

**Disseny i simulació de la implementació de plaques
fotovoltaïques i d'smart grids en una xarxa elèctrica de
distribució local**

MEMÒRIA

Autor: Guillem Boqué Solé
Director: Oriol Gomis Bellmunt
Convocatòria: Gener 2021

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Actualment la producció d'energia elèctrica està pràcticament monopolitzada per les grans indústries energètiques. En un futur proper, es preveu que gran part de la població pugui generar part de l'energia que consumeix i comercialitzar amb ella. En aquesta direcció, caldrà aplicar un canvi en la xarxa actual per adaptar-la a aquest nou paradigma i evitar pèrdues en la transmissió d'energia elèctrica. Aquestes noves tecnologies permetran distribuir d'una forma eficient l'energia que es produeixi en cada nou punt de generació en funció de la demanda que hi hagi en cada instant, controlant la xarxa a partir del processament de la informació i la comunicació entre els diversos agents del sistema.

En aquest document es recullen els estudis d'un futurible cas d'evolució energètica cap a la generació fotovoltaica a la localitat de Ripollet.

Inicialment, es fa un estudi del consum actual de la localitat obtenint les corbes de consum per hores i per mesos de les principals activitats que s'hi realitzen.

Posteriorment, es fa una anàlisi de la possible instal·lació de plaques fotovoltaïques en aquesta localitat. En aquest apartat s'estudien els factors meteorològics, s'analitza en quines zones es podrien instal·lar les plaques solars i la generació que aportarien en els diversos punts de la xarxa.

Tenint el consum i la generació quantificades per franges horàries, es farà una simulació del sistema modificat. La finalitat d'aquest punt és analitzar els casos crítics i les problemàtiques que puguin sorgir per tal de millorar-ne el seu funcionament.

Finalment, s'estimarà l'estalvi energètic i els beneficis econòmics que la instal·lació pugui suposar als habitants de la localitat i se'n detallaran les conclusions de l'estudi.

Sumari

RESUM	3
SUMARI	4
1. GLOSSARI	7
2. PREFACI	8
2.1. Origen del projecte	9
2.1.1. Motivació.....	9
2.1.2. Requeriments previs.....	9
3. INTRODUCCIÓ	10
3.1. Objectius del projecte	10
3.2. Abast del projecte	10
4. L'ENERGIA FOTOVOLTAICA	11
5. XARXES INTEL·LIGENTS	13
5.1. Computadors intel·ligents.....	13
6. CONSUM ELÈCTRIC RIPOLLET	15
6.1. Classificació per sectors	15
6.2. Estimació del consum horari per a cada sector	16
7. PRODUCCIÓ FOTOELÈCTRICA RIPOLLET	18
7.1. Irradiació solar	18
7.1.1. Inclinació dels panells	18
7.1.2. Temperatura dels panells	18
7.2. Simulació de la producció fotovoltaica	21
7.3. Àrea potencial instal·lable.....	27
7.4. Producció fotoelèctrica per sectors i zones.....	28
8. XARXES ELÈCTRIQUES	30
8.1. Tipus	30
8.1.1. Xarxa radial.....	30
8.1.2. Xarxa mallada.....	30
8.2. Components	31
9. MODELITZACIÓ	32
9.1. Distribució de les càrregues i de les produccions fotovoltaïques.....	32

9.2. Selecció i caracterització del cablejat	33
10. PROBLEMA DE FLUX DE CÀRREGA	35
10.1. Suposicions i simplificacions.....	35
10.2. Sistema per unitat	36
10.3. Matriu d'admitància	38
10.4. Mètode de Newton-Raphson	41
10.5. Programa creat per a la simulació	43
10.5.1. Instruccions per implementar aquesta eina per altres casos.....	44
10.5.1.1. Càlcul d'un sol cas.....	44
10.5.1.2. Càlcul per molts casos.....	45
10.6. Aplicació de la simulació i resultats.....	46
10.6.1. Simulació amb generació fotovoltaica	46
10.6.2. Simulació sense generació fotovoltaica.....	49
11. IMPACTE AMBIENTAL	52
11.1. Producció panells.....	52
11.2. Energia elèctrica convencional no consumida.....	52
12. ANÀLISI ECONÒMICA	54
CONCLUSIONS	55
BIBLIOGRAFIA	56
Referències bibliogràfiques	56
Bibliografia complementària	57

1. Glossari

δ - Angle de la tensió.

AT – Alta Tensió.

BT – Baixa Tensió.

CT – Central de Transformació.

FP – Factor de potència.

G – Radiació solar.

P – Potència activa.

PV – Generació fotovoltaica.

Q – Potència reactiva.

R – Resistència.

S – Potència aparent.

Ta – Temperatura ambient.

Tc – Temperatura cèl·lula.

TONC - Temperatura d'Operació Nominal de la Cèl·lula

U - Mòdul de tensió.

X – Inductància.

Y – Admitància.

ZI – Zona Industrial.

ZR – Zona Residencial

2. Prefaci

L'origen de l'energia fotovoltaica s'atribueix al físic Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891), el qual va descobrir l'efecte fotovoltaic. No obstant aquest fet, va ser l'inventor Charles Fritts (1850-1903) el primer en dissenyar un prototip de cèl·lula fotovoltaica bastant més tard, al 1883. Aquest primer prototip estava format per seleni com a element semiconductor i un recobriment extremadament fi d'or. El rendiment d'aquest primer prototip era d'entorn a l'1%, un rendiment massa baix per al cost econòmic que suposaven l'extracció i la manipulació dels materials que el formaven. Tot i aquest fet, es va aconseguir demostrar que es podia generar energia elèctrica a partir de la llum.

A partir d'aquesta invenció, han estat molts els físics i enginyers que han anat perfeccionant el funcionament d'aquesta tecnologia. El seu desenvolupament va tenir un auge important quan es va donar la revolució de la indústria aeroespacial als anys 60 perquè aquesta tecnologia permetia alimentar els equips durant molt més temps que les bateries químiques que s'empraven llavors.

A dia d'avui, les plaques fotovoltaiques tenen moltes aplicacions i se segueix investigant per augmentar-ne el seu rendiment. De cara al futur, es preveu que el seu ús estigui molt més estès a nivell domèstic i industrial. Aquest canvi haurà d'anar acompanyat d'una adaptació de la xarxa actual per transportar d'una forma òptima l'energia generada en tots aquests nous punts de generació als punts on es produeixi el consum.



Il·lustració 2.1 – Panells fotovoltaics

2.1. Origen del projecte

2.1.1. Motivació

La motivació del present estudi surt de l'interès personal per les tecnologies que permeten l'obtenció d'energia d'origen renovable, que proporcionen un ús menys lesiu pel medi ambient. L'aplicació d'aquestes tecnologies no requereixen únicament noves tècniques d'obtenció, sinó que han d'anar acompanyades també de canvis en la seva distribució i emmagatzematge per tal d'obtenir un màxim rendiment. En aquest sentit, l'estudi se centra en l'energia que exigeix un canvi més significatiu en la distribució actual; l'energia que es podrà produir en molts petits punts repartits en les ciutats, per particulars.

2.1.2. Requeriments previs

La redacció està dirigida a persones amb coneixements previs d'enginyeria elèctrica que tinguin interès en comprendre, a nivell general, el funcionament de plaques fotovoltaïques i xarxes intel·ligents.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest treball és el disseny i l'anàlisi d'un projecte d'instal·lació fotovoltaica per cobrir part del consum de la localitat de Ripollet.

Es té per objectius específics els punts següents:

- Anàlisi del consum elèctric actual de la localitat classificat per franges horàries, mesos de l'any i els sectors principals.
- Estudiar el potencial que ofereix la zona per la producció d'energia elèctrica d'origen fotovoltaic a nivell domèstic.
- Dimensionament de la instal·lació.
- Simulació i anàlisi del comportament de la xarxa amb la incorporació de les plaques fotovoltaïques.
- Analitzar l'impacte ambiental i econòmic de la nova instal·lació.

3.2. Abast del projecte

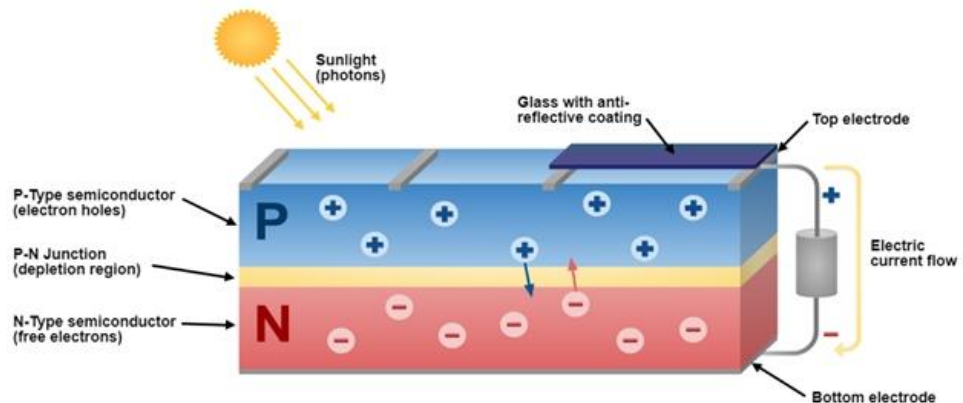
En aquest projecte s'estudien els següents dos blocs principals:

- Estudi tècnic del funcionament de les tecnologies actuals de generació fotovoltaica i de les xarxes intel·ligents. Aquest primer apartat té per finalitat conèixer el funcionament a nivell teòric i l'estat actual de l'energia fotovoltaica.
- Proposta d'implementació de plaques fotovoltaïques per a la localitat de Ripollet. En aquest bloc, s'analitzarà el consum actual de la localitat per franges horàries i el potencial de generació que té. Un cop dimensionat el sistema, se simularà amb models matemàtics el comportament que tindrà aquesta nova tecnologia en la xarxa per detectar possibles problemes i intentar fer la xarxa més eficient.

