



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

# Sistemes fotovoltaics en vies de transport rodat. Estudi de la capacitat de producció en dos municipis de Lleida.

Autor: Francisca Balle Llabrés

Tutor: Dr. Jordi Andreu Batallé

Curs acadèmic: 2015-2016

Màster en Energies Renovables i  
Sostenibilitat Energètica

Dos Campus d'Excel·lència Internacional:





# Agraïments

---

Agrair en primer lloc al Dr. Jordi Andreu per la seva ajuda i dedicació en la realització d'aquest treball, així com la seva disponibilitat per tal de resoldre els dubtes que se'm generaven.

Per altra banda, agrair molt especialment a la meva família i amics pel suport i paciència en tot el procés.

*Ara l'amor me diu que és primavera  
i jo m'ho crec. Me'n ric del calendari.*

# Índex

---

1. Introducció .....	1
1.1. Fonaments de l'energia solar fotovoltaica.....	1
1.2. Antecedents .....	2
1.3. Justificació .....	4
1.4. Objectius .....	5
1.5. Abast i Metodologia .....	6
2. Sistema fotovoltaic.....	10
3. Escenaris.....	13
3.1. Les Borges Blanques.....	13
3.2. Tàrrega .....	16
4. Resultats i discussió.....	20
4.1. Les Borges Blanques.....	20
4.2. Tàrrega .....	23
4.3. Comparativa dels municipis .....	26
5. Conclusions.....	28
6. Abstract .....	29
7. Bibliografia .....	30
8. Annexos.....	31
8.1. Ortofotomapes dels municipis .....	32
8.2. Mapa de carreteres dels municipis .....	33
8.3. Informació del mòdul fotovoltaic.....	34
8.4. Exemple de càlcul de la potència nominal del sistema per a la hipòtesi A.....	36

# 1. Introducció

---

La gran pressió antròpica a la que ha estat sotmesa la terra els últims segles ha alterat l'equilibri dinàmic del planeta, cosa que ha provocat un conjunt de problemàtiques ambientals que amenacen l'entorn i generen impactes negatius sobre el medi natural i social. En les darreres dècades, la societat ha pres consciència de la sobreexplotació dels recursos i del seu esgotament, reclamant un model més sostenible.

El model energètic és un dels factors més importants en el desenvolupament dels conflictes ambientals i socioeconòmics actuals així com en la seva possible resolució.

Els grans reptes a solucionar a curt i mig termini amb un canvi de sistema energètic són, entre d'altres: la contaminació del medi amb elements nocius per a la salut, l'emissió de gasos d'efecte hivernacle i altres contaminants del medi natural, l'esgotament físic dels recursos fòssils, el procés cada cop més costós d'extracció i producció dels mateixos, la gran dependència exterior, les creixents restriccions ambientals i l'augment continuat de la demanda energètica deguda a l'augment de la població i a la major industrialització dels països emergents.

Per tant, es busquen alternatives per a subministrar l'energia necessària a la població per tal de mantenir la qualitat de vida actual, avançant cap a un model més sostenible.

Les energies renovables semblen ser la solució als problemes esmentats ja que permeten assolir aquests reptes, assegurant el subministrament energètic alhora que respectant els criteris de sostenibilitat i reduint l'impacte sobre el medi ambient i la dependència exterior.

## 1.1. Fonaments de l'energia solar fotovoltaica

La radiació electromagnètica emesa pel Sol que arriba a la Terra dirigeix els cicles biofísics, geofísics i químics que permeten mantenir la vida al planeta. De la mateixa manera l'energia solar permet regular els cicles del carboni, de l'aigua, de l'oxigen i el clima terrestre.

Tot i que la distància entre la Terra i el Sol -i, per tant, l'energia que arriba- va variant al llarg de l'any, es considera que a les capes exteriors de l'atmosfera hi arriben  $1367 \text{ W/m}^2$ . Aquesta radiació es redueix fins a  $1000 \text{ W/m}^2$  (irradiància de referència) un cop travessada l'atmosfera (Espejo, 2004).

Per tant, l'energia solar és una energia renovable obtinguda de l'aprofitament d'aquesta radiació electromagnètica que arriba del Sol.

L'energia solar ha estat utilitzada per la humanitat al llarg de la seva història per a satisfer les seves necessitats. Actualment es pot aprofitar aquesta energia amb tècniques passives o actives. Les passives s'emmarquen en les anomenades tècniques d'arquitectura bioclimàtica, permetent un ús més eficient dels recursos gràcies al millor aprofitament de la llum i calor proporcionades pel Sol. En canvi l'aprofitament actiu pot ser tèrmic, transformant l'energia solar en energia calorífica, o fotovoltaic, convertint directament l'energia solar en energia elèctrica gràcies a l'efecte fotovoltaic.

Els fotons tenen associada una certa energia, determinada per la seva freqüència o longitud d'ona. Si un fotó incideix sobre un material i l'energia que té és superior a la necessària per

arrencar l'electró de l'àtom (energia o freqüència lliurar), l'àtom absorbeix l'energia del fotó i allibera un electró amb certa energia cinètica -la diferència entre l'energia del fotó i l'energia umbral-, creant un buit a l'àtom. Aquest electró habitualment trobarà un altre buit per a col·locar-se. En aquest cas, però, el material utilitzat és l'anomenada cèl·lula solar o cèl·lula fotovoltaica, fabricada amb material semiconductor dopat, obligant els electrons i els buits a avançar cap al costat contrari del material enlloc de recombinar-se i aconseguint la generació d'una diferència de potencial.

Per tal d'assolir aquest objectiu, es crea un camp elèctric a través d'una unió pn entre dues capes dopades p i n.

En la capa dopada n se li canvia un àtom de silici per un altre amb un electró més que s'afegeix a la capa de conducció. El material és elèctricament neutre però té més presència d'electrons.

En la capa dopada p, un àtom de silici es substitueix per un amb menys electrons, quedant un buit. La capa també és elèctricament neutre però amb buits positius.

Quan s'uneixen les capes dopades p i n, es crea un camp elèctric per l'efecte de difusió. Els electrons lliures de n aniran cap a p i es recombinaran amb els buits de la zona p, generant així una càrrega positiva a la regió n i una càrrega negativa a la regió p (González, 2009).

Gràcies a l'efecte del dopatge de les capes i la creació de camp elèctric es facilita la creació d'una diferència de potencial i, per tant, de tensió entre les dues parts del material. Així, la cèl·lula fotovoltaica actua com una pila.

Llavors, aquestes cèl·lules s'uneixen per tal de formar els panells o mòduls fotovoltaics.

## 1.2. Antecedents

Una de les preocupacions constants de l'aplicació de sistemes a gran escala d'energia fotovoltaica és la gran quantitat de superfície necessària i la limitada disponibilitat d'aquesta. Per aquest motiu és interessant buscar aplicacions alternatives que no requereixin espai addicional. Exemples d'aquestes alternatives són la integració fotovoltaica en edificacions i els sistemes agrovoltaics (Vallati, 2015). Una altra possibilitat, molt emprada als països europeus des de 1989, són les instal·lacions fotovoltaiques integrades en les barreres acústiques dels marges de les carreteres (PVNB per les seves sigles en anglès). En aquests sistemes, les barreres acústiques serveixen d'estructura per al sistema fotovoltaic. Per tant, aquests sistemes de producció d'energia renovable no ocupen espai addicional i alhora contribueix a la reducció de la contaminació acústica produïda pel transport rodat (Nordmann, 2004).

Els PVNB s'aplica habitualment al llarg de carreteres en zones densament poblades per diferents motius. Per començar les vies de transport més grans d'aquestes zones ja solen presentar barreres acústiques ja que la població es veu molt afectada per aquesta contaminació. En segon lloc, en aquestes zones no hi ha molt d'espai disponible per a implantar instal·lacions fotovoltaiques estàndards cosa que fa més necessària l'aplicació de muntatges alternatius. Finalment, la producció energètica propera al punt de consum presenta nombrosos avantatges com són la reducció dels costos de transport, estalvi d'energia primària i disminució de les emissions de CO<sub>2</sub> i altres gasos contaminants (De Schepper, 2012).

Altres importants avantatges (Remmer, 2005) d'aquest sistema són:

- Augment de la viabilitat de projectes fotovoltaics gràcies a la reducció de costos del sistema.
- Reducció dels costos de les barreres acústiques.
- Doble ús de la terra dels marges de les vies de transport (protecció de la contaminació acústica i producció d'energia renovable).
- Fàcil accés per a la instal·lació i el manteniment.
- Permet aplicació en zones densament poblades on és requereix tant la reducció del so del transport com la producció d'electricitat.
- No és necessari l'ús de bateries ja que són sistemes connectats a la xarxa que aboquen directament l'energia produïda.

La primera integració de plaques solars fotovoltaïques a les barreres acústiques de grans vies de transport rodats es va realitzar a Suïssa el 1989. Alguns exemples d'aplicació dels PVNB s'expliquen a continuació.

### Chur A13 - Suïssa

Fou la primera instal·lació fotovoltaïca en barreres acústiques. S'instal·là l'any 1989 a l'autopista A13, prop del municipi de Chur (Suïssa), al llarg de 800 m (PV Resources). El sistema té una potència nominal d'uns 100 kW i consta de 2208 mòduls ocupant una superfície total de 968 m<sup>2</sup>. Produeix més de 100 MWh anuals d'electricitat, que és abocada a la xarxa pública. Més de 20 anys després de la seva posada en funcionament, la instal·lació continua operant correctament (Snow, 2000).



Figura 1. PVNB a Suïssa. Font: PVresources.

### Ouderkerk A9 - Països Baixos

Un gran sistema fotovoltaïc es va integrar l'any 1998 a l'autopista A9, al llarg de 1650 metres de barrera acústica (van der Borg, 2001), prop de Ouderkerk aan de Amstel (Amsterdam, Països Baixos). La instal·lació té una potència nominal de 220 kW i consta de 2160 mòduls fotovoltaïcs que ocupen una àrea total de 2200 m<sup>2</sup> i produeixen 176 MWh elèctrics anualment (PV Resources).



Figura 2. PVNB als Països Baixos. Font: PVresources.

## Altres

Altres exemples (Snow, 2000) d'instal·lacions PVNB a Europa són:

*Taula 1. Exemples de sistemes de PVNB. Font: Snow, 2000.*

Via de transport	País	Any	Potència nominal
A1 - Seewalchen	Àustria	1992	40 kW
A23 - Rellingen	Alemanya	1992	30 kW
A2 - Giebenach	Suïssa	1995	104 kW
A6 - Saarbrücken	Alemanya	1995	60 kW
A27 - Utrecht	Països Baixos	1995	55 kW
A96 - Ammersee	Alemanya	1997	30 kW
A1 - Zürich	Suïssa	1997	30 kW

## 1.3. Justificació

Com s'ha explicat anteriorment, la forta pressió antròpica dels últims segles ha alterat l'equilibri natural del planeta i ha generant nombroses problemàtiques ambientals i socials.

Un dels principals problemes és el subministrament energètic i la sobreexplotació dels recursos. En els últims anys s'ha anat prenent consciència de la reducció física dels recursos fòssils –en els darrers segles aquests han representat la font energètica per excel·lència- i de la seva major dificultat d'extracció, per l'increment del cost econòmic i les limitacions tecnològiques (Abad, 2015).

Les energies renovables són respectuoses amb el medi ambient i permeten reduir la dependència energètica exterior. Per tant, representen un nou model energètic més sostenible i, tot i que no se n'obté el mateix rendiment que dels combustibles tradicionals, s'està avançant molt en aquest camp (Parés, 2010).

Un dels major problemes de les energies renovables és la gran quantitat de superfície que requereixen. Per aquest motiu es busquen altres opcions que no suposin el consum d'espai lliure, com són els sistemes fotovoltaics en les barreres acústiques de les grans vies de transport en el seu pas per zones poblades.

Ja s'han comentat els avantatges dels PVNB però també presenten certes limitacions:

- S'aplica bàsicament en zones densament poblades ja que aquestes solen presentar o requerir barreres acústiques.
- El mateix passa en la mida de les carreteres, només s'aplica en grans vies de transport rodat com són les autopistes.

Per tal de superar aquestes limitacions, en aquest projecte es proposa l'aplicació de sistemes de generació fotovoltaics directament al sòl dels marges de les carreteres. En aquest cas, doncs, els principals avantatges de la instal·lació serien:



- L'aplicació del sistema es realitza en una zona ja ocupada del terreny, sense utilitzar espai lliure.
- Reducció dels costos de transport i l'estalvi d'energia primària.
- Producció d'energia renovable i respectuosa amb el medi, amb la corresponent disminució de les emissions de CO<sub>2</sub> i altres gasos contaminants.
- No és necessari que la carretera compti amb barreres acústiques ni que se n'instal·lin, a diferència dels PVNB.
- Fàcil accés per a la instal·lació i el manteniment.
- No és necessari l'ús de bateries ja que són sistemes connectats a la xarxa que aboquen directament l'energia produïda.
- No s'apliquen únicament en zones densament poblades sinó que també es poden instal·lar en les carreteres de petits municipis, al contrari que els sistemes PVNB.
- De la mateixa manera, les vies de transport on s'emplaci el sistema poden ser de qualsevol mida, des de petites carreteres locals fins a grans autopistes, a diferència dels sistemes fotovoltaics integrats en barreres acústiques.

Per tots aquests motius s'ha decidit estudiar la viabilitat de l'aplicació de plaques solars fotovoltaïques muntades sobre el sòl als marges de les carreteres. S'ha realitzat un estudi –a gran escala– en dos municipis de la província de Lleida amb diferents habitants –un més poblat i un altre municipi amb menor població– per tal de comparar la seva capacitat de generació elèctrica i les seves possibilitats d'autoabastiment.

