dels cossos celestes, els valors es mouen entre el zero i l'1.

**Fotó:** Partícules energètiques que la seva energia és proporcional a la freqüència a la qual vibren. Aquestes partícules componen tota la radiació electromagnètica i són les partícules que absorbeix la cèl·lula fotovoltaica

**Hores solars pic:** Temps que trigaria el mòdul en generar l'electricitat de tot un dia si la irradiació solar fos  $1000 \text{ W/m}^2$  i sigues constant. La seva unitat és l'hora (h).

**Hort solar** (també anomenat horta solar): conjunt d'instal·lacions fotovoltaïques en el mateix terreny i amb diferents titulars. La potència d'una instal·lació en un hort solar varia entre 5 i 100 kW.

**Intensitat** (també anomenada corrent): Quantitat d'electrons que passen per unitat de temps. La seva unitat és l'ampere (A).

**Oblià:** Disc molt prim, tallat d'una barra cilíndrica de silici monocristal·lí, utilitzat com a substrat per a la fabricació de circuits integrats o cèl·lules fotovoltaïques.

**Pla equatorial:** Pla perpendicular a l'eix de rotació de la Terra.

**Pla horitzontal:** Superfície plana horitzontal que passa per la vista de l'espectador i determina una recta, la línia de l'horitzó.

**Pla meridional:** Pla vertical que passa per l'eix de la Terra.

**Potència :** Magnitud escalar que mesura l'afany que manifesta el sistema per executar un treball. És la relació entre l'energia o treball amb el temps. La seva unitat és el watt (W).

**Potència pic:** potència màxima del mòdul solar en condicions estàndards de mesura (CEM). La seva unitat és el watt pic (Wp).

**Rendiment:** Relació entre l'energia útil i la consumida, o potència útil i consumida.

**Semiconductor:** Material amb una resistivitat elèctrica intermèdia entre els conductors i els aïllants.

**Voltatge** (també anomenat tensió o diferència de potencial): Treball efectuat sobre una càrrega unitària en traslladar-la d'un punt a un altre. La seva unitat és el volt (V).