4. L'energia fotovoltaica

Un dels assumptes més importants de la sostenibilitat en el context actual és l'obtenció d'energia de fonts d'energia renovables. L'energia fotovoltaica és aquella energia elèctrica que prové de la transformació directa de la radiació solar en electricitat, és generada a partir de panells solars fotovoltaics. És una de les fonts més prometedores per fer front a l'escalfament global i a la descarbonització. Al provenir de la radiació solar, es tracta d'una font inesgotable i el procés de transformació és no contaminant.

El procés de transformació consisteix en l'efecte fotoelèctric, que és la generació d'una diferència de potencial causada per l'excitació dels electrons d'un semiconductor a partir de la radiació solar. Al connectar-se diversos panells en sèrie, s'assoleix una diferència de potencial més elevada.



Il·lustració 4.1 – Funcionament cel·la fotovoltaica bàsica

El material utilitzat és el silici, que representa més d'una quarta part de l'escorça terrestre i, seguit de l'oxigen, és el segon element més abundant del planeta. La durabilitat de les cel·les pot superar els 25 anys sense perdre potència, produint en aquets període entre 10 i 20 vegades el cost energètic de la seva producció. Els progressos més recents s'han basat en la reducció del cost de producció i l'optimització de la seva eficiència. En l'última dècada, el cost de les cel·les fotovoltaïques per watt ha disminuït un 16%. Segons aquesta observació, es pot aplicar una analogia a la Llei de Moore, la qual indica que el preu dels panells baixa entorn un 20% cada cop que se'n dobla la producció.

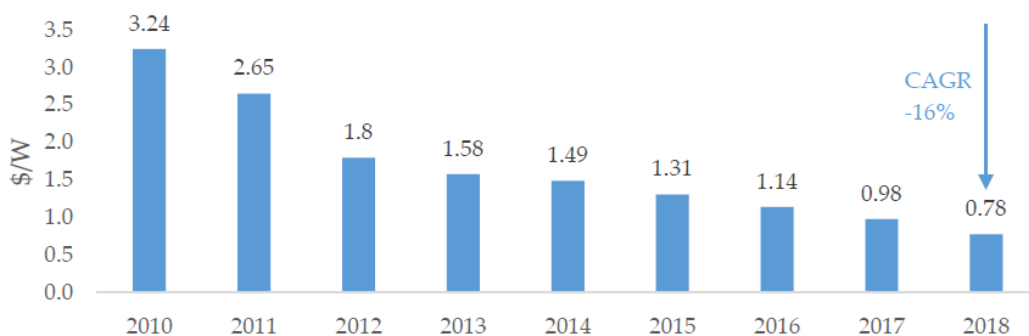


Figure 14. Photovoltaic utility cost (\$/W).

Il·lustració 4.2 – Cost del servei fotovoltaic [1]

Aquesta tendència i la derogació del **Real Decreto 900/2015** de 9 de octubre de 2015, també conegut com “Impost al Sol”, conviden a pensar que la producció d’energia fotovoltaica per a l’autoconsum creixerà significativament en els pròxims anys a tot l’estat.

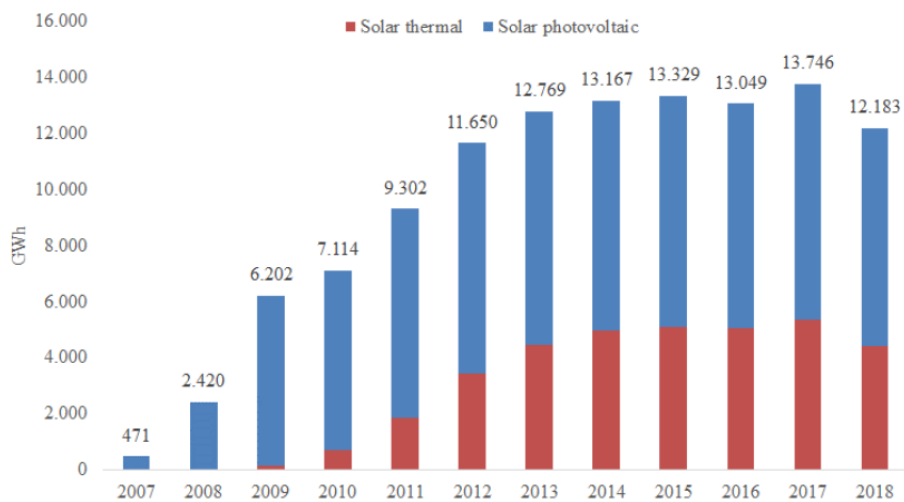


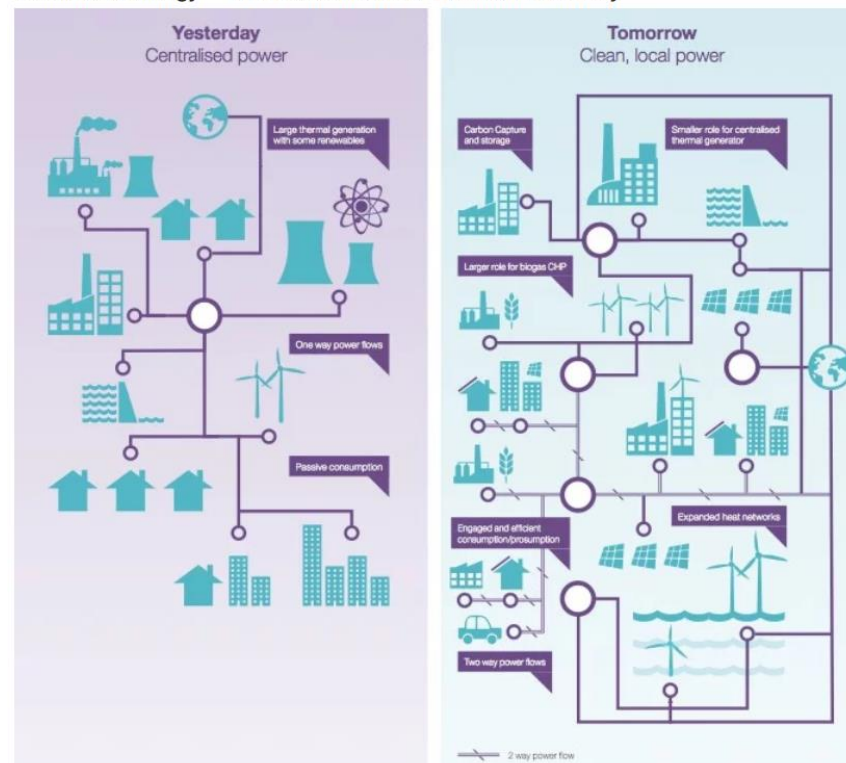
Figure 21. Spanish annual solar generated electricity (GWh).

Il·lustració 4.3 – Generació de l’energia fotovoltaica a Espanya [1]

5. Xarxes intel·ligents

Una xarxa intel·ligent és aquella que permet integrar de forma eficient el comportament i les accions de tots els usuaris connectats a ella. D'aquesta manera, quan es produeixi la transició energètica i la producció sigui descentralitzada, les xarxes intel·ligents facilitaran un sistema energètic sostenible, bidireccional, que comuniqui i coordini dinàmicament tots els punts de producció i consum, amb baixes pèrdues i alts nivells de seguretat en el subministrament. D'aquesta manera, els consumidors actuals passaran tenir un rol diferent en el sistema i seran també productors, a aquest nou paper se'l coneix com "prosumers".

Distributed Energy – "Thousand Flowers" Transition Pathway



Il·lustració 5.1 – Transició de la distribució d'energia elèctrica

5.1. Comptadors intel·ligents

Es tracta d'un comptador tradicional però amb la distinció que permet la discriminació horària i té capacitat de tele-gestió, és a dir, que es pot tractar la informació del comptador de forma remota.