## 1.4. Objectius

### Generals

- Estimar la capacitat de producció d'energia elèctrica de dos municipis de Catalunya (un més poblat i un menys) a partir de la instal·lació de mòduls solars fotovoltaics als marges de les vies de transport rodat.
- Estimar la capacitat d'autoabastiment elèctric a partir de la instal·lació fotovoltaica en els dos municipis estudiats.

### Específics

- Estudiar altres sistemes d'aplicació d'energia fotovoltaica a les vies de transport.
- Caracteritzar les carreteres de cada municipi aptes per a la implantació del sistema.
- Establir les possibilitats de superfície i capacitat d'instal·lació d'energia fotovoltaica a través de diferents hipòtesis.
- Comparar l'energia obtinguda en cada cas i les possibilitats d'autoabastiment.
- Estimar de la demanda elèctrica de cada un dels municipis.
- Estimar l'estalvi de tones equivalents de petroli i de CO<sub>2</sub> emès a l'atmosfera.

## 1.5. Abast i Metodologia

### Escenaris

Per a començar l'estudi s'han seleccionat dos municipis de la província de Lleida: Les Borges Blanques i Tàrraga.

El primer presenta una població de 6019 habitants, mentre que Tàrraga en té 16444 (IDESCAT). Per tant, s'estudiarà la implantació del sistema en un municipi més poblat i en un altre amb menys residents, tot i que cap dels dos té la consideració de gran ciutat.

Les eines utilitzades bàsicament per a l'anàlisi i tractament de dades geogràfiques i numèriques han estat el software ArcGis i el Microsoft Excel.

El procés comença descarregant els ortofotomapes dels dos municipis des de la web de l'Institut Cartogràfic de Catalunya, com es pot veure en l'Annex 8.1. Un cop oberts en l'ArcGis, s'hi ha sobreposat la capa de carreteres de Catalunya, descarregada de la web del Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya. A continuació s'ha retallat aquesta capa, deixant només les vies de transport rodat de dins el terme municipal corresponent, com s'observa en l'Annex 8.2.

Un cop marcades les carreteres del municipi, s'ha procedit a descartar totes aquelles zones inservibles per a l'objectiu d'aquest treball.

Primer s'han descartat tots aquells trams de carreteres que circulen per dins nuclis urbans i polígons industrials, ja que en aquestes zones hi ha massa ombres provocades pels edificis. Per tant, la millor opció per aquests espais seria la instal·lació fotovoltaica integrada en les edificacions, cosa que no és objecte d'aquest projecte.

Seguidament es descarten també altres trams de carreteres per dos criteris bàsics:

1. Seguretat vial: no es volen posar impediments a la bona visibilitat i correcta circulació dels vehicles, especialment en punts conflictius.
2. Dificultat tècnica: les zones d'elevada curvatura compliquen la instal·lació dels panells fotovoltaics, reduint la rendibilitat del sistema rentable.

Així doncs, també s'han exclòs del sistema les rotondes, els trams de canvis de sentit i els encreuaments amb nombroses vies. El conjunt final de carreteres que queda és el sistema d'estudi per a cada un dels municipis on s'instal·laran els panells i de cada una de les vies se'n mesura la longitud i l'amplada mitjana.

### Hipòtesis

Una vegada definits els dos sistemes d'estudi, s'han establert tres hipòtesis –de més optimista (A) a més conservadora (C)- per a cada una de les carreteres dels dos municipis, especificant quantes plaques (N) hi podria haver al costat de les vies de transport. Se n'han seleccionat entre 1 i 4, que es col·locarien en sèrie longitudinalment o, el que és el mateix, quantes fileres de panells es podrien emplaçar. De forma gràfica, el paràmetre N estableix:

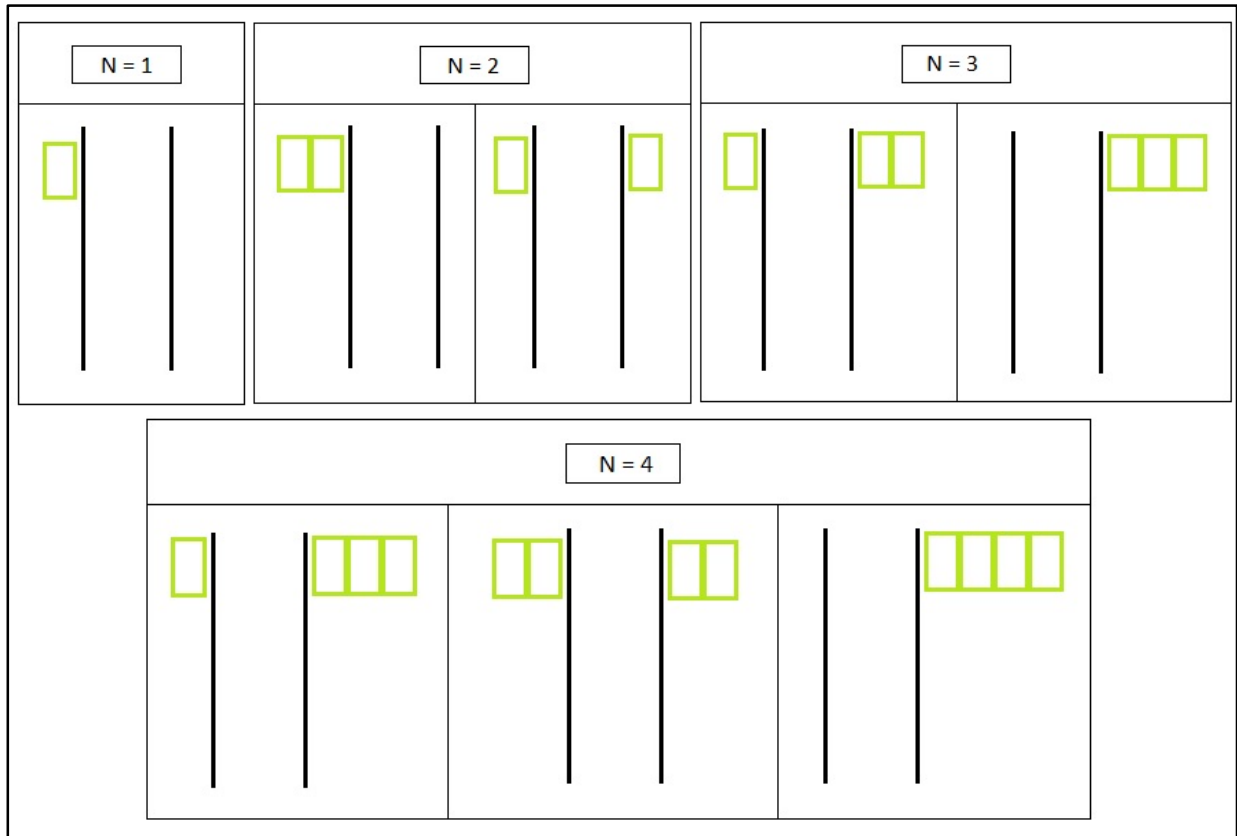


Figura 3. Paràmetre N de les hipòtesis. Elaboració pròpia.

Aquest paràmetre s'estableix de manera visual a partir de les imatges aèries i l'aplicació StreetView que permeten observar l'estat i els marges de les vies, però sempre partint de l'amplada total de la carretera en qüestió.

Juntament a aquest paràmetre, s'ha establert també el percentatge d'ocupació de la longitud dels marges, és a dir quin percentatge podria estar ocupat longitudinalment pel sistema. De manera general, com més plaques (N) es posin al marges, menys percentatge d'ocupació de la via, degut a que hi haurà més trams on seria impossible la col·locació d'aquestes. Com el valor de N, aquest factor s'estableix amb els mapes i imatges aèries que permeten conèixer la irregularitat de la carretera i els trams on es complicaria la instal·lació. Com a exemple gràfic:

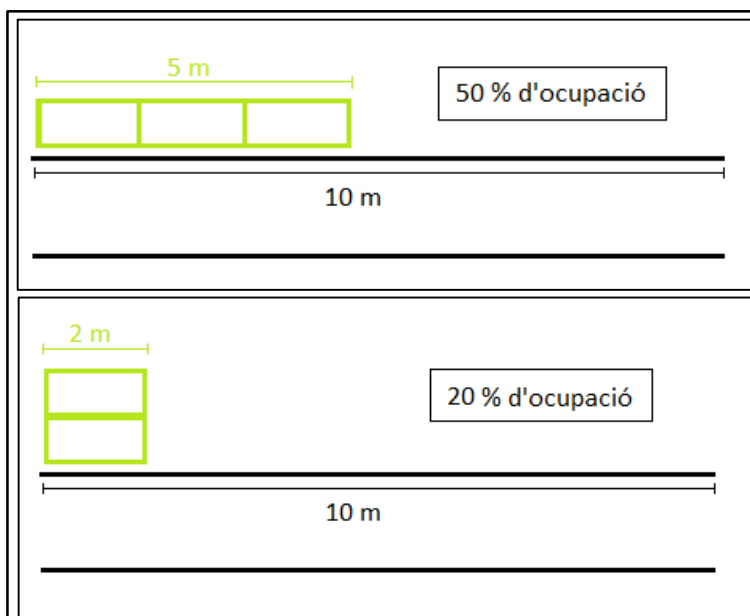


Figura 4. Paràmetre de percentatge d'ocupació. Elaboració pròpia.

Una vegada definits aquests paràmetres per a cada hipòtesi, s'ha calculat la potència nominal del sistema. Primer es multiplica el valor de  $N$  per la longitud de la carretera i es divideix per la longitud de la placa, per saber quants panells s'hi podrien emplaçar. Llavors s'arrodoneix aquest valor respecte 10 ja que a l'ondulador es posarien en sèries de 10 per obtenir una tensió total adequada. Aquestes són les plaques que teòricament es posarien als marges de la via però a continuació es multiplica pel percentatge d'ocupació escollit. Així s'obtenen les plaques reals que es col·locarien. Finalment es multiplica aquest número de panells per la potència nominal del model de panell seleccionat i es realitza el sumatori de totes les carreteres. Es repeteix el procés per a cada hipòtesi en els dos municipis i s'obté la potència nominal del sistema en cada cas.

### Selecció de la inclinació de la placa

Per a realitzar tots els càlculs s'ha de partir de la irradiància que arriba a la superfície terrestre en la inclinació seleccionada.

Per a decidir aquesta inclinació s'han de tenir en compte diversos factors:

- L'angle òptim en els dos municipis és de  $37^\circ$ , amb el qual s'obté la màxima producció
- La col·locació en aquest angle suposa una major dificultat tècnica del sistema i costos econòmics
- Per aquest motiu, com que no es compta amb barreres acústiques per a la instal·lació, es decideix reduir la inclinació dels panells per tal de disminuir els costos i augmentar la viabilitat del sistema
- Aquest menor angle no ha de suposar grans pèrdues de producció

Així doncs, primer s'ha estudiat la producció energètica en cada inclinació possible i s'ha confirmat que el màxim es troba als  $37^\circ$ . A continuació s'ha realitzat un anàlisi del percentatge de les pèrdues que representa cada un dels angles inferiors per tal de poder decidir quina serà la inclinació dels panells fotovoltaics.

### Producció d'electricitat

A continuació, a partir de la potència nominal calculada i les dades mensuals de temperatura i radiació solar mitjanes en la inclinació seleccionada -obtingudes del servidor europeu Climate SAF – PVgis-, es pot mesurar la producció d'electricitat en cada cas.

Primer es calcula el performance ratio del mòdul ( $PR_m$ ), un factor de correcció de l'eficiència del mòdul en base a unes condicions estàndard (STC: Massa de l'aire 1,5; Irradiància= $1000\text{W}/\text{m}^2$ ;  $T^\circ$  cèl·lula  $25^\circ\text{C}$ ) mitjançant l'equació:

$$PR_m = PR_0 \cdot [1 + (\alpha_{PT} \cdot (T_a - 25 + NOCT - 20))]$$

On " $\alpha_{PT}$ " és el coeficient de temperatura per a la potència màxima, " $T_a$ " és la temperatura ambient i " $NOCT$ " és la temperatura nominal d'operació del mòdul. Aquests valors estan definits pel panell.  $PR_0$  és el coeficient d'eficiència del mòdul per pèrdues del nivell d'irradiància i espectre i té un valor establert del 99%.

Seguidament es calcula el PR de tot el sistema ( $PR_f$ ) que té en compte les pèrdues dels components del sistema (per resistència al pas de corrent del cablejat, inversors, pèrdues per desajustos i transformadors). El coeficient que mesura aquestes pèrdues ( $PR_{bos}$ ) té un valor preestablert del 91%. Així doncs, només s'ha de multiplicar el  $PR_m$  pel  $PR_{bos}$  (0.91) per obtenir el  $PR_f$ .

Les dades d'irradiància mensual descarregades del servidor PVgis en la inclinació escollida es divideixen per la irradiància de referència ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) i es multipliquen pel número de dies de cada mes. Llavors només s'ha de fer el sumatori de tots els mesos i s'obté el Reference Yield ( $Y_r$ ), és a dir les hores equivalents a la irradiància de referència. Per tal d'obtenir el Yield del sistema ( $Y_f$ ) es multiplica el  $Y_r$  pel  $PR_f$  i es realitza el sumatori de tots els mesos (Marion, 2005).

Per acabar només s'ha de fer el producte del  $Y_f$  per la potència nominal de cada hipòtesi i ja es podrà conèixer la producció d'electricitat en cada cas.

### **Cobertura de la demanda**

Per a saber quin percentatge de la demana es podria cobrir amb aquest sistema primer s'ha realitzat una estimació de la demanda elèctrica dels dos municipis.

Partint de la dada del consum elèctric anual a l'estat espanyol del 2015 (REE), es divideix aquesta per la població total a Espanya el mateix any (INE) obtenint la demanda per habitant. Llavors es multiplica aquest valor per la població de cada municipi.

Finalment, després d'haver calculat la producció de cada hipòtesi i la demanda es pot conèixer el percentatge d'autoabastiment elèctric possible en cada escenari.