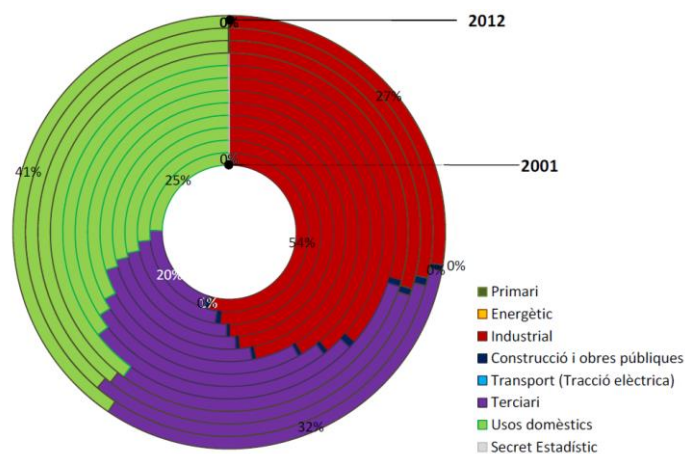
La discriminació horària és l'aplicació del cost de l'energia en funció de si es consumeix en hores puntes o hores vall. Actualment, la gran part dels comptadors no són intel·ligents i no disposen de mesura horària, és per això que s'utilitzen els perfils de liquidació. Els perfils de liquidació els elabora el Ministeri d'Indústria, Energia i Turisme i s'utilitzen per estimar el comportament de la demanda, es calculen a partir de la potència contractada i dels nivells de tensió. Amb l'objectiu de millorar aquest funcionament, s'ha posat en marxa el projecte PERFILA, que consisteix en implementar comptadors intel·ligents per poder conèixer amb exactitud el consum horari en cada punt de la xarxa, un avanç molt significatiu per a poder implementar molts petits punts d'aportació d'energia.

6. Consum elèctric Ripollet

El primer pas per a poder realitzar una simulació el més pròxima a la realitat és l'obtenció de les dades dels consums i quantificar l'energia que es podria generar d'origen fotovoltaic. En aquest apartat, es fa un estudi amb la fi d'estimar el consum, classificat per hores i sectors, per al cas de l'estiu i de l'hivern.

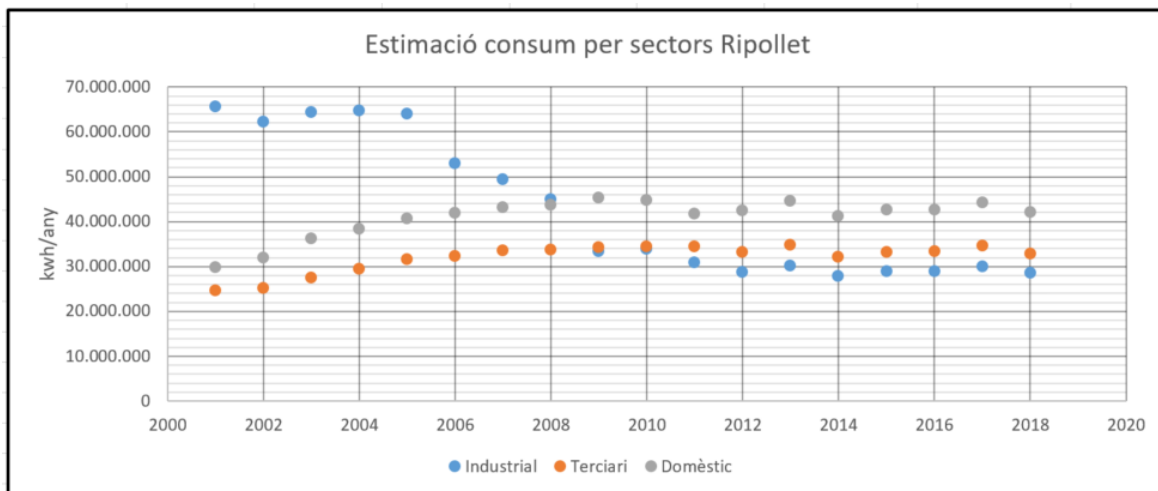
6.1. Classificació per sectors

Aquest estudi parteix de les dades que proporciona la *Direcció de Serveis Ambientals de l'AMB*. Aquestes dades permeten quantificar la proporció d'energia elèctrica consumida per als 3 sectors principals que hi ha en la localitat, la problemàtica per l'estudi és que només hi ha dades fins a l'any 2012.



Il·lustració 6.1 – Consum anual a Ripollet distribuït per sectors [1]

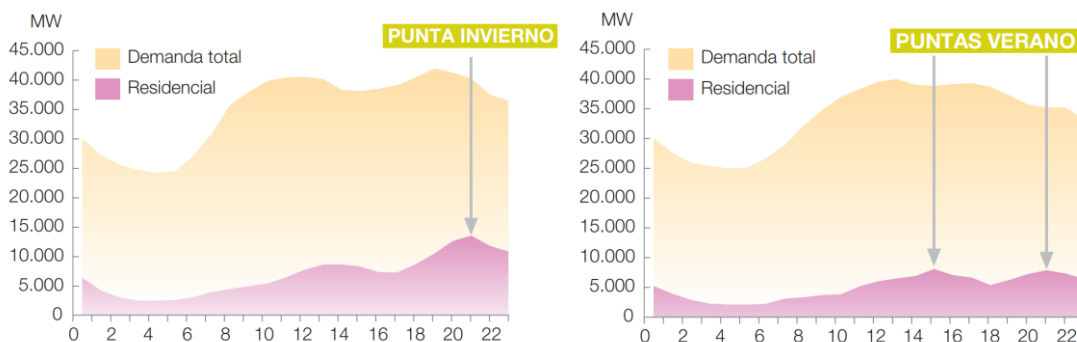
Per fer una estimació del consum que hi ha en cada sector fins a dia d'avui, s'ha comparat el consum total a Catalunya, que es té quantificat fins a l'any 2018, amb el consum que hi ha a Ripollet. S'ha buscat la relació que hi ha entre aquests dos consums i s'ha extrapolat fins a l'últim any que es tenen dades. Els consums corresponents a cada sector s'han calculat mantenint la proporció d'energia consumida en l'últim any que es tenen dades de cada sector a Ripollet.



Il·lustració 6.2 – Estimació del consum per sectors a Ripollet fins al 2018

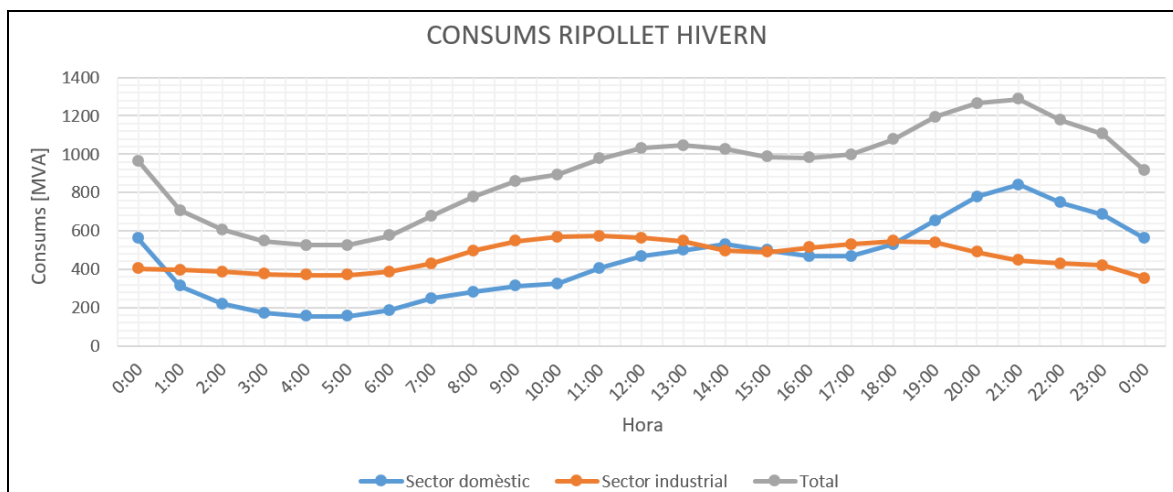
6.2. Estimació del consum horari per a cada sector

Per a fer l'estimació del consum que hi ha en cada moment per a cada sector s'ha partit de les corbes de consum per sectors proporcionades per la Red Eléctrica de España. Aquest estudi determina les hores puntes de la demanda total i la residencial a l'estiu i a l'hivern.