## 2. Sistema fotovoltaic

---

El sistema fotovoltaic està format per diferents components. En aquest cas, com que la instal·lació està connectada a la xarxa, els components bàsics són els panells fotovoltaics amb els seus corresponents suports, els onduladors (o inversors), els comptadors i el cablejat, que s'expliquen breument a continuació (Parés, 2010).

### Panells fotovoltaics

Els panells o plaques són estructures robustes formades per un conjunt de cèl·lules fotovoltaïques on es produeix l'efecte fotovoltaic i es genera electricitat a partir de la llum que hi incideix. L'electricitat produïda per la placa serà en corrent continua i amb un voltatge bastant baix.

Requereixen també unes estructures de suport, encarregades de fixar les plaques en la posició seleccionada, que han de poder suportar l'acció dels fenòmens meteorològics com el vent, la corrosió i l'aigua de pluja que pot provocar oxidació.

### Ondulador

Per tal d'adequar la corrent generada per a la seva injecció a la xarxa es requereix un ondulador o inversor. Aquest element s'encarregarà de convertir la corrent continua (CC) produïda pels panells en corrent alterna (CA) i en regularà la tensió de sortida per fer-la compatible amb la xarxa elèctrica i poder-l'hi abocar.

En aquests onduladors s'hi connecten les plaques en sèrie fins un valor establert de tensió. En aquest cas seran sèries de 10 panells.

### Comptador

Els comptadors s'encarreguen de mesurar l'energia elèctrica que passa per un punt determinat. En instal·lacions connectades a la xarxa elèctrica com aquest cas, el comptador es situa en el punt de connexió entre la instal·lació i la xarxa per tal de conèixer quanta energia elèctrica s'hi aboca.

### Cablejat

En el cablejat de la instal·lació s'hi diferencien dues parts: el que serveix d'interconnexió entre les plaques i el que connecta els panells amb l'ondulador i el comptador fins al punt de connexió amb la xarxa.

El conjunt del cablejat requereix unes condicions d'aïllament i protecció adequades.

### Selecció del mòdul

S'ha seleccionat un mòdul fotovoltaic de la marca **SunPower**, model **X21-345-COM**. Tota la informació general i tècnica es troba en les fitxes de l'Annex 8.3.

Aquest panell és un model d'alta eficiència que captura més llum solar i genera més energia elèctrica que els panells convencionals. Presenta un performance elevat i pràcticament no es veu afectat per la corrosió ni l'esquerdament.

Les característiques principals i les dimensions del mòdul són les següents:

Taula 2. Característiques del panell. Elaboració pròpia.

Dades elèctriques	Potència nominal (W)	345
	Eficiència	21.5
	Tensió nominal (V)	57.3
	Corrent nominal (A)	6.02
Dades de temperatura	Coefficient potència-temperatura (%/°C)	-0.30
	NOCT (°C)	41.5

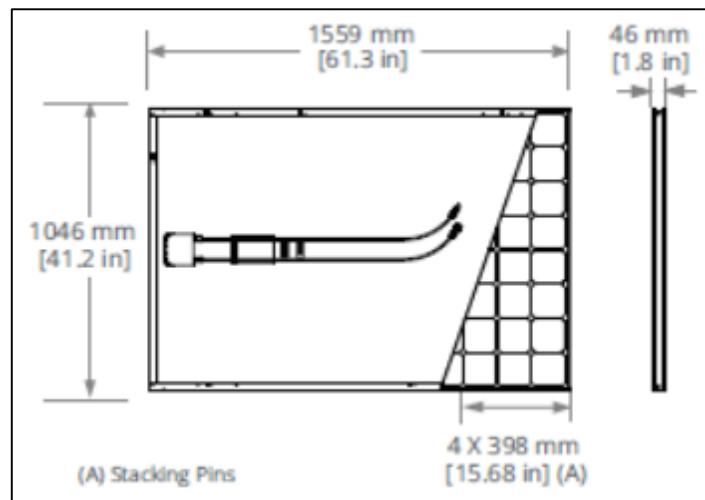


Figura 5. Dimensions del panell. Font: SunPower.

### Inclinació del panells

Per tal de seleccionar la inclinació, com s'ha explicat en la metodologia, s'ha calculat quina seria la producció d'energia per a cada angle. S'ha realitzat l'estimació només per una hipòtesi de cada municipi –la hipòtesi mitja (B)- ja que els resultats seran proporcionals per als tres escenaris.

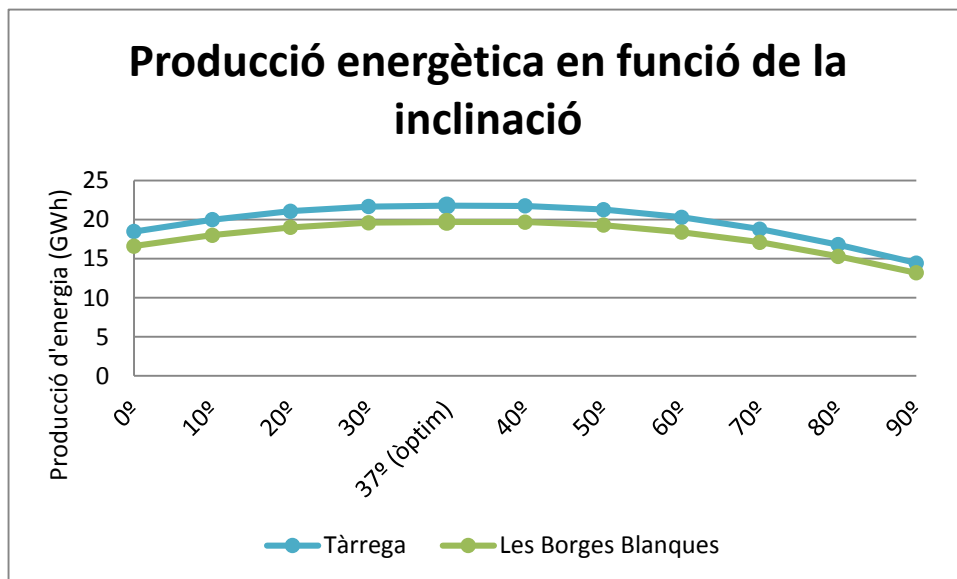


Figura 6. Generació elèctrica en funció de la inclinació. Elaboració pròpia.

S'observa clarament com el punt de màxima producció d'energia elèctrica anual correspon a una inclinació de 37°, la inclinació òptima anual. Si aquesta augmenta o disminueix la producció del sistema va minvant.

Les pèrdues per a inclinacions inferiors a l'òptim són:

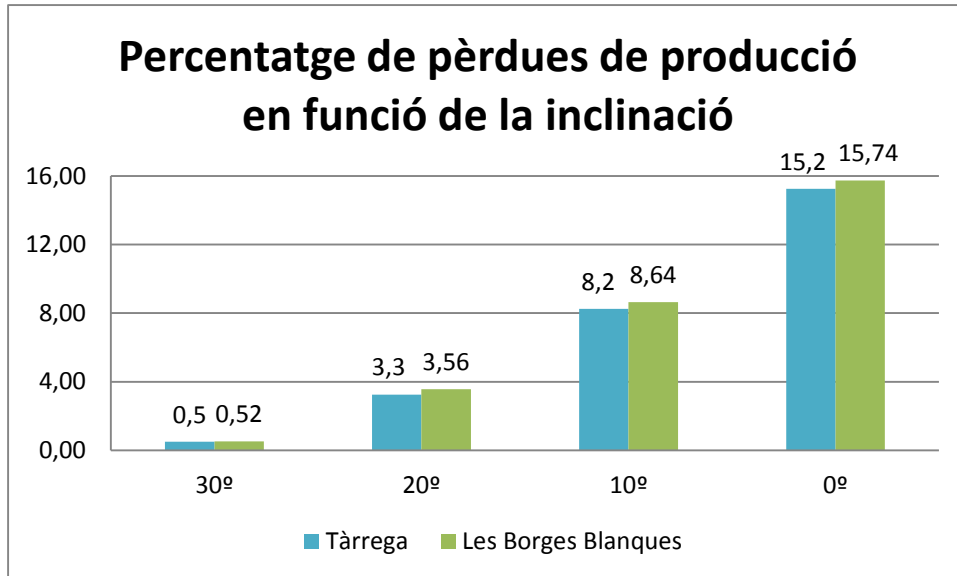


Figura 7. Percentatge de pèrdues en funció de la inclinació del panell. Elaboració pròpia.

Queda clar, doncs, que com més es redueix la inclinació dels panells més augmenta el percentatge de pèrdues respecte l'angle òptim.

Una inclinació de 10° provoca una producció un 8% inferior en els dos municipis, però aquesta és tolerable gràcies a la major facilitat d'instal·lació i permet la col·locació d'un major nombre de panells. En el cas de la inclinació òptima, hi hauria moltes més zones on la instal·lació es veuria complicada per la presència de corbes, especialment si s'intenta orientar els mòduls cap al sud, en la mesura del possible. La col·locació horitzontal de les plaques, en canvi, ja representa una reducció d'un 15% de la generació elèctrica, suposant una escassa producció energètica que ja no compensaria la millora dels costos d'instal·lació.

Per tant, es decideix instal·lar els mòduls amb un angle d'inclinació de 10° en els dos municipis.



## 3. Escenaris

---

### 3.1. Les Borges Blanques

#### Situació i característiques

Les Borges Blanques és una municipi de 61.85 km<sup>2</sup> de la província de Lleida que constitueix la capital de la comarca de Les Garrigues. Limita amb els termes de Cervià de les Garrigues, l'Albi, Vinaixa, la Floresta, Arbeca, Puiggròs, Juneda i Miravall. El terme està situat entre els 400 i 500 metres sobre el nivell del mar i es troba en la zona de contacte entre els sectors de reg del Canal d'Urgell i els altiplans de la Depressió Central (Ajuntament de Les Borges Blanques).



*Figura 8. Situació de la comarca de Les Garrigues. Font: Viquipèdia.*



*Figura 9. Situació de Les Borges Blanques dins la comarca. Font: Viquipèdia.*

La població censada al municipi a dia 01 de gener del 2015 és de 6019 habitants (IDESCAT). La població activa treballa principalment en el sector serveis i un 8% es dedica a l'agricultura tot i que en els últims anys el sector industrial s'ha vist impulsat per la creació dels polígons industrials de "Les Verdunes" i de "Castellots".

#### Mapes i selecció de carreteres

Seguint el procés explicat a la metodologia, s'han seleccionat les carreteres viables per a l'estudi, se n'ha mesurat la longitud i l'amplada i s'han realitzat tres hipòtesis.

S'ha de destacar, però, que del terme municipal de Les Borges Blanques només s'ha seleccionat la regió amb major superfície del municipi i s'ha descartat la zona petita que es troba aïllada de la resta ja que només correspon a una zona agrícola, sense cap nucli poblacional ni carreteres adequades. Per tant, la superfície de la zona d'estudi és de 53 km<sup>2</sup>.

De les vies totals s'han descartat les zones urbanes i els polígons industrials que s'observen en el següent mapa:

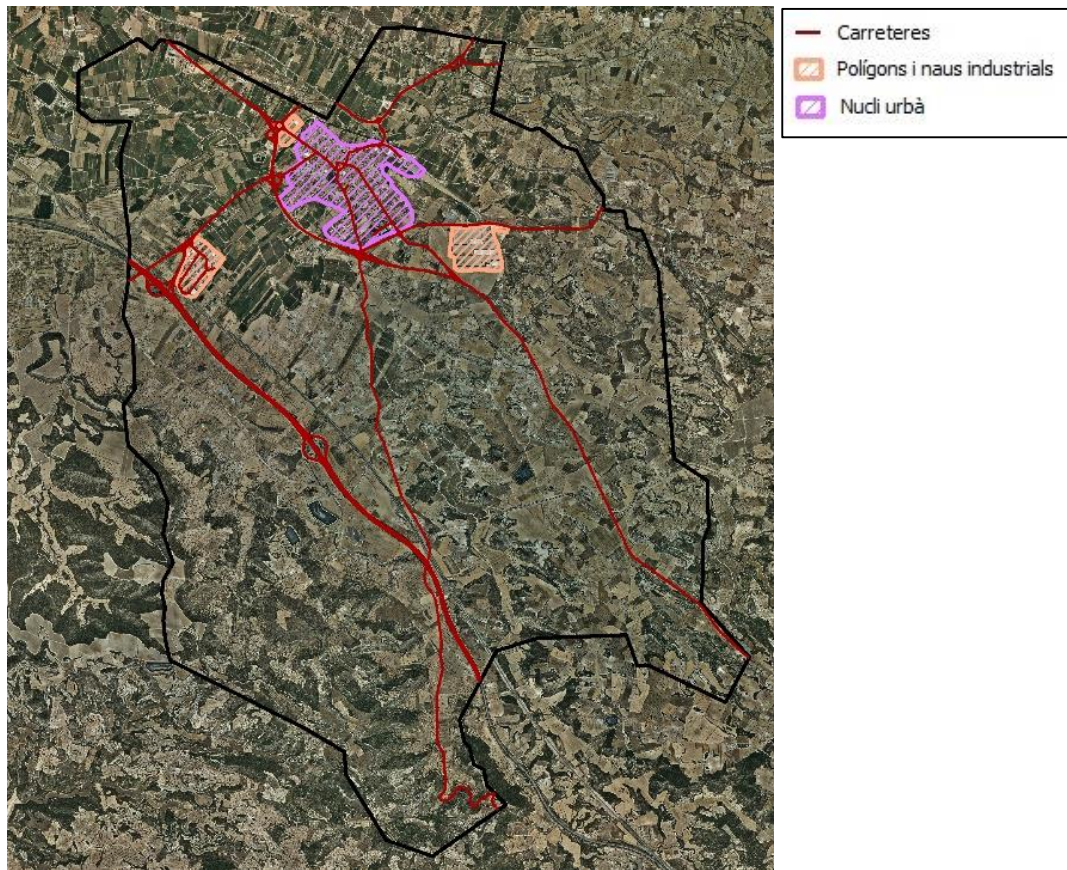


Figura 10. Mapa de les carreteres de Les Borges Blanques i les zones descartades. Elaboració pròpia.

Finalment, les carreteres que conformen el sistema on es realitzarà l'estudi són:

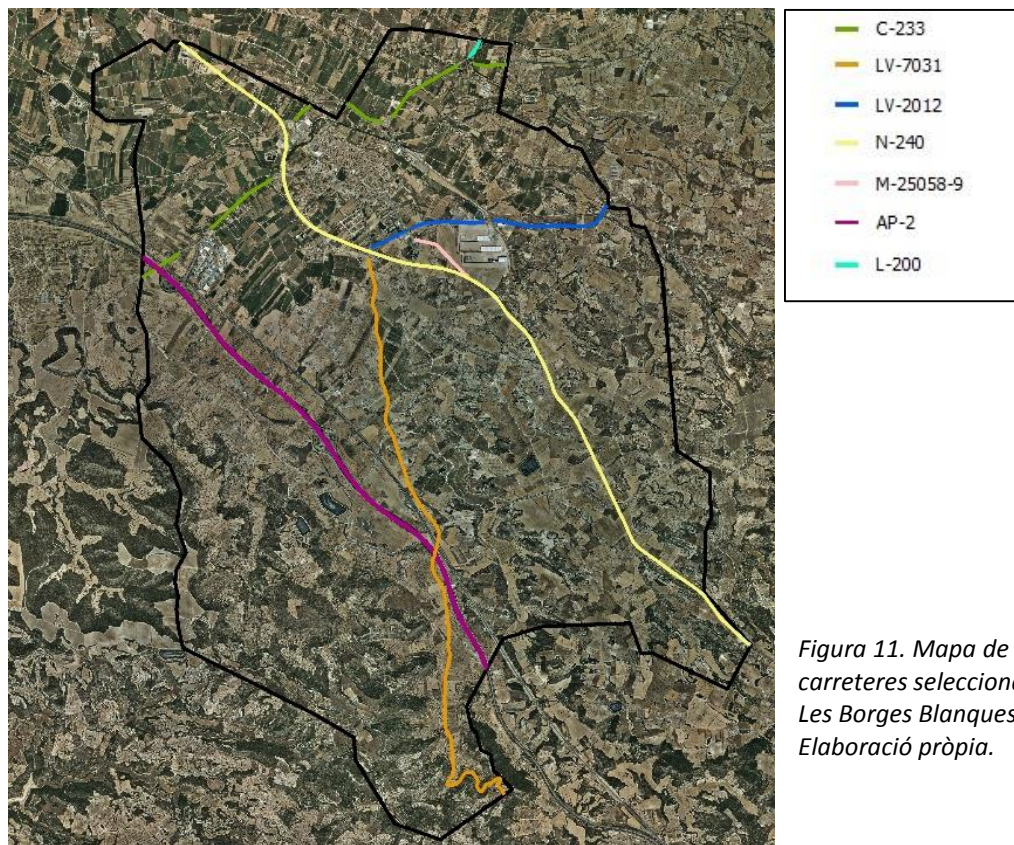


Figura 11. Mapa de les carreteres seleccionades a Les Borges Blanques. Elaboració pròpia.



El resultat obtingut són 7 vies de transport rodat amb les següents característiques:

*Taula 3. Carreteres seleccionades per a l'estudi a Les Borges Blanques. Elaboració pròpia.*

Via	Tipologia	Longitud (m)	Amplada mitjana (m)
LV-7031	Provincial	8320	8
L-200	Provincial	260	9
C-233	Comarcal	4470	10,3
AP-2	Autopista	6990	41,4
M25058-9	Local	870	8,65
N-240	Nacional	11370	11,1
LV-2012	Provincial	3060	9,3

### Hipòtesis

Per tal establir les hipòtesis es parteix d'una visió optimista sobre quantes plaques podríem col·locar als marges de les vies. De manera general això suposa un menor percentatge d'ocupació i així com es redueix N es pot augmentar l'ocupació.

*Taula 4. Hipòtesis del sistema a Les Borges Blanques. Elaboració pròpia.*

Via	Tipologia	Amplada mitjana (m)	Hipòtesis N plaques i % ocupació		
			(A) Optimista	(B) Realista	(C) Conservadora
LV-7031	Provincial	8	2   60 %	1   85 %	1   75 %
L-200	Provincial	9	2   70 %	1   90 %	1   80 %
C-233	Comarcal	10,3	3   60 %	2   70 %	1   85 %
AP-2	Autopista	41,4	4   75 %	3   80 %	2   85 %
M25058-9	Local	8,65	3   50 %	2   70 %	1   80 %
N-240	Nacional	11,1	3   60 %	2   75 %	1   85 %
LV-2012	Provincial	9,3	2   60 %	1   85 %	1   75 %

Una vegada s'han establert les tres hipòtesis es procedeix a calcular la potència nominal del sistema en cada cas seguint el procediment explicat a la metodologia. La llargària de la placa és de 1.559m i té una potència nominal de 345W. A mode d'exemple, es mostra el mètode per a la hipòtesi A en l'Annex 8.4.

De la mateixa manera s'ha calculat la potència nominal per a les altres dues hipòtesis i els resultats finals obtinguts són:

*Taula 5. Potència nominal del sistema en cada escenari a Les Borges Blanques. Elaboració pròpia.*

Hipòtesi A	14.3 MW
Hipòtesi B	11.3 MW
Hipòtesi C	7.7 MW

Un cop establertes les potències nominals del sistema en cada escenari es pot saber quina superfície ocuparien.

$$\text{Superfície sistema} = \frac{\text{Potència nominal sistema}}{\text{Potència nominal panell}} \cdot \text{Àrea panell}$$

A més, sabent que la superfície de la zona estudiada és de 53 km<sup>2</sup>, es pot establir el percentatge global d'ocupació.

Taula 6. Superfície del sistema en cada escenari i ocupació de Les Borges Blanques. Elaboració pròpia.

	Superfície del sistema	Ocupació del municipi
Hipòtesi A	6.8 Ha	0.13 %
Hipòtesi B	5.3 Ha	0.10 %
Hipòtesi C	3.6 Ha	0.07 %

S'observa que, tot i suposar una elevada presència de panells i amb molta ocupació, el percentatge d'ocupació global del terme municipal mai supera el 0.15%.

## 3.2. Tàrrrega

### Situació i característiques

Tàrrrega és un municipi de 88 km<sup>2</sup> situat a la plana de Lleida, a una altitud de 373 metres i és la capital de la comarca de l'Urgell. El terme presenta una població censada de 16.444 habitants, fa de llaç d'unió entre els altiplans de la Segarra i l'Urgell i comprèn a la vegada els pobles d'Altet, Claravalls, la Figuerosa, el Talladell, Riudovelles i Santa Maria de Montmagastrell. També inclou l'antic poblet de Conill, actualment deshabitat. Limita amb els municipis de Puigverd d'Agramunt, Ossó de Sió, Els Plans de Sió, Granyanella, Granyena de Segarra, Verdú, Vilagrassa, Anglesola, Barbens i Tornabous.

El sector de serveis és la principal activitat econòmica de la ciutat, on predominen les petites i mitjanes empreses. Sobresurt el sector del comerç, especialment el majorista i el de distribució (Ajuntament de Tàrrrega).



Figura 12. Situació de la comarca de l'Urgell. Font: Viquipèdia.

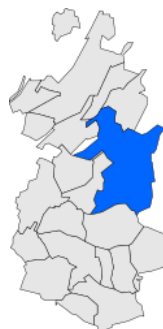


Figura 13. Situació de Tàrrrega dins la comarca. Font: Viquipèdia.

### Mapes i selecció de carreteres

Tal com s'ha fet amb el municipi de Les Borges Blanques, s'han seleccionat les carreteres viables per a l'estudi, se n'ha mesurat la longitud i l'amplada i s'han definit les tres hipòtesis.

Primer s'han descartat les zones urbanes i els polígons industrials:

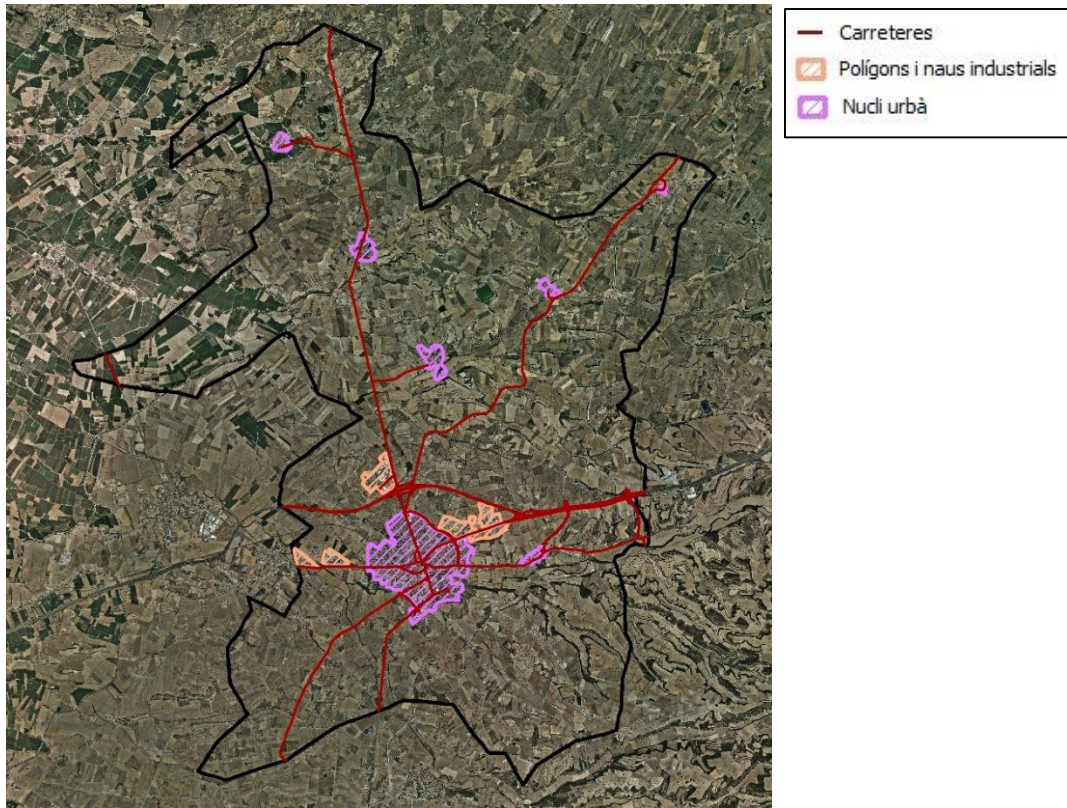


Figura 14. Mapa de les carreteres de Tàrraga i les zones descartades. Elaboració pròpia.

Per tant, les vies seleccionades per a l'aplicació són:

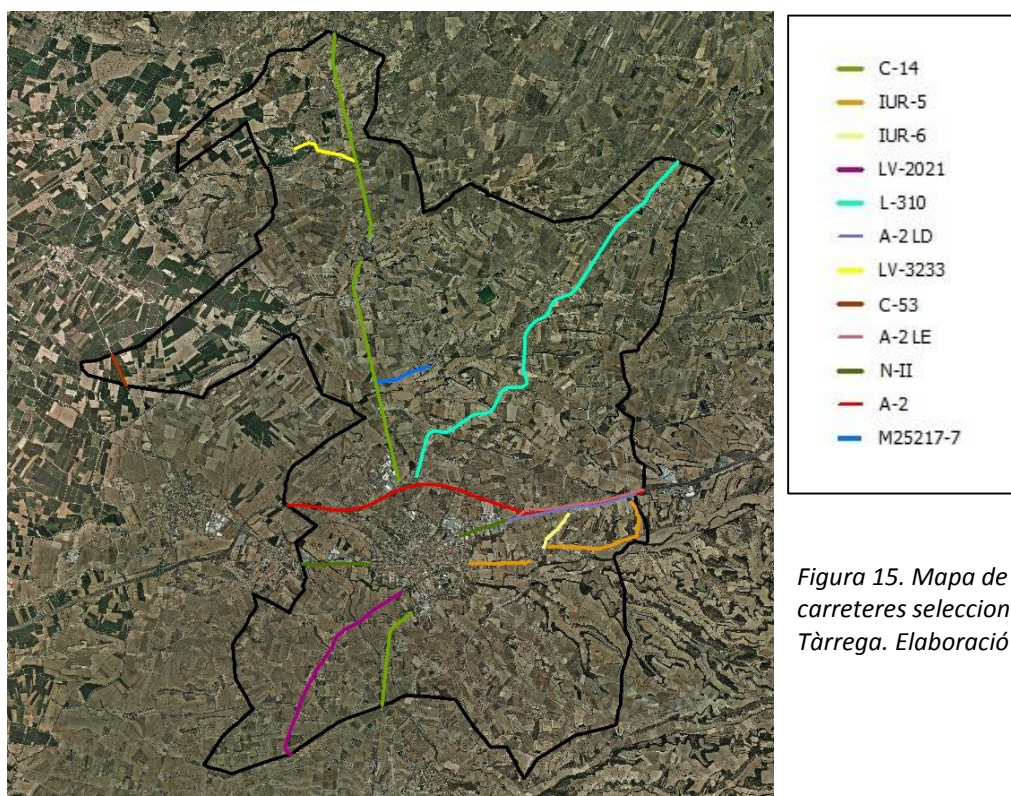


Figura 15. Mapa de les carreteres seleccionades a Tàrraga. Elaboració pròpia.



El resultat obtingut en aquest cas són 12 vies de transport rodant:

Taula 7. Carreteres seleccionades per a l'estudi a Tàrraga. Elaboració pròpia.