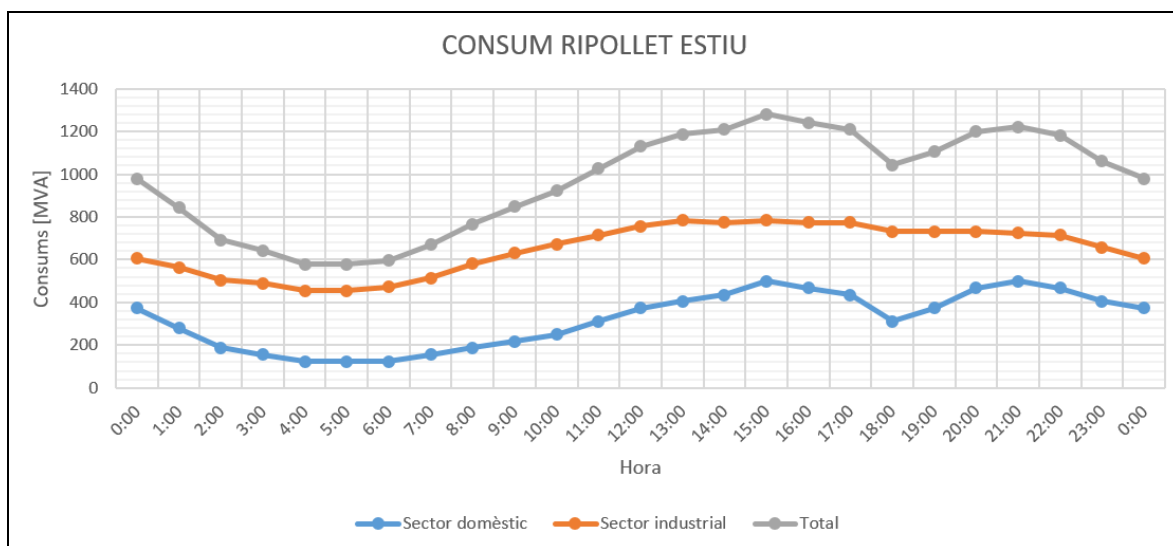


Il·lustració 6.3 – Corbes de consum horari a Espanya [2]

Per calcular el consum en cada instant a Ripollet, s'ha adaptat la corba perquè sumi el consum total, de forma que la integral de les corbes de consum són els consums totals calculats anteriorment. Les corbes del sector industrial s'han extret de la corba que surt com la diferència de la demanda total menys el consum domèstic.



Il·lustració 6.4 – Corbes de consum horari a l'hivern a Ripollet



Il·lustració 6.5 – Corbes de consum horari a l'estiu a Ripollet

El consum als habitatges a l'hivern és màxim a les 21h i, per a l'estiu té un pic al mig dia i un altre al vespre, cosa que sembla raonable. La potència domèstica total consumida a l'hivern és superior a la de l'estiu cosa que també coincideix amb la percepció que es tenia d'aquest consum.

Pel que fa al consum industrial és més constant, tant al llarg de l'any, com al llarg del dia i les hores punta són a mig matí i a la tarda.

El consum total té un pic a les 21h a l'hivern i dos pics més atenuats a l'estiu, a les 15h i a les 21h.

7. Producció fotoelèctrica Ripollet

En aquest apartat s'esbrina quina seria la generació elèctrica d'origen fotovoltaic si s'instal·lessin un gran nombre de plaques a la localitat repartides per als 2 sectors. El primer pas és quantificar la irradiació solar, per poder-la aplicar a l'àrea que es cregui factible d'instal·lar els panells fotovoltaics.

7.1. Irradiació solar

7.1.1. Inclinació dels panells

Un paràmetre important atènyer en compte a l'hora d'instal·lar els panells fotovoltaics és la orientació i inclinació d'aquests. Per obtenir el màxim rendiment dels panells, els raigs solars han d'incidir perpendicularment a la superfície. Per tant, si són fixes, com és el cas, a l'hemisferi nord cal orientar-los a Sud i inclinar-los en funció de la latitud. L'angle d'incidència del sol depèn també de l'època de l'any, al solstici d'hivern a Barcelona és de 23°, mentre que a l'estiu és de 72°. És per aquest motiu que, la inclinació òptima a aquesta latitud és entre els 20° i els 40°. S'ha escollit una inclinació de 30° perquè s'ha trobat una taula amb la radiació solar mitjana classificada per mesos i hores de Barcelona.

Inclinació: 30°. Orientació: 0°																	
Mes	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	Total
Gen	0	0	0	226	741	1236	1641	1869	1869	1641	1236	741	226	0	0	0	11426
Feb	0	0	0	442	974	1506	1935	2175	2175	1935	1506	974	442	0	0	0	14065
Mar	0	0	180	687	1267	1829	2276	2524	2524	2276	1829	1267	687	180	0	0	17524
Abr	0	14	367	922	1528	2099	2546	2792	2792	2546	2099	1528	922	367	14	0	20539
Mai	0	97	504	1074	1676	2232	2671	2906	2906	2671	2232	1676	1074	504	97	0	22320
Jun	0	130	566	1140	1736	2291	2710	2938	2938	2710	2291	1736	1140	566	130	0	23022
Jul	0	114	539	1116	1720	2284	2711	2944	2944	2711	2284	1720	1116	539	114	0	22858
Ago	0	50	430	1003	1619	2195	2655	2901	2901	2655	2195	1619	1003	430	50	0	21708
Set	0	0	262	803	1409	1990	2448	2701	2701	2448	1990	1409	803	262	0	0	19228
Oct	0	0	0	553	1121	1681	2130	2380	2380	2130	1681	1121	553	0	0	0	15729
Nov	0	0	0	309	828	1342	1761	1995	1995	1761	1342	828	309	0	0	0	12469
Des	0	0	0	160	678	1164	1564	1789	1789	1564	1164	678	160	0	0	0	10709

Taula 7.1 – Radiació solar per a un pla inclinat 30° a Barcelona [3]

7.1.2. Temperatura dels panells

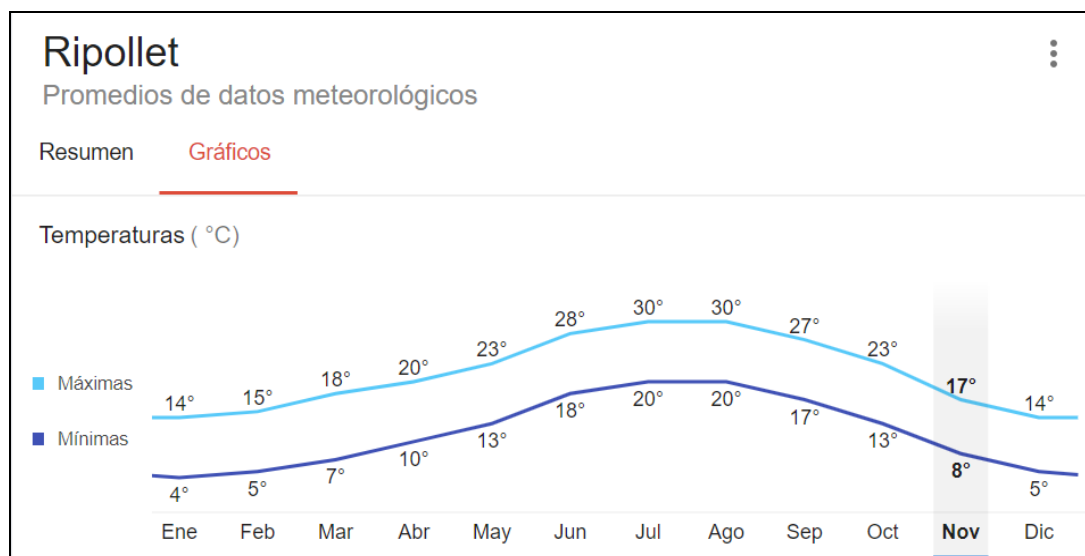
El rendiment dels panells també depèn de la temperatura d'aquests, és per aquest motiu que s'ha determinat la temperatura que assoleix el panel a partir de la temperatura ambient i de la radiació.

$$T_c = T_a + G \cdot \frac{TONC-20}{800}$$

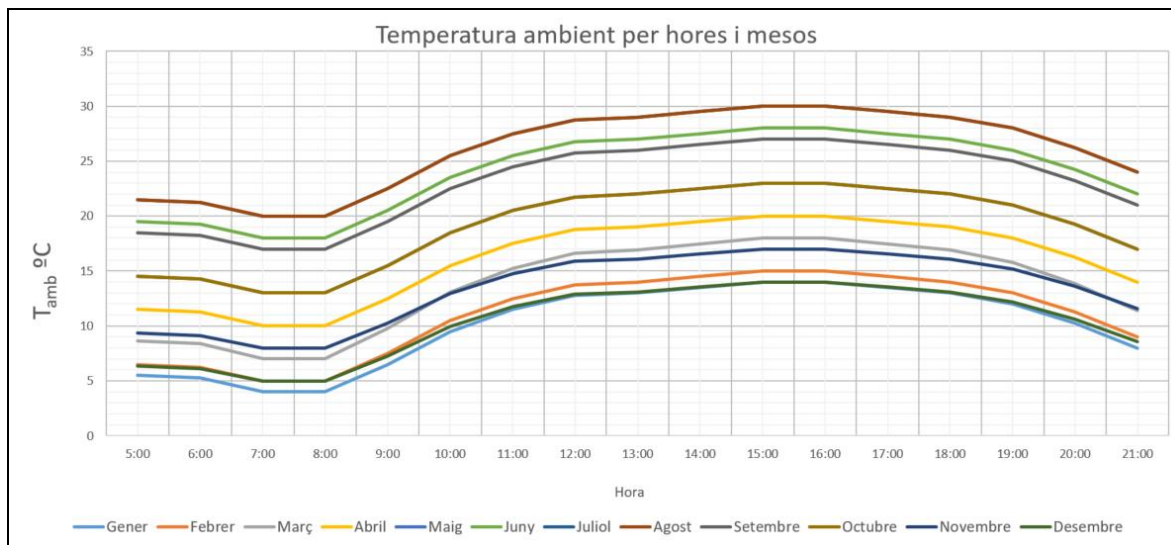
Eq 7.1- Equació temperatura de treball cel·la fotovoltaica

La TONC és la temperatura d'operació nominal de la cèl·lula, és la temperatura que assolixen les cel·les d'un panell concret a 20°C de temperatura ambient i una irradiància de 800 W/m². Aquest valor oscil·la entre 43°C i 47°C i com més petit sigui el panell tindrà un rendiment més alt, per a l'estudi s'ha agafat 45°C, que és un valor comú proporcionat pels fabricants.