Via	Tipologia	Longitud (m)	Amplada mitjana (m)
M25217-7	Local	1127	5,10
A-2	Autopista de peatge	7251	27,43
N-II	Nacional	2298	11,86
A-2LE	Variant autopista	2579	7,30
C-53	Comarcal	659	8,50
LV-3233	Provincial	1329	5,80
A-2LD	Variant autopista	2563	6,78
L-310	Provincial	8811	9,38
LV-2021	Provincial	4160	7,52
IUR-6	Local	824	4,00
IUR-5	Local	3687	5,85
C-14	Comarcal	10554	8,56

## Hipòtesis

Igualment s'estableixen les hipòtesis del nombre de panells i el percentatge d'ocupació de les carreteres.

Taula 8. Hipòtesis del sistema a Tàrraga. Elaboració pròpia.

Via	Tipologia	Amplada mitjana (m)	Hipòtesis N i % d'ocupació		
			(A) optimista	(B) normal	(C) conservadora
M25217-7	Local	5,10	2   60 %	2   50 %	1   80 %
A-2	Autopista	27,43	4   70 %	3   75 %	2   85 %
N-II	Nacional	11,86	3   60 %	2   75 %	1   85 %
A-2LE	Variant autopista	7,30	2   60 %	1   85 %	1   75 %
C-53	Comarcal	8,50	2   70 %	1   90 %	1   80 %
LV-3233	Provincial	5,80	2   60 %	2   50 %	1   80 %
A-2LD	Variant autopista	6,78	2   60 %	1   85 %	1   75 %
L-310	Provincial	9,38	3   60 %	2   70 %	1   85 %
LV-2021	Provincial	7,52	2   60 %	1   85 %	1   75 %
IUR-6	Local	4,00	2   60 %	1   80 %	1   70 %
IUR-5	Local	5,85	2   60 %	2   50 %	1   80 %
C-14	Comarcal	8,56	2   70 %	1   90 %	1   80 %

A continuació es calcula la potència nominal del sistema en cada escenari. La placa té una longitud de 1.559m i una potència de 345W. A mode d'exemple, es mostra el mètode per a la hipòtesi A en l'Annex 8.4.

Els resultats finals per a les tres hipòtesis són:

Taula 9. Potència nominal del sistema en cada escenari a Tàrraga. Elaboració pròpia.

Hipòtesi A	16.7 MW
Hipòtesi B	12.6 MW
Hipòtesi C	9.6 MW

Seguidament es calcula la superfície que ocuparia el sistema en cada escenari:

$$\text{Superfície sistema} = \frac{\text{Potència nominal sistema}}{\text{Potència nominal panell}} \cdot \text{Àrea panell}$$

A més, es pot establir el percentatge global d'ocupació sabent que la superfície del terme municipal és de 88 km<sup>2</sup>:

Taula 10. Superfície del sistema en cada escenari i ocupació de Tàrraga. Elaboració pròpia.

	Superfície del sistema	Ocupació del municipi
Hipòtesi A	12.5 Ha	0.14 %
Hipòtesi B	9.4 Ha	0.11 %
Hipòtesi C	7.2 Ha	0.08 %

Igual que en el cas de Les Borges Blanques, cap de les hipòtesis representa una ocupació global del terme municipal superior al 0.15% de la seva superfície.

## 4. Resultats i discussió

### 4.1. Les Borges Blanques

#### Producció d'energia per a cada hipòtesi

Amb els escenaris definits ja es pot calcular la producció d'energia elèctrica per a cada una de les hipòtesis tal com s'ha explicat a la metodologia.

Primer s'ha calculat el Performance Ratio del mòdul i de la planta ( $PR_m$  i  $PR_f$ ) amb les dades de temperatura del PVgis i s'ha obtingut un  $PR_f$  anual de **0.862**.

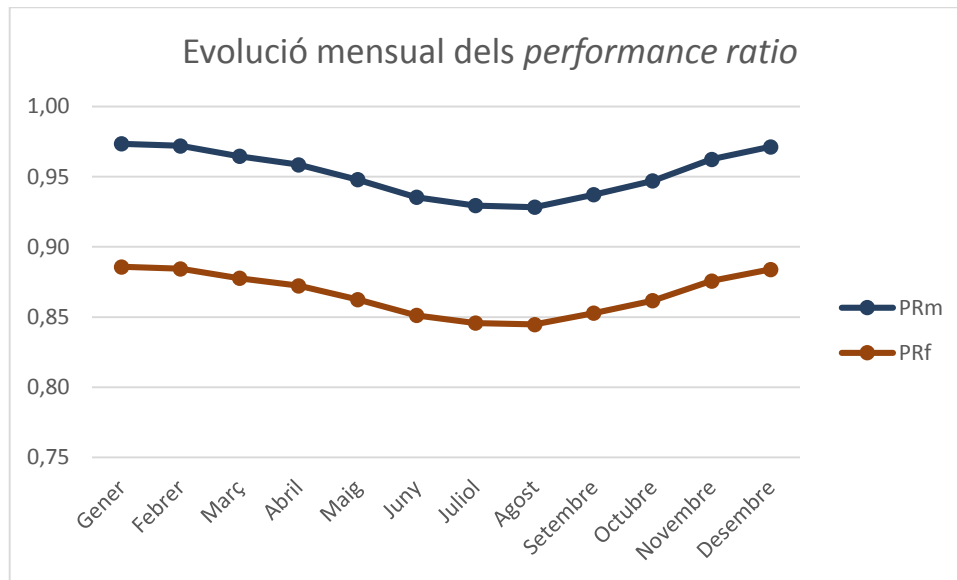


Figura 16. Evolució del  $PR_m$  i del  $PR_f$  del sistema de Les Borges Blanques. Elaboració pròpia.

Llavors, amb les dades d'irradiància al centre del terme municipal, s'ha analitzat l'energia elèctrica que es produiria amb una inclinació dels panells de 10°:



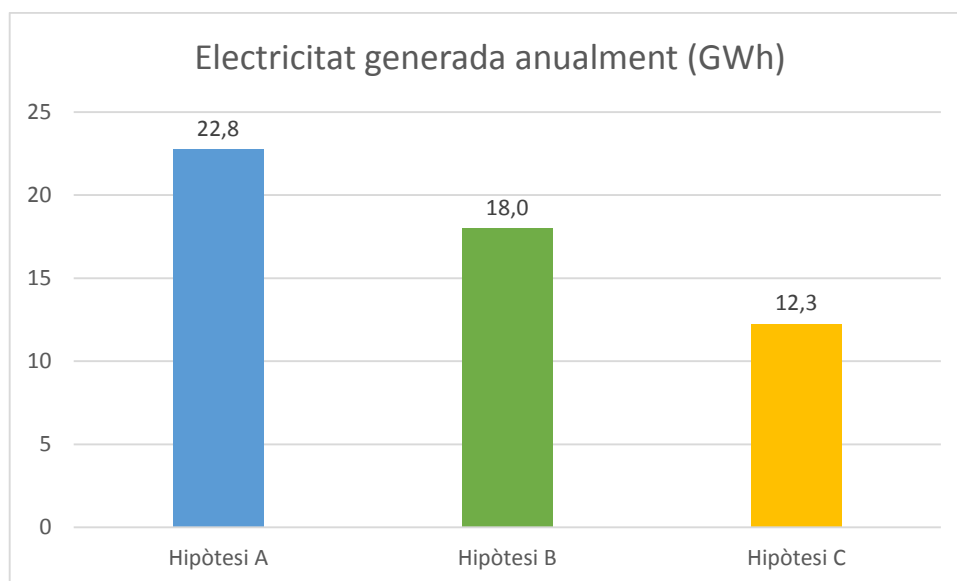


Figura 17. Producció d'electricitat anual per a cada escenari a Les Borges Blanques. Elaboració pròpia.

S'observa clarament com la producció d'energia elèctrica es redueix quasi a la meitat (46%) de la hipòtesi més optimista (A) a la més conservadora (C). Entre A i B la producció baixa un 21% i entre B i C, un 32%.

Per tal de veure quin estalvi de petroli i emissions de CO<sub>2</sub> suposaria la generació elèctrica del sistema front al consum d'energia elèctrica convencional de la xarxa peninsular s'ha recorregut als factors de conversió d'energia final a primària i als factors d'emissió (IDAE, 2014). Així, el consum equivalent de petroli i les emissions de CO<sub>2</sub> estalviades es calculen de la següent manera:

$$22.8 \text{ GWh} \cdot \frac{1000 \text{ MWh}}{\text{GWh}} \cdot \frac{0.224 \text{ tep primària}}{\text{MWh final}} = 5107.2 \text{ tep}$$

$$22.8 \text{ GWh} \cdot \frac{10^6 \text{ kWh}}{\text{GWh}} \cdot \frac{649 \text{ g CO}_2}{\text{kWh}} \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{ g}} = 14797.2 \text{ tones CO}_2$$

De la mateixa manera s'ha estimat l'estalvi de tep i de CO<sub>2</sub> emés a l'atmosfera en els altres escenaris i s'han obtingut els següents resultats:

Taula 11. Estalvi de petroli i d'emissions de CO<sub>2</sub> a Les Borges Blanques. Elaboració pròpia.

Hipòtesi A	5107.2 tep	14797.2 tones CO <sub>2</sub>
Hipòtesi B	4032 tep	11682 tones CO <sub>2</sub>
Hipòtesi C	2755.2 tep	7982.7 tones CO <sub>2</sub>

Saben que a Les Borges Blanques hi ha censats 6019 habitants, podem estimar la producció d'energia elèctrica per càpita:

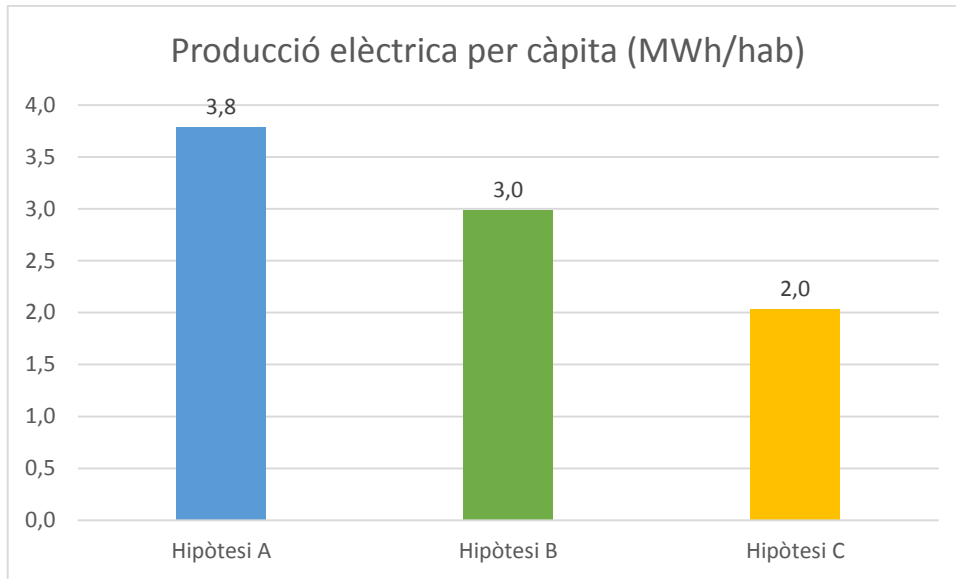


Figura 18. Producció d'energia elèctrica per càpita. Elaboració pròpia.

Com en el cas anterior, aquesta generació es redueix gairebé a la meitat de la hipòtesi A a la C.

### **Demanda estimada**

Per tal d'estimar la demanda d'electricitat de Les Borges Blanques, només s'ha de multiplicar la demanda per càpita per la població del municipi.

A l'estat espanyol, el consum mitjà d'energia elèctrica és de 5.3 MWh per habitant i any. Aquesta dada s'obté a partir del consum elèctric total de l'estat del 2015 (REE) i es divideix per la població d'aquell mateix any (INE).

Per tant, fent el producte entre aquest indicador i la població censada del terme s'obté el consum anual d'electricitat del municipi.

$$E = 5.3 \frac{MWh}{hab \cdot any} \cdot 6019 hab = 31900 \frac{MWh}{any} = 32 \frac{GWh}{any}$$

### **Cobertura de la demanda**

Finalment, sabent la producció d'electricitat per a cada escenari i la demanda estimada ja es pot avaluar quin percentatge d'aquesta es cobrirà amb el sistema fotovoltaic.

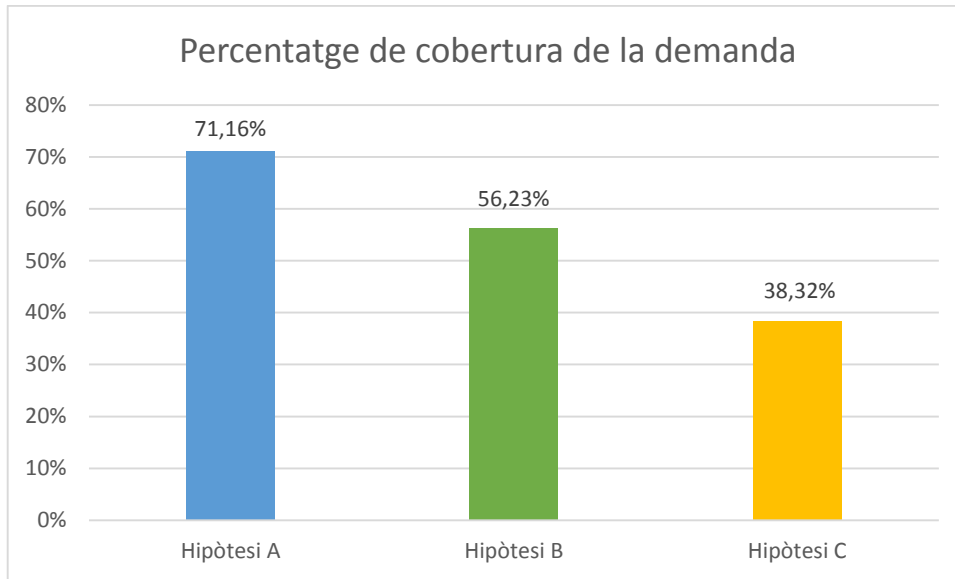


Figura 19. Percentatge de cobertura de la demanda elèctrica. Elaboració pròpia.