La temperatura ambient, en cada hora i mes de l'any, s'ha estimat a partir de les temperatures màximes i mínimes de cada més i el comportament mitjà que té al llarg del dia, per variable que sigui. D'aquesta manera, s'ha obtingut, una corba de la temperatura ambient per cada hora i per a cada mes de l'any.

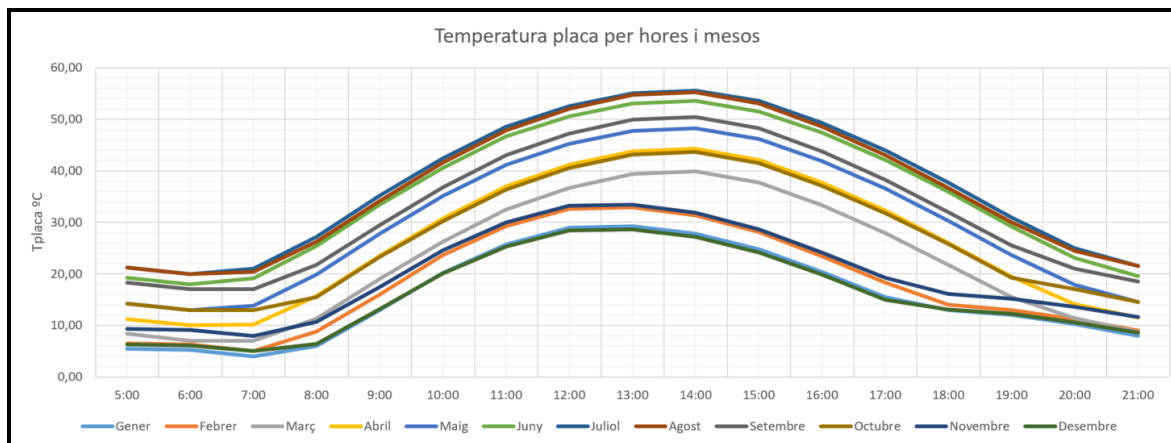


Il·lustració 7.1- Temperatures màximes i mínimes Ripollet per mesos



Il·lustració 7.2 – Temperatura ambient de Ripollet, classificada per hores i mesos

Tenint la temperatura ambient i la irradiació solar per a cada hora i mes de l'any, es calculen les temperatures que assoleix la placa en cada moment, aplicant l'equació Eq 7.1- Equació temperatura de treball cel·la fotovoltaica.



Il·lustració 7.3 – Temperatura cel·la a Ripollet, classificada per hores i mesos

La temperatura de la placa s'utilitza bàsicament per al càlcul del rendiment fotovoltaic de les cel·les.

7.2. Simulació de la producció fotovoltaica

Per fer la simulació de la producció fotovoltaica s'ha escollit el model següent, que permet treure les corbes de corrent-tensió a partir de la irradiació i la temperatura de les cel·les. En aquest model, se simula la producció que ofereix 1m² en la localització concreta i, a partir d'aquests valors, s'examina quina és la potència que es podria instal·lar a cada zona. El model està basat ens les següents equacions:

- Corrent fotoelèctrica:

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad \text{Eq 7.2}$$

- Corrent de saturació:

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot K}\right] \quad \text{Eq 7.3}$$

- Corrent de saturació invers:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\frac{q \cdot V_{oc}}{e^{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}} - 1} \quad \text{Eq 7.4}$$

- Corrent a través del resistor:

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad \text{Eq 7.5}$$

- Corrent de sortida:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(q \cdot \frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{sh} \quad \text{Eq 7.6}$$

Tenint les variables i constants següents:

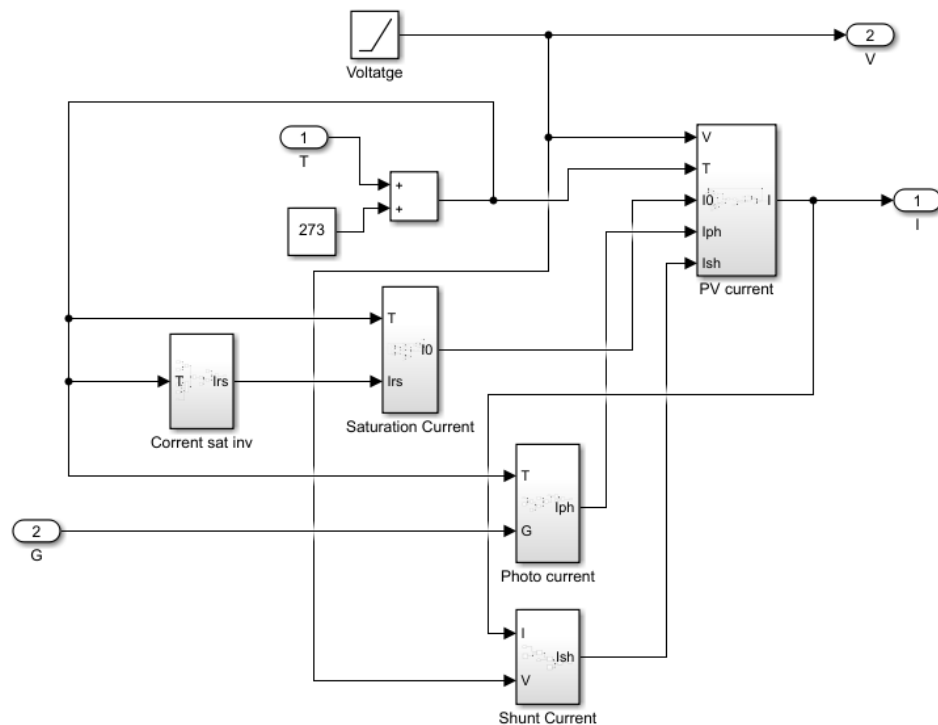
Nom	Descripció	Valor
I_{ph}	Corrent fotoelèctric (A)	I_{ph}
I_{rs}	Corrent de saturació invers (A)	I_{rs}
I_{sh}	Corrent a través del resistor (A)	I_{sh}
I	Corrent de sortida (A)	I
V	Voltatge sortida (V)	V
G	Irradiació solar (W/m^2)	G
T	Temperatura de les cel·les (K)	T
I_{sc}	Corrent de curtcircuit (A)	8,21 A
T_n	Temperatura nominal	298 K
k_i	Corrent de curtcircuit d'una cel·la a $25^\circ C$ i $1000W/m^2$	0,032 A
q	Càrrega electró	$1.6 \cdot 10^{-19}$ C
V_{oc}	Tensió de circuit obert	32,9 V
n	Factor d'idealitat del díode	1,3
K	Constant de Boltzmann	$1,38 \cdot 10^{-23}$ (J/K)
E_{g0}	Energia de la banda prohibida del semiconductor	1,1 (eV)
N_s	Nombre de cel·les connectades en sèrie	54
N_p	Nombre de mòduls connectats en paral·lel	1
R_s	Resistència en sèrie	0.221 (Ω)
R_{sh}	Resistència de desviació	415.405 (Ω)

Taula 7.2 – Valors modelització panel fotovoltaic

Coneixent la temperatura de les cel·les i la irradiació solar per a cada hora del dia i per als dos mesos més extrems de l'any (Desembre i Juliol), es té un sistema de 5 equacions i 5 incògnites (5 primeres variables de la *Taula 7.3 – Valors modelització panel fotovoltaic*), a resoldre per cada cas.

Per resoldre'l, s'ha optat per representar-lo en un sistema de blocs a l'entorn *Simulink*, de *Matlab*, on es tindrà per entrades els valors que s'han d'anar modificant (G i T) i per sortides la tensió i el corrent (veure *Annex C*, adjunt a la memòria, per més detall).

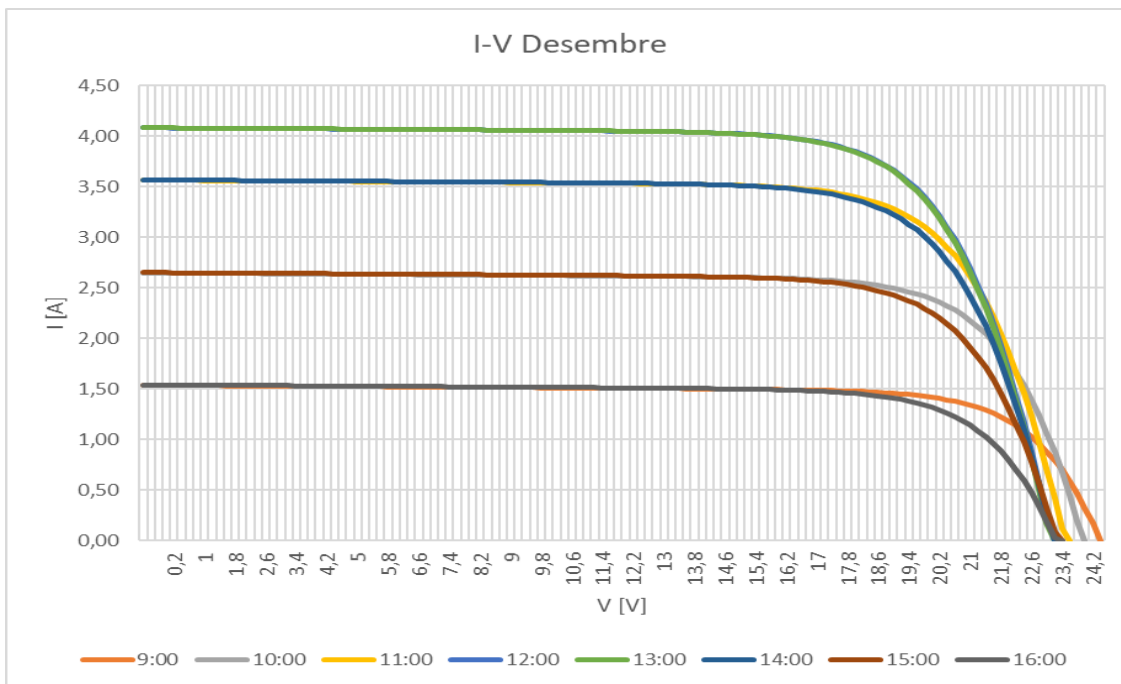
A continuació es mostra la connexió dels blocs generals, ja simplificats, cadascun corresponent a una de les equacions anteriors.



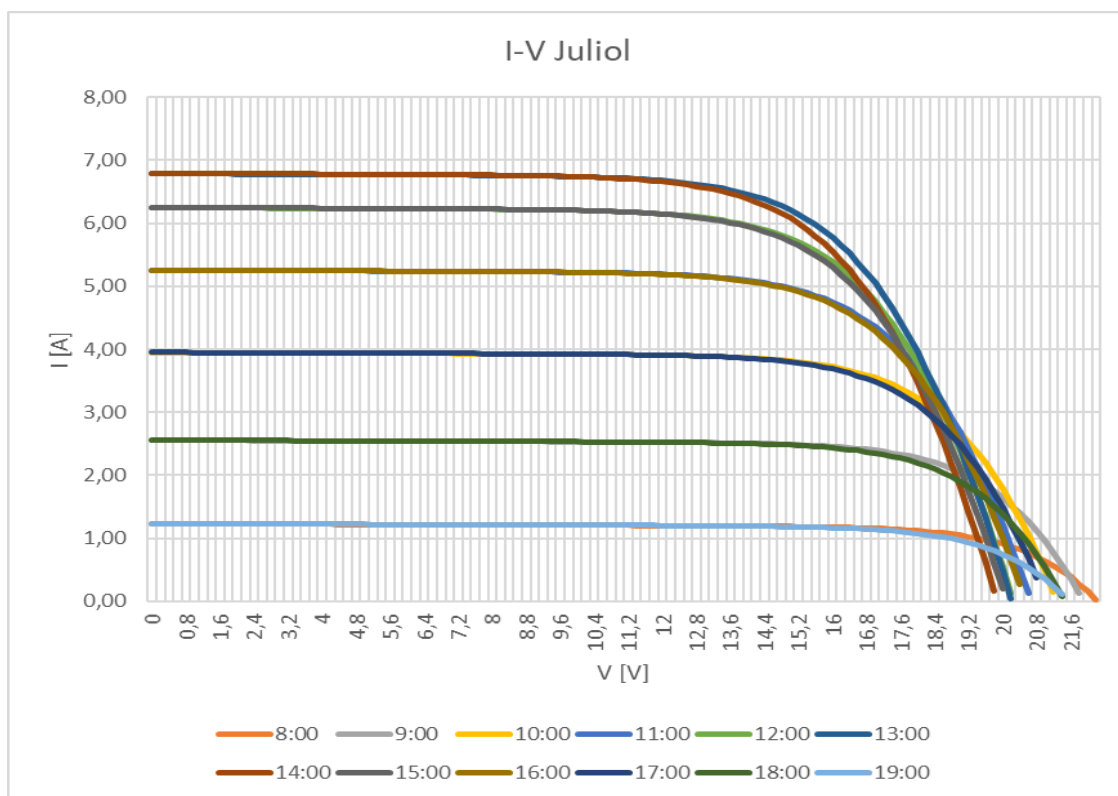
Il·lustració 7.4 - Representació blocs sistema global simplificat

Per a la simulació, s'ha introduït el voltatge en forma de rampa amb un pas de 0,2 V de forma que s'obté una corba corrent-tensió sense singularitats per a cada hora, pel que no ha estat necessari reduir aquest interval.

A continuació es mostren les corbes corrent-tensió obtingudes per als dos mesos més crítics.

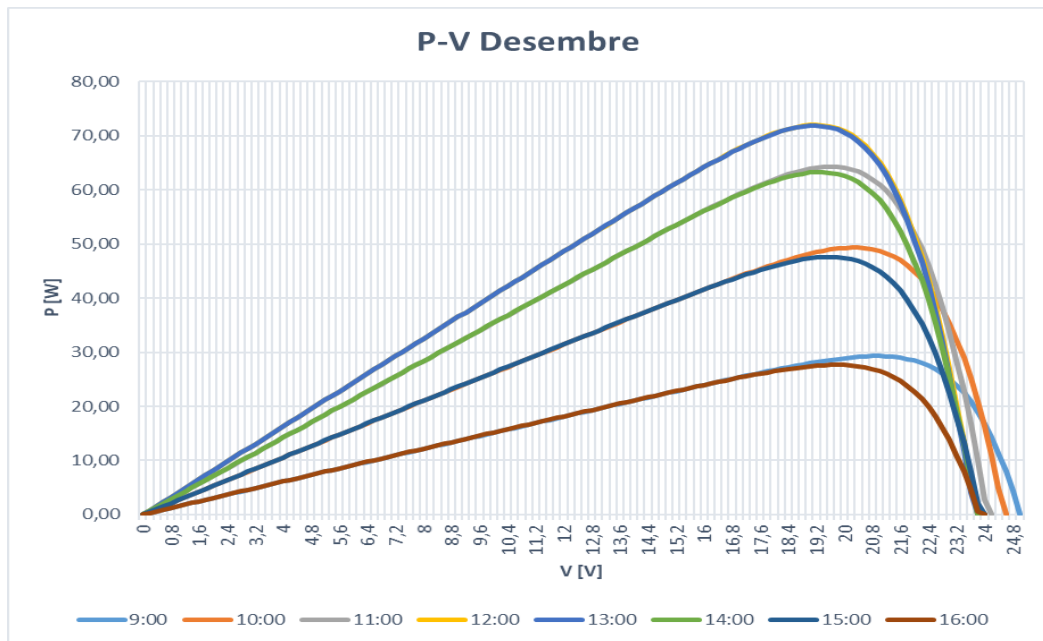


Il·lustració 7.5 – Corbes corrent-tensió per hores producció fotovoltaica Desembre

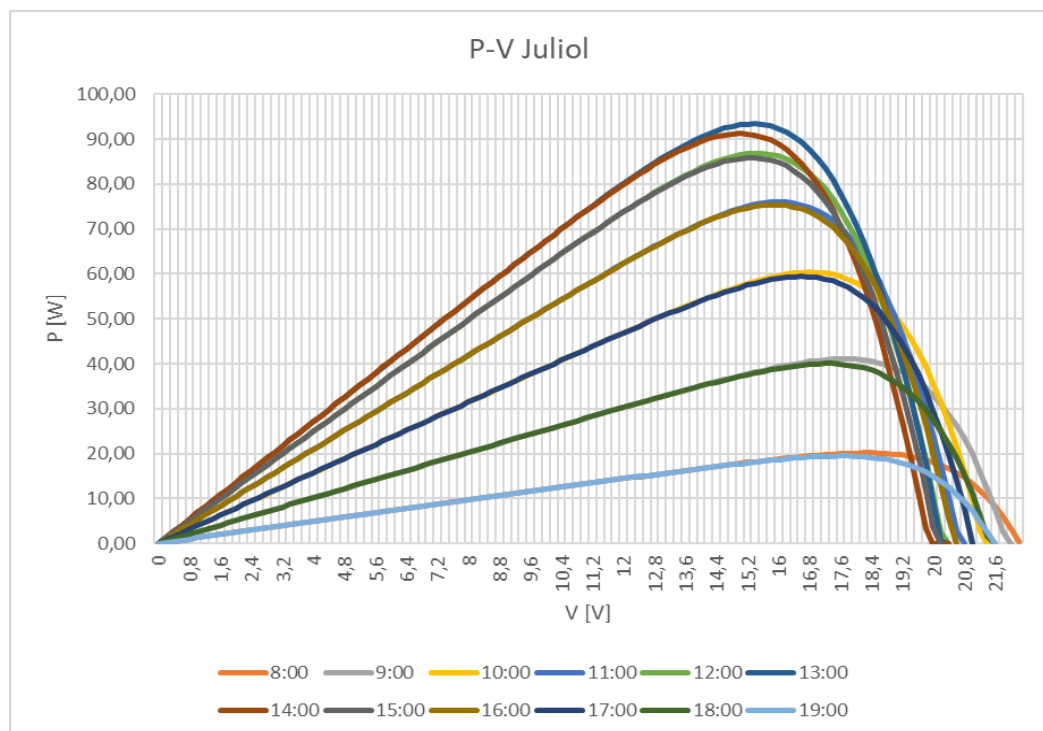


Il·lustració 7.6 - Corbes corrent-tensió per hores producció fotovoltaica Juliol

Posteriorment, aplicant la fórmula de la potència, s'obtenen les corbes de potència generada en funció del voltatge.



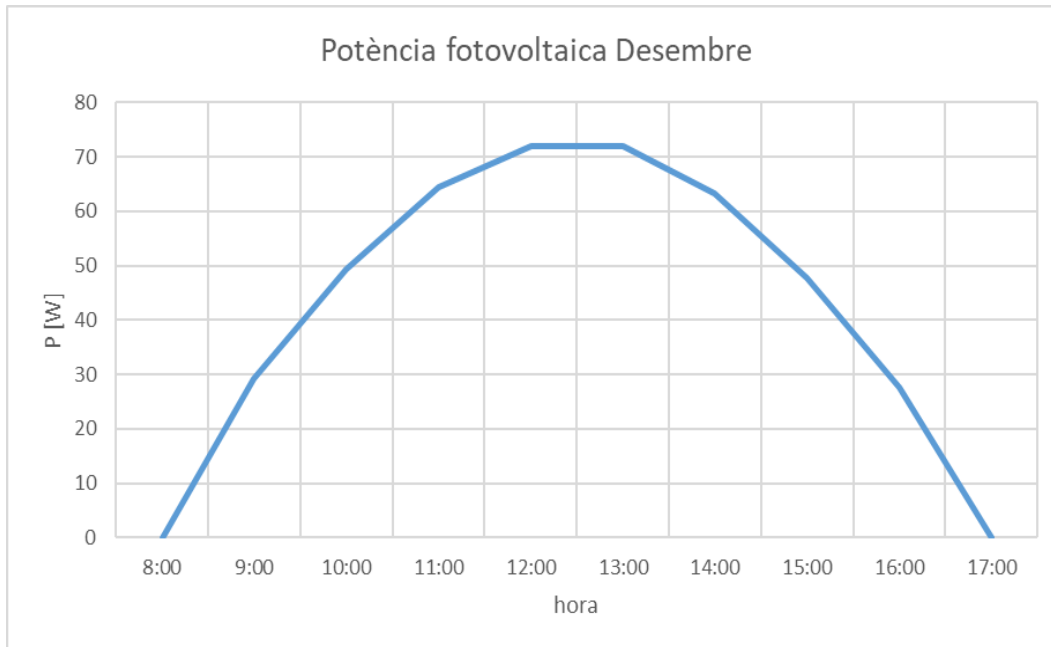
Il·lustració 7.7- Corbes potencia-tensió per hores producció fotovoltaica Desembre



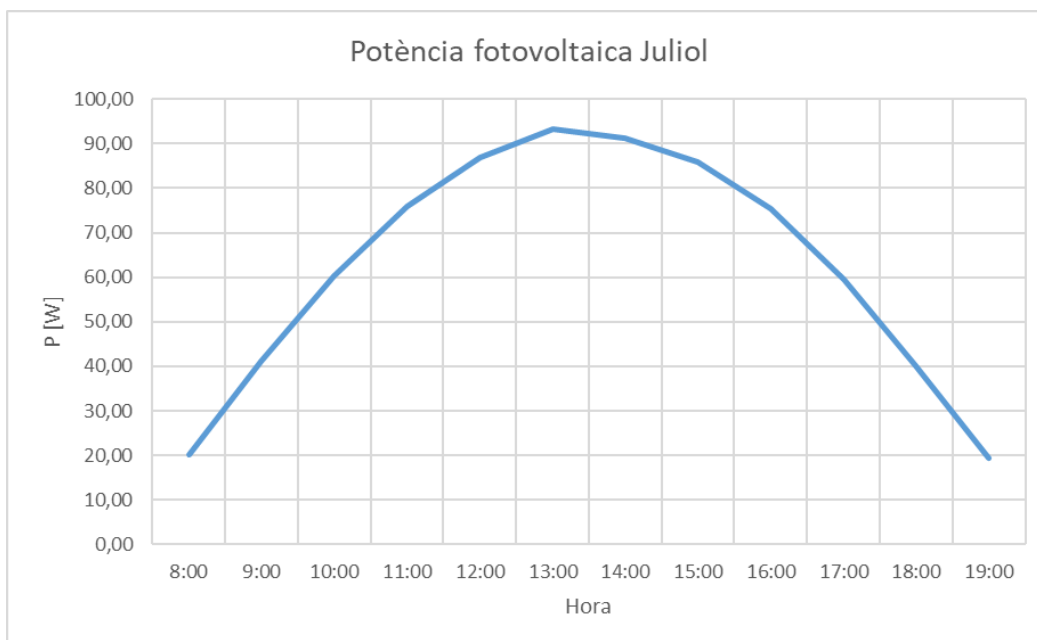
Il·lustració 7.8 - Corbes potencia-tensió per hores producció fotovoltaica Juliol

Com s'observa, les potències màximes s'assoleixen a les 13-14h per a tensions de 20 V a l'hivern i de 16 V a l'estiu.

Per acabar aquest apartat, es calculen les corbes de potència per metre quadrat, que es donaran per als dos mesos agafant les potències màximes de cada hora.



Il·lustració 7.9 – Corba de màxima potència hivern

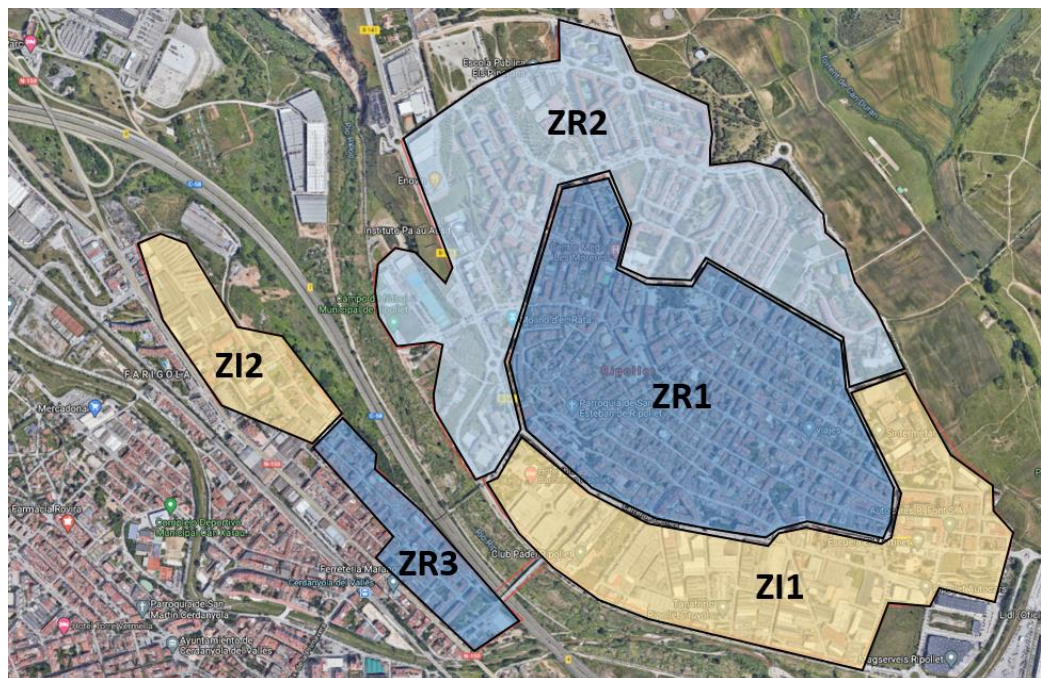


Il·lustració 7.10– Corba de màxima potència estiu

7.3. Àrea potencial instal·lable

Tenint les potències per metre quadrat que se subministren en cada instant del dia per als dos mesos a estudiar, el següent pas és analitzar l'àrea que es pot destinar a la producció fotovoltaica en cada zona, on posteriorment es justificarà més detalladament la seva separació.

El que cal saber per aquest apartat és que el poble s'ha separat en 5 zones, dos d'industrials i tres de residencials, amb configuracions diferents. A continuació es mostra un mapa i una taula de continguts a on s'identifiquen i es fan paleses les seves singularitats.



Il·lustració 7.11 – Mapa de Ripollet amb les zones escollides

Nom	Tipus	Àrea	% Àrea aprofitable	Àrea instal·lació
ZR1	Residencial	735.492	25	183.873
ZR2	Residencial	773.004	30	231.901
ZR3	Residencial	109.841	25	27.460
ZI1	Industrial	647.826	50	323.913
ZI2	Industrial	152.645	50	76.323

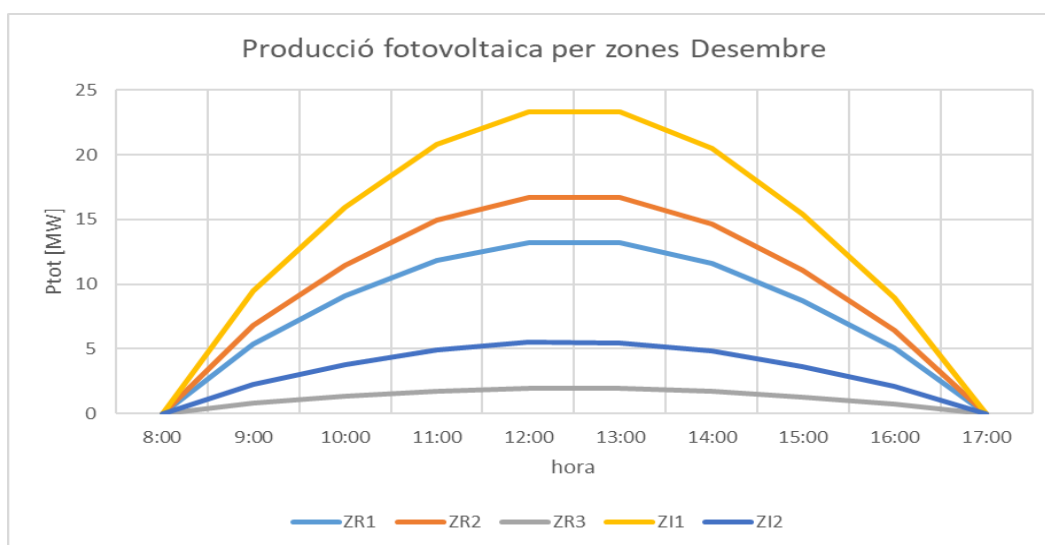
Taula 7.4 – Tipus i àrees de les zones escollides

S'ha escollit el percentatge d'àrea aprofitable per a la producció fotovoltaica en funció del tipus de construcció que hi ha en cada zona, per inspecció directa. Les zones industrials, formades per polígons amb cobertes planes, tenen el factor més alt, sent del 50%. Pel que

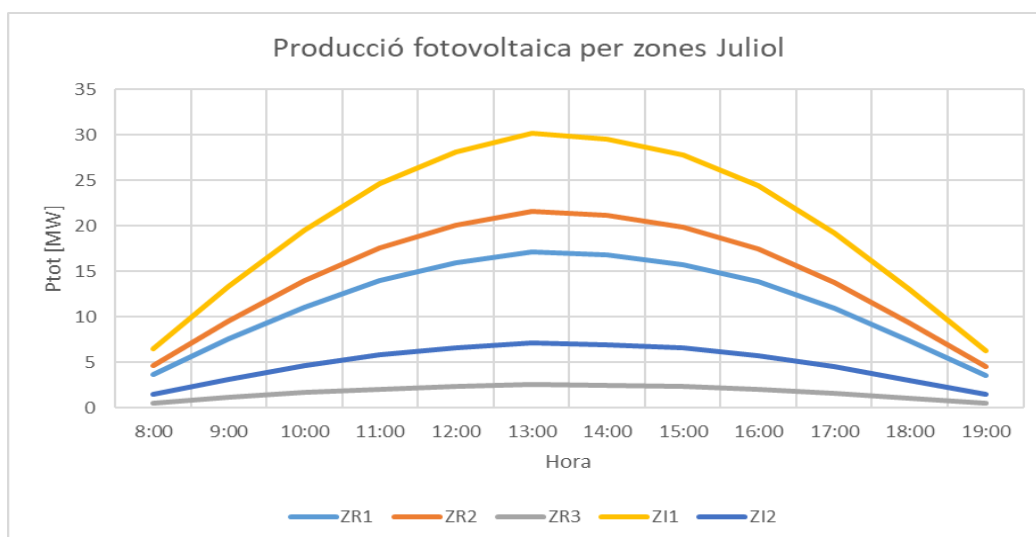
fa a les zones residencials, les dues zones que tenen més densitat de població tenen el factor d'aprofitament més baix degut al tipus de construcció, que té diferents alçades que provoquen més zones obagues.

7.4. Producció fotoelèctrica per sectors i zones

Coneixent, per a cada zona, l'àrea total que es pot destinar a la generació i la producció per metre quadrat per cada instant, es poden obtenir les corbes de potència fotovoltaica total corresponents a cada zona, per al Desembre i al Juliol.



Il·lustració 7.12 – Producció fotovoltaica zones hivern



Il·lustració 7.13 – Producció fotovoltaica zones estiu

Al tractar-se de smart grids, s'assumeix que tota la potència fotovoltaica generada en una zona serà consumida. És a dir, si un particular té un excedent de producció en un instant donat, serà capaç de subministrar aquesta energia a un altre particular de la mateixa zona que la pugui consumir en aquell mateix instant.

Per tant, les xarxes dins de cada zona són del tipus malla i permeten el flux de potències generades entre les diferents vivendes o fàbriques.

S'observa que les zones on les produccions són més baixes són, com era d'esperar, les zones ZR3 i ZI2, que tenen una àrea més petita.

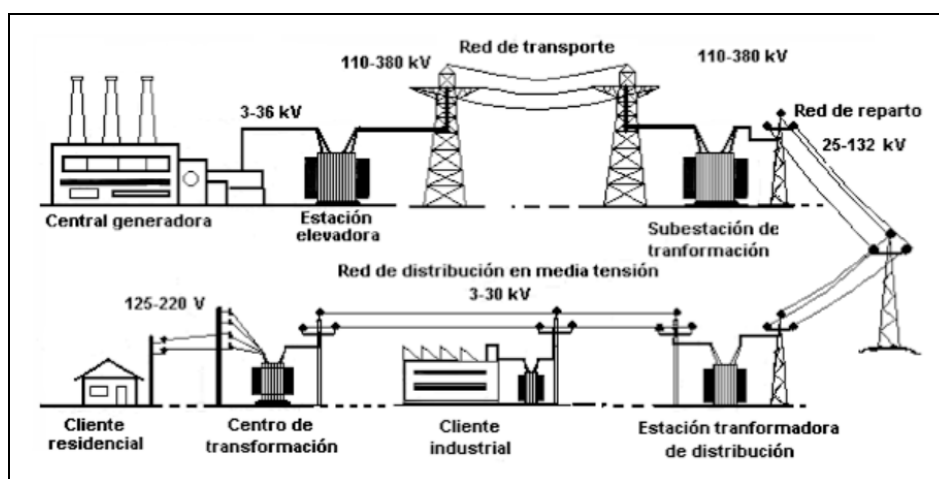
Lògicament, les produccions són més altes a l'estiu però no d'una forma molt considerable degut a l'elecció de l'angle de les plaques i l'afectació de la temperatura de les cel·les en el seu rendiment.

8. Xarxes elèctriques

8.1. Tipus

8.1.1. Xarxa radial

És el sistema més senzill de transport d'energia elèctrica, està format per un únic punt de generació des del qual es ramifiquen diverses línies que connecten els múltiples punts de consum. És poc segur, donat que en cas que hi hagi alguna irregularitat en el sistema, no existeixen vies alternatives per a transportar l'energia. Per altra banda, és el més econòmic per als usuaris que estan separats de la font de generació. Cal tenir en compte la caiguda de tensió, com més lluny es trobi la càrrega, hi haurà més caiguda de tensió deguda a les pèrdues en el transport.



Il·lustració 8.1 – Esquema del transport d'una xarxa centralitzada

8.1.2. Xarxa mallada

L'energia procedeix de diferents centres de generació i les subestacions de distribució s'abasteixen amb la seva pròpia xarxa de subtransmissió. El principal inconvenient és que el sistema és més complex i costós però, per altra banda, resulta més segur, flexible i eficient.

8.2. Components

A continuació s'expliquen els principals elements que apareixen al sistema, cal entendre el seu comportament per realitzar la