Es pot veure que en Les Borges Blanques es podria assolir un percentatge d'autoabastiment molt elevat, de fins a un 70%, degut a la poca població que presenta el municipi. Aquesta capacitat d'autoabastiment també es redueix quasi a la meitat (46%) de la hipòtesi A a la C. Entre A i B aquesta cobertura de la demanda baixa en un 21% i entre B i C, un 32%.

## 4.2. Tàrrega

### Producció d'energia per a cada hipòtesi

Repetint el procediment, s'ha calculat la producció elèctrica per a cada escenari.

Primer s'han obtingut el Performance Ratio del mòdul i de la planta ( $PR_m$  i  $PR_f$ ) amb les dades de temperatura del PVgis, obtenint un  $PR_f$  anual de **0.861**.

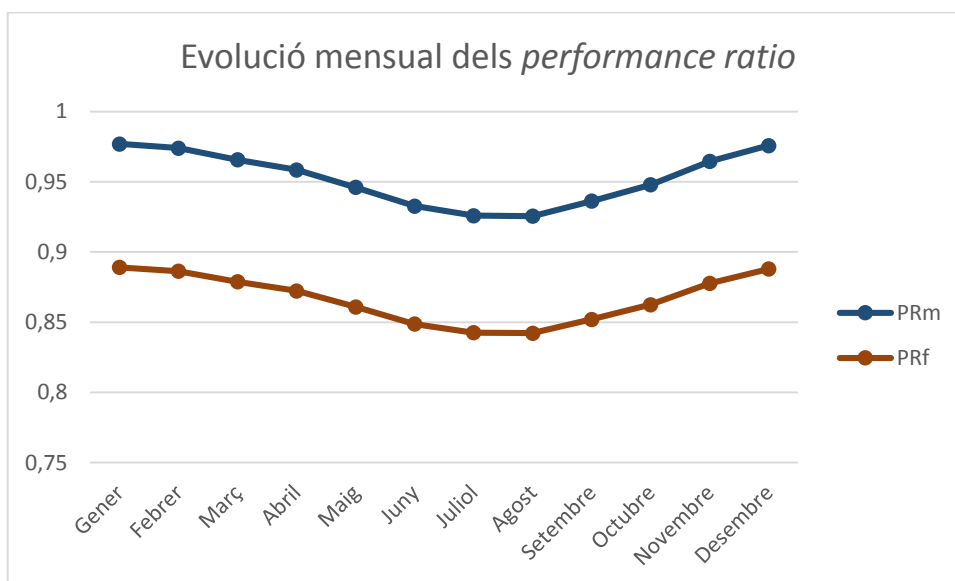


Figura 20. Evolució del  $PR_m$  i del  $PR_f$  del sistema de Tàrrega. Elaboració pròpia.

Així, amb les dades d'irradiància de Tàrraga, l'energia elèctrica que es generaria en cada escenari és:

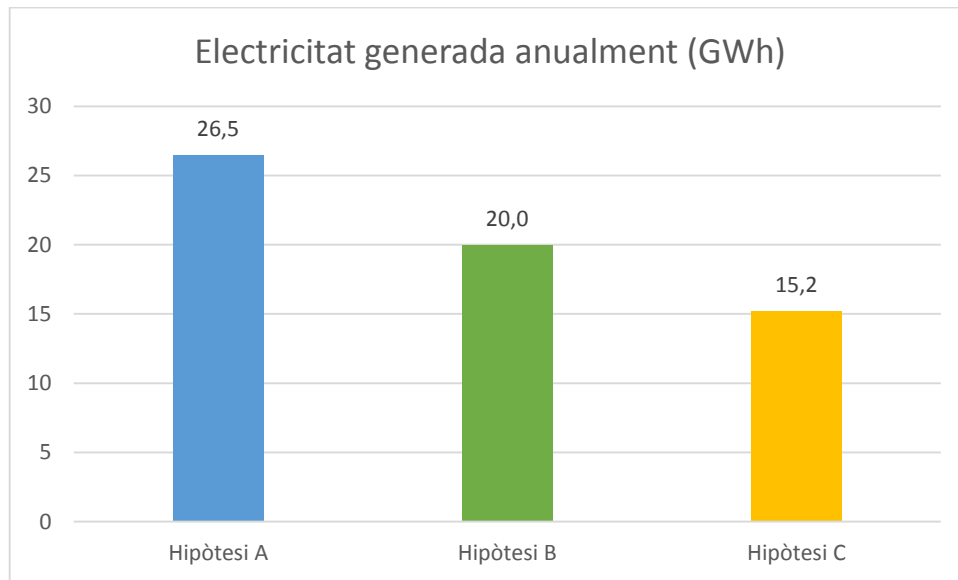


Figura 21. Producció d'electricitat anual per a cada escenari a Tàrraga. Elaboració pròpia.

En aquest cas, la reducció de la producció d'electricitat entre la hipòtesi més optimista (A) i la més conservadora (C) no és tan elevada, representat un 43%. Entre A i B la producció baixa un 25% i entre B i C, un 24%.

Com en el cas de Les Borges Blanques, es vol estudiar l'estalvi de petroli i d'emissions de CO<sub>2</sub> que suposa l'autoabastiment elèctric. Utilitzant els mateixos factors de conversió i emissió [IDAE], es calcula:

$$26.5 \text{ GWh} \cdot \frac{1000 \text{ MWh}}{\text{GWh}} \cdot \frac{0.224 \text{ tep primària}}{\text{MWh final}} = 5936 \text{ tep}$$

$$26.5 \text{ GWh} \cdot \frac{10^6 \text{ kWh}}{\text{GWh}} \cdot \frac{649 \text{ g CO}_2}{\text{kWh}} \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{ g}} = 17198.5 \text{ tones CO}_2$$

A continuació s'ha realitzat el mateix càlcul per a les altres dues hipòtesis i els resultats obtinguts són:

Taula 12. Estalvi de petroli i d'emissions de CO<sub>2</sub> a Tàrraga. Elaboració pròpia.

Hipòtesi A	5936 tep	17198.5 tones CO <sub>2</sub>
Hipòtesi B	4480 tep	12980 tones CO <sub>2</sub>
Hipòtesi C	3404.8 tep	9864.8 tones CO <sub>2</sub>

Tenint en compte que a Tàrraga hi ha censats 16444 habitants, podem conèixer la producció d'energia elèctrica per càpita:

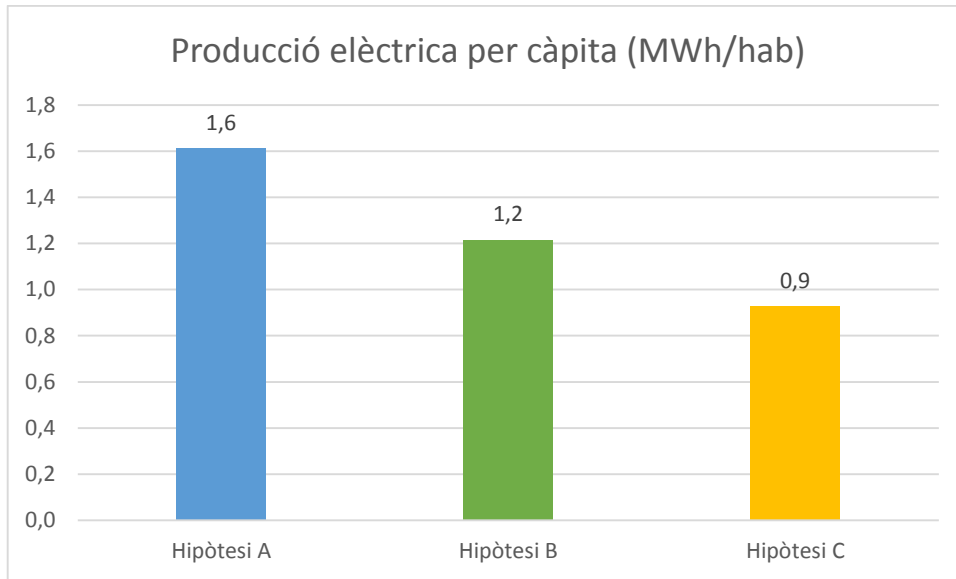


Figura 22. Producció d'energia elèctrica per càpita a Tàrraga. Elaboració pròpia.

En el municipi de Tàrraga, tot i que la producció elèctrica és superior que a Les Borges Blanques, la generació per càpita és molt més baixa degut a la major població censada que presenta.

### **Demanda estimada**

Seguint el mateix procediment, multipliquem el consum mitjà d'energia elèctrica anual per habitant -establert en l'apartat de les Borges Blanques en 5.3 MWh/hab- per la població de Tàrraga per obtenir el consum elèctric anual.

$$E = 5.3 \frac{MWh}{hab \cdot any} \cdot 16444 hab = 87153 \frac{MWh}{any} = 87 \frac{GWh}{any}$$

### **Cobertura de la demanda**

Així, coneixent la demanda del municipi i la producció de cada escenari, la cobertura de la demanda elèctrica seria la següent:

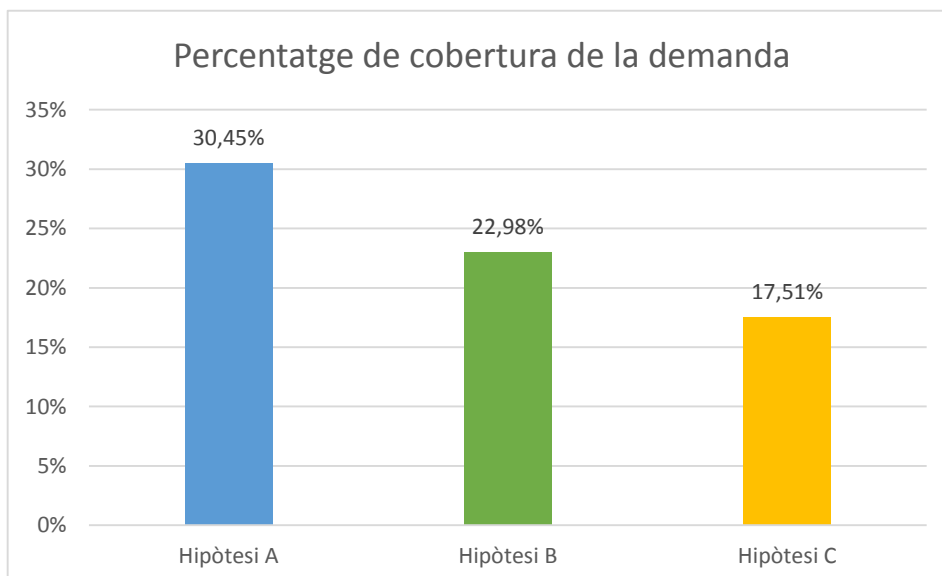


Figura 23. Percentatge de cobertura de la demanda elèctrica. Elaboració pròpia.

En aquest cas, el percentatge màxim de cobertura de la demanda elèctrica del municipi no seria superior a un 30%, tot i que el sistema genera més energia elèctrica que en el cas de Les Borges Blanques. Això és degut a la major població que presenta el municipi i, per tant, una demanda elèctrica global molt superior. De la hipòtesi A a la C es redueix en un 42% aquesta capacitat d'autoabastiment. Entre A i B, baixa un 25 % i entre B i C, un 24%.

### 4.3. Comparativa dels municipis

Per tal d'analitzar el resultat obtingut, s'han realitzat gràfics que permeten comparar la producció energètica i l'autoabastiment dels dos municipis.

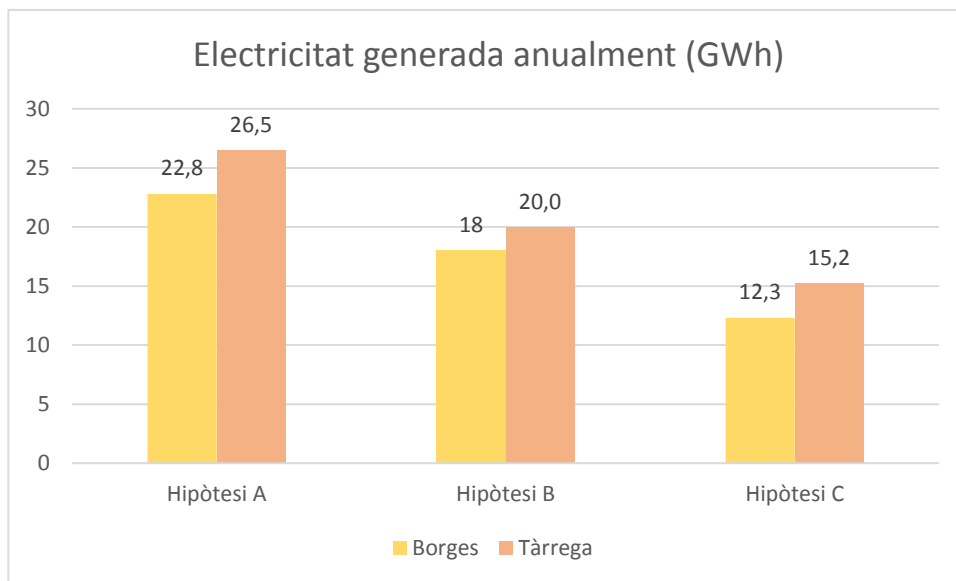


Figura 24. Comparativa de l'energia elèctrica generada. Elaboració pròpia.

Tàrraga és el municipi que presenta una major superfície i més carreteres disponibles per a la instal·lació. Per tant, s'hi poden emplaçar més mòduls fotovoltaics que a Les Borges Blanques, creant un sistema de major potència nominal que generarà més energia elèctrica anualment.

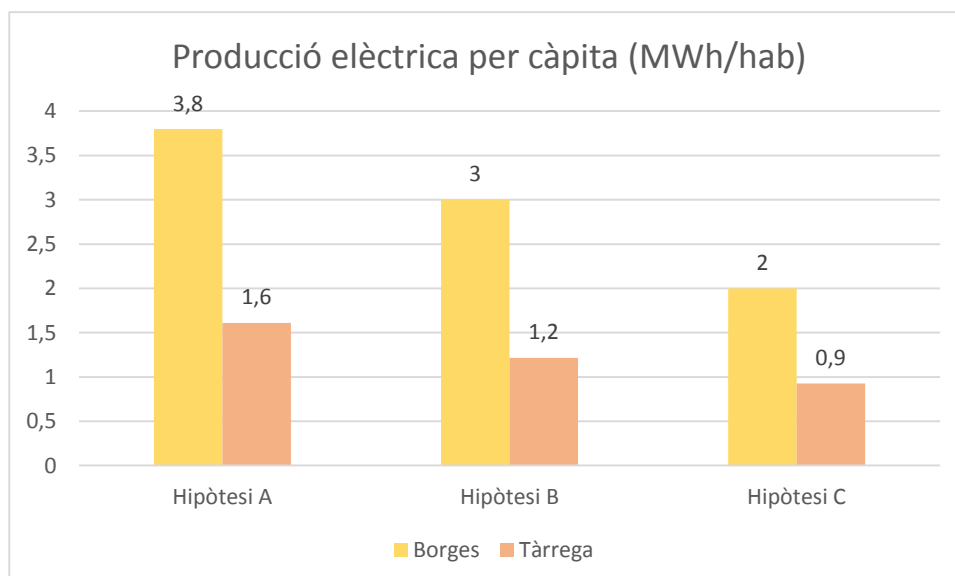


Figura 25. Comparativa de la generació elèctrica per càpita. Elaboració pròpia.

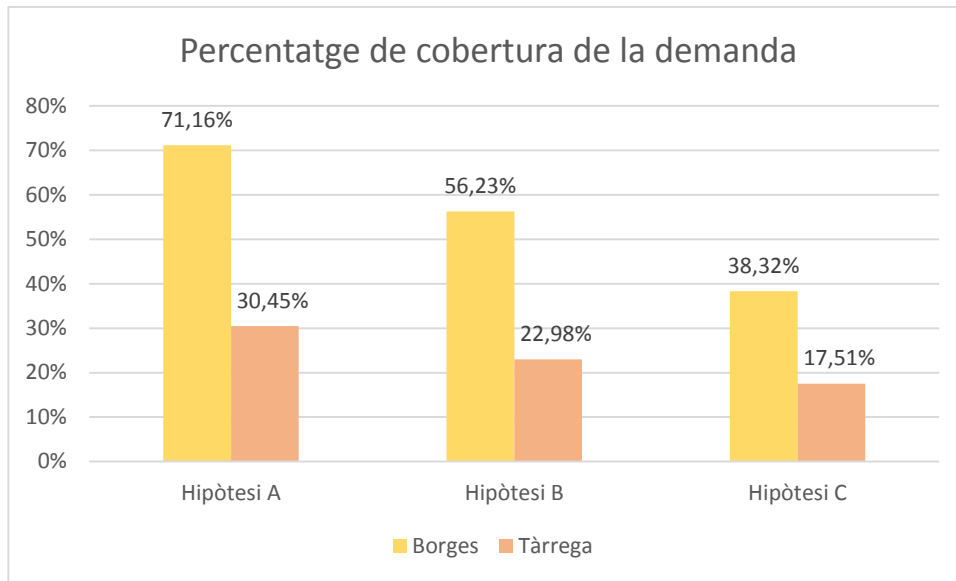


Figura 26. Comparativa del percentatge de cobertura de la demanda elèctrica. Elaboració pròpia.

En canvi, quan es té en compte la població de cada municipi els resultats s'inverteixen completament. Les Borges Blanques presenta una població censada molt inferior que Tàrraga, cosa que suposa que la producció per càpita sigui molt superior -més del doble-, tot i generar menys energia anual.

Seguint amb aquest raonament poblacional, el consum global d'energia de Tàrraga serà molt elevat, implicant que el percentatge de cobertura de la demanda sigui molt petita, no superant el 30% ni en la hipòtesi més optimista. Per contra, el petit municipi de Les Borges Blanques es podria autoabastir fins a un 70% gràcies a la producció del sistema.

## 5. Conclusions

---

Davant la necessitat d'avançar cap a un model energètic més sostenible, aquest projecte ha volgut conèixer la capacitat de producció d'energia solar fotovoltaica de dos municipis catalans amb densitats de població diferents, realitzant la instal·lació als marges de les vies de transport rodat sense ocupar espai lliure.

Sota les mateixes condicions tècniques i amb uns nivells d'irradiància globals similars, una major superfície disponible per a la instal·lació es correspon directament amb una major potència nominal instal·lada i una producció d'energia anual superior.

Les hipòtesis plantejades a Les Borges Blanques representen una potència nominal de 14.3 MW, 11.3 MW i 7.7 MW amb una generació d'energia elèctrica anual de 22.8 GWh, 18 GWh i 12.3 GWh respectivament. Aquests escenaris suposen l'ocupació d'entre un 0.07% i un 0.13% de la superfície del municipi.

En el cas de Tàrraga, les hipòtesis corresponen a una potència nominal de 16.7 MW, 12.6 MW i 9.6 MW amb una producció elèctrica anual de 26.5 GWh, 20 GWh i 15.2 GWh respectivament. En aquest cas s'ocupa entre un 0.08% i un 0.14% de l'àrea del terme municipal. Per tant, Tàrraga permet instal·lar un sistema de major superfície que correspon a una potència instal·lada i una generació anual d'electricitat superiors.

En canvi si es comparen els dos municipis en termes de població, es demostra que en zones poc poblades és més fàcil disposar de la superfície necessària per a per a cobrir una major part de la demanda elèctrica.

Les Borges Blanques, amb menys habitants, presenta una major producció per càpita i unes possibilitats de cobertura de la demanda molt més elevades, permetent cobrir la demanda anual entre un 38% i un 78%. En el cas de Tàrraga, tot i generar més energia elèctrica anual, degut a la major població que presenta només pot assolir una cobertura de la demanda d'entre un 17% i un 30% anual.

Aquest sistema permetria l'estalvi a Les Borges Blanques d'entre 5107 tep i 2755 tep, amb una reducció de les emissions d'entre 14797 i 7982 tones de CO<sub>2</sub>. A Tàrraga l'estalvi seria d'entre 5936 tep i 3404 tep i d'entre 17198 i 9864 tones de CO<sub>2</sub>.

Tot i que no és l'objecte d'aquest treball, per tal de conèixer la magnitud dels costos econòmics del sistema s'ha recorregut al LCOE (levelised cost of energy). Aquest paràmetre serveix per a fer una valoració econòmica del sistema a partir d'una font energètica específica i té en compte tots els costos al llarg de la vida útil de la instal·lació: inversió inicial, operació i manteniment, cost del capital i altres. En el cas de sistemes fotovoltaics a gran escala, aquest cost es preveu en 1100 €/kW de potència instal·lada (European Commission, 2014). Per tant, la inversió a Les Borges Blanques seria d'entre 15.7 M€ i 8.5 M€, mentre que a Tàrraga aquesta seria d'entre 18.4 M€ i 10.6 M€. Això és només una aproximació al cost del sistema; en cas d'aplicació real de l'estudi es requeriria un anàlisi econòmic detallat i concret per tal de conèixer la seva viabilitat.

Finalment, és important destacar que les xarxes elèctriques actuals no permetrien instal·lar la potència fotovoltaica derivada del projecte degut a l'elevada pertorbació que suposaria. Un nivell tan elevat d'autoabastiment requeriria xarxes intel·ligents i grans sistemes d'acumulació. Tot i així es podria projectar un sistema amb menys ocupació que fos compatible amb la xarxa elèctrica actual que ja suposés un percentatge significatiu de cobertura de la demanda.



## 6. Abstract

---

Today's need of tackling environmental challenges requires advancing towards a more sustainable energetic model. Solar photovoltaic energy allows generating electricity from the solar radiation that impinges on our planet. This can convey a substantial reduction in oil demand and in emissions of CO<sub>2</sub>.

One of the main challenges for photovoltaic energy is the large amount of ground surface occupied, which has motivated the study of alternative applications that do not require using free space plots. A common approach is to install photovoltaic systems on the sound barriers surrounding transportation axes. A possible evolution of such an approach is to directly install photovoltaic systems on roads' shoulders.

This project has thus focused on assessing the capability -in terms of energy generation and covering of the local demand- of photovoltaic systems installed on the shoulders of the roads of two different townships with different population density.

Graphical maps have been created for selecting the roads used in the study. These maps have also allowed to set up different hypothesis for computing the amount of energy that could be generated and distributed through the supply network, as well as the per capita production and the level of self-sufficiency that could be achieved.

The project has shown that these photovoltaic systems have a quite high potential for energy generation even with a moderate occupation of the shoulders. This would allow to cover a substantial fraction of the local demand, although the supply network is not yet prepared for such a high level of self-sufficiency.

## 7. Bibliografia

---

Espejo Marín, Cayetano. *La energia solar fotovoltaica en Espanya*. Nimbus, nº 13-14, 2004, pàgs. 5-31.

González Velasco, Jaime. *Energías renovables*. Capítulo 3: Energía solar, dispositivos fotovoltaicos. Barcelona. Editorial Reverté, 2009.

Nordmann, Thomas; et al. *PV on noise barriers*. Progress in photovoltaics: research and applications, nº 12, 2004, pàgs. 485-495.

De Schepper, Ellen; et al. *Combining photovoltaics and sound barriers - A feasibility study*. Renewable energy, nº 46, 2012, pàgs. 297-303.

Vallati, A; et al. *Photovoltaics noise barrier: acoustic and energetic study*. Energy Procedia, nº 82, 2015, pags. 716-723.

Remmer, Dorothy; et al. *Photovoltaic noise barrier – Canada*. British Columbia Institute of Technology. SESCO 2005 conference. Canada.

Snow, M; et al. *'Power Without the Noise' - Opportunities for Integrating Photovoltaic Noise Barriers (PVNB) under Australian Conditions*. ANZSEE 2000 Solar energy conference. Australia.

PV Resources: Photovoltaic Technologies and Applications. Consultat el maig de 2016. <<http://www.pvresources.com/>>

van der Borg, N.J.C.M; et al. Photovoltaic noise barrier at the A9-highway in the Netherlands : results of the monitoring programme. ECN Solar energy, 2001. Report number: ECN-C--01-021.

Abad Marí, M; et al. *Estudi del metabolisme energètic i de recursos de l'aviari del Zoo de Barcelona. Mesures cap a la sostenibilitat*. Treball de fi de grau. Universitat Autònoma de Barcelona, 2015.

Parés Carrió, Aleix. *Impacte de la generació fotovoltaica a la xarxa elèctrica*. Treball final de carrera. Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.

Institut d'estadística de Catalunya (IDESCAT). Consultat l'abril de 2016. <<http://www.idescat.cat/>>

Marion, B; et al. *Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems*. NREL, 2005. Report number: CP-520-37358.

Red eléctrica de España. *El sistema eléctrico espanyol. Informe 2015*. Madrid, 2016.

Ajuntament de Les Borges Blanques. Consultat el març i el juny de 2016. <<http://www.lesborgesblanques.cat/>>

Ajuntament de Tàrraga. Consultat el maig i el juliol de 2016. <<http://www.tarrega.cat/>>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). *Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios de España*. Versión 03/02/2014.

Instituto nacional de estadística (INE). Consultat el març i el maig de 2016. <[www.ine.es/](http://www.ine.es/)>

Institut cartogràfic de Catalunya. Consultat el març i el maig de 2016. <[www.icc.cat/](http://www.icc.cat/)>

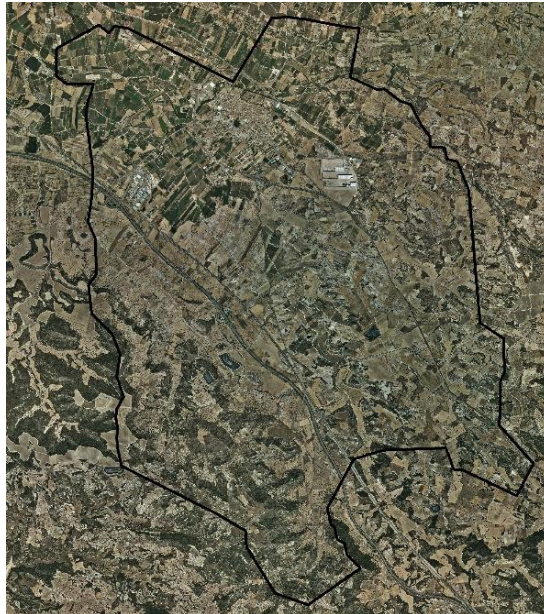
Departament de territori i sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya. Consultat el març i maig de 2016. <<http://territori.gencat.cat/>>

European Commission. *PV Status Report 2014*. Luxemburg, 2014.

## 8. Annexos

---

### 8.1. Ortofotomapes dels municipis



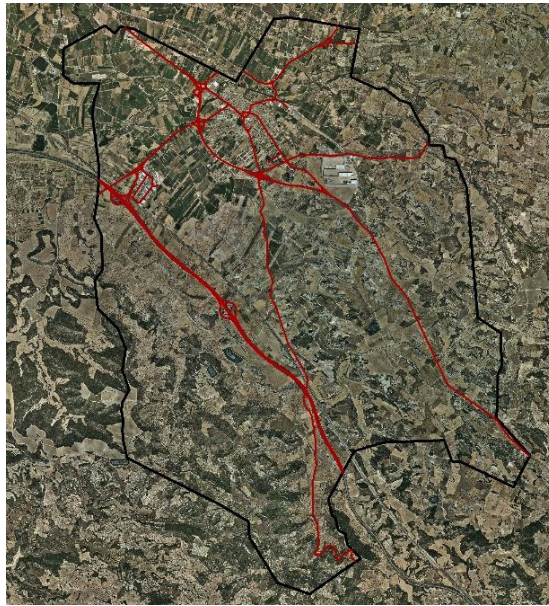
*Figura 27. Ortofotomapa del municipi de Les Borges Blanques. Elaboració pròpia.*



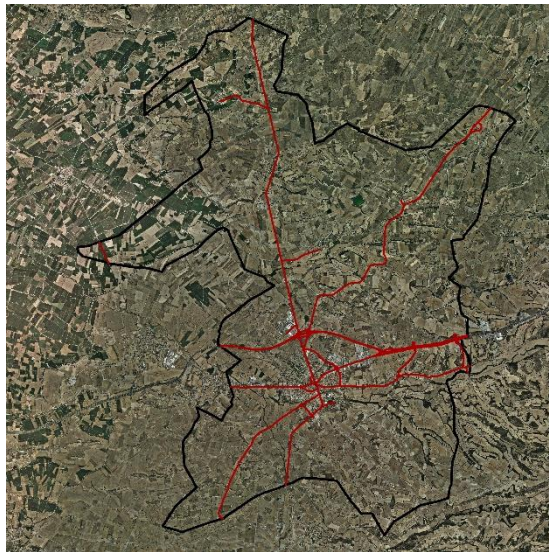
*Figura 28. Ortofotomapa del municipi de Tàrraga. Elaboració pròpia.*



## 8.2. Mapa de carreteres dels municipis



*Figura 29. Mapa de les carreteres del municipi de Les Borges Blanques. Elaboració pròpia*



*Figura 30. Mapa de les carreteres del municipi de Tàrraga. Elaboració pròpia.*

### 8.3. Informació del mòdul fotovoltaic

**SunPower® X-Series Commercial Solar Panels | X21-345-COM**

**More than 21% Efficiency**  
Captures more sunlight and generates more power than conventional panels.

**Maximum Performance**  
Designed to perform in demanding real-world conditions of high temperatures, partial shade from overhead wires, and low light.<sup>1,2,4</sup>

**Commercial Grade**  
Intended for commercial sites where maximum energy production is critical.



**Maxeon® Solar Cells. Fundamentally better.**  
Engineered for performance, designed for reliability.

**Engineered for Peace of Mind**  
Designed to deliver consistent, trouble-free energy over a very long lifetime.<sup>8,9</sup>

**Designed for Reliability**  
The SunPower Maxeon Solar Cell is the only cell built on a solid copper foundation. Virtually impervious to the corrosion and cracking that degrade conventional panels.<sup>8</sup>

Same excellent durability as E-Series panels:  
#1 Rank in Fraunhofer durability test.<sup>9</sup>  
100% power maintained in Atlas 25+ comprehensive durability test.<sup>10</sup>

**High Performance & Excellent Reliability**



**X21 SERIES**

SPR-X21-345-COM

**Highest Efficiency<sup>3</sup>**  
Generate more energy per square foot  
X-Series commercial panels convert more sunlight to electricity by producing 38% more power per panel<sup>7</sup> and 70% more energy per square foot over 25 years.<sup>1,2,3</sup>

**Highest Energy Production<sup>4</sup>**  
Produce more energy per rated watt  
More energy to power your operations. High year-one performance delivers 8–10% more energy per rated watt.<sup>1</sup> This advantage increases over time, producing 21% more energy over the first 25 years to meet your needs.<sup>5</sup>




**SUNPOWER®**

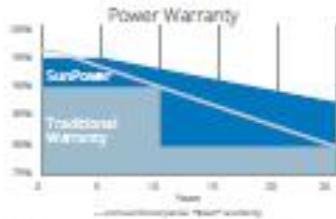
Datasheet





## SunPower® X-Series Commercial Solar Panels | X21-345-COM

SunPower Offers The Best Combined Power And Product Warranty



More guaranteed power: 95% for first 5 years, -0.4%/yr. to year 25<sup>1</sup>



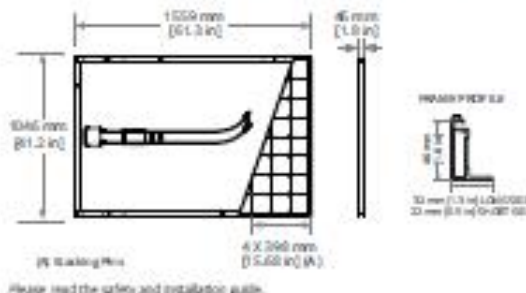
Combined Power and Product defect 25-year coverage that includes panel replacement costs<sup>2</sup>

Electrical Data		SPR-X21-345-COM	SPR-X20-327-COM
Normal Power (P <sub>nom</sub> ) <sup>1</sup>		345 W	327 W
Power Tolerance		+5/-3%	+5/-3%
Avg. Panel Efficiency <sup>2</sup>		21.5%	20.3%
Rated Voltage (V <sub>mpp</sub> )		57.3 V	57.3 V
Rated Current (I <sub>mp</sub> )		6.02 A	5.71 A
Open-Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )		68.2 V	67.6 V
Short-Circuit Current (I <sub>sc</sub> )		6.39 A	6.07 A
Max. System Voltage		1000 V UL & 1000 V IEC	
Maximum Series Fuse		15 A	
Power Temp. Coef.		-0.30%/°C	
Voltage Temp. Coef.		-167.4 mV/°C	
Current Temp. Coef.		3.5 mA/°C	

Tests And Certifications	
Standard Tests <sup>11</sup>	UL1703 (Type 2 Fire Rating), IEC 61215, IEC 61730
Quality Certs	ISO 9001:2008, ISO 14001:2004
RoHS Compliance	RoHS, CHSAS 18001:2007, lead free, REACH
Sustainability	Cradle to Cradle (eligible for LEED points) <sup>14</sup>
Ammonia Test	IEC 62716
Desert Test	10.1109/PVSC.2013.6744437
Salt Spray Test	IEC 61701 (maximum severity)
PID Test	Potential-Induced Degradation free: 1000 V <sup>12</sup>
Available Listings	UL, TÜV, JET, CSA, CEC

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40° F to +185° F (-40° C to +65° C)
Impact Resistance	1 inch (25 mm) diameter ball at 52 mph (23 m/s)
Appearance	Class B
Solar Cells	95 Monocrystalline Mosaic Gen III
Tempered Glass	High-transmission tempered anti-reflective
Junction Box	P-65, MC4 compatible
Weight	41 lbs (18.6 kg)
Max. Load	Wind: 50 psf, 2400 Pa, 244 kg/m <sup>2</sup> front & back Snow: 11.2 psf, 5400 Pa, 550 kg/m <sup>2</sup> front
Frame	Class 2 silver anodized, stacking pins

1. All comparisons are SPR-X21-345 vs. a representative conventional panel (30% wt, approx. 1.6 m<sup>2</sup>, 15.8% efficiency)  
 2. Typically 8-10% more energy per watt, (NREL/NV Engineering "SunPower R&D Report," Jan 2014)  
 3. SunPower 0.21%/yr degradation vs. 1.0%/yr conv. panel. Campese, Z. et al. "SunPower Module Degradation Rate," SunPower white paper, Feb 2014 Jordan, (SR "SunPower Test Report," 2014, 01-0115)  
 4. "SunPower Module 40-year Useful Life," SunPower white paper, May 2015. Useful life is 99% out of 100 panels operating at more than 70% of rated power.  
 5. Highest of over 4,000 silicon solar panels, Photon Module Survey, Feb 2014.  
 6. 1% more energy than 4-series panels, 9% more energy than the average of the top 10 panel companies tested in 2012 (111 panels, 100 companies), Photon International, Feb 2014.  
 7. Compared with the top 15 manufacturers, SunPower Warranty Review, July 2015.  
 8. Some restrictions and exclusions may apply. See warranty for details.  
 9. X-Series case at 4-series, 5 of top 8 panel manufacturers tested in 2014 report, 8 additional panels in 2014. Fertara, C., et al. "Fraunhofer IZ" Durability Institute for Solar Modules Part 2: Photovoltaic International, 2014.  
 10. Compared with the non-strengthened control panel, X-Series case at 4-series, tested at Atlas 254 Durability test report, Feb 2014.  
 11. Standard Test Conditions (1000 W/m<sup>2</sup> irradiance, AM 1.5, 25° C), NREL, calibration standard SCM6 current, IACOS IR and voltage.  
 12. Based on average of measured power values during production.  
 13. Type 2 fire rating per UL 1703 (2013), (Class 2 fire rating per UL 1703 (2012)).  
 14. See salesperson for details.



Please read the safety and installation guide.

See [www.sunpower.com/contact](http://www.sunpower.com/contact) for more reference information.  
 For more details, see extended datasheet: [www.sunpower.com/datasheets](http://www.sunpower.com/datasheets).

Document # 505700 Rev 6 (1.14.15)

©March 2015 SunPower Corporation. All rights reserved. SUNPOWER, the SUNPOWER logo, MAXIMA, and SINGAPORE are trademarks or registered trademarks of SunPower Corporation. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

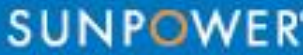



Figura 31. Fitxa tècnica del panell SunPower X21-345-COM.

Taula 13. Coeficients de temperatura i eficiència dels panells SunPower.



**X-SERIES SOLAR PANELS**  
**SUPPLEMENTARY TECHNICAL SPECIFICATIONS**

**TEMPERATURE COEFFICIENTS & EFFICIENCY REFERENCES**

Module	At STC		Basic Temperature Data				Efficiency Numbers		
	Nominal Power	Avg Power	Current (Isc) Temp. Coeff. (mA/°C)	Voltage (Voc) Temp. Coeff. (mV/°C)	Power Temp. Coeff. (%/°C)	NOCT @ 20°C (Value +/- 2 °C)	Average Power Efficiency (%)	Nominal Peak Power per Unit Area (W/m²)	Nominal Peak Power per Unit Area (W/ft²)
SPR-X22-360	360	361	3.5	-167.4	-0.30%	41.5	22.16%	221.6	20.6
SPR-X22-360-COM	360	361	3.5	-167.4	-0.30%	41.5	22.16%	221.6	20.6
SPR-X21-345	345	350	3.5	-167.4	-0.30%	41.5	21.5%	214.6	19.9
SPR-X21-345-COM	345	350	3.5	-167.4	-0.30%	41.5	21.5%	214.6	19.9
SPR-X21-335-BLK	335	343	3.5	-167.4	-0.30%	43.0	21.0%	210.3	19.5
SPR-X21-335	335	343	3.5	-167.4	-0.30%	41.5	21.0%	210.3	19.5
SPR-X20-327	327	333	3.5	-167.4	-0.30%	41.5	20.4%	204.2	19.0
SPR-X20-327-COM	327	331	3.5	-167.4	-0.30%	41.5	20.3%	202.9	18.9
SPR-X20-327-BLK	327	333	3.5	-167.4	-0.30%	43.0	20.4%	204.2	19.0
SPR-X19-310	310	314	3.5	-167.4	-0.30%	41.5	19.3%	192.5	17.9
SPR-X19-310-BLK	310	314	3.5	-167.4	-0.30%	43.0	19.3%	192.5	17.9
SPV-X19-310-COM	310	314	3.5	-167.4	-0.30%	43.0	19.3%	192.5	17.9
SPR-X21-255	255	262	3.5	-125.6	-0.30%	41.5	21.1%	210.6	19.6
SPR-X20-250-BLK	250	255	3.5	-125.6	-0.30%	43.0	20.5%	205.0	19.0
SPR-X20-245	245	249	3.5	-125.6	-0.30%	41.5	20.0%	200.2	18.6
SPR-X19-240-BLK	240	242	3.5	-125.6	-0.30%	43.0	19.5%	194.5	18.1

### 8.4. Exemple de càlcul de la potència nominal del sistema per a la hipòtesi A

Taula 14. Càlcul de la potència nominal del sistema en la hipòtesi A de Les Borges Blanques.

Hipòtesi A						
Via	N	N · Lc/Lp	% ocupació	Nt	Nt (10)	Pn = (Nt · Pp)/10^6
LV-7031	2	10673,51	0,60	6404,11	6400	2,21
L-200	2	333,55	0,70	233,48	230	0,08
C-233	3	8601,67	0,60	5161,00	5160	1,78
AP-2	4	17934,57	0,75	13450,93	13450	4,64
M25058-9	3	1674,15	0,50	837,08	830	0,29
N-240	3	21879,41	0,60	13127,65	13120	4,53
LV-2012	2	3925,59	0,60	2355,36	2350	0,81
					41540	14,33



Taula 15. Càlcul de la potència nominal del sistema en la hipòtesi A de Tàrraga.

Hipòtesi A						
Via	N	N · Lc/Lp	% ocupació	Nt	Nt (ent10)	$P_n = (N_t \cdot P_p)/10^6$
M25217-7	2	1446,12	0,60	867,67	860	0,30
A-2	4	18604,23	0,70	13022,96	13020	4,49
N-II	3	4422,39	0,60	2653,43	2650	0,91
A-2LE	2	3308,96	0,60	1985,37	1980	0,68
C-53	2	845,92	0,70	592,14	590	0,20
LV-3233	2	1704,58	0,60	1022,75	1020	0,35
A-2LD	2	3287,95	0,60	1972,77	1970	0,68
L-310	3	16954,52	0,60	10172,71	10170	3,51
LV-2021	2	5336,76	0,60	3202,06	3200	1,10
IUR-6	2	1057,53	0,60	634,52	630	0,22
IUR-5	2	4730,43	0,60	2838,26	2830	0,98
C-14	2	13539,60	0,70	9477,72	9470	3,27
					48390	16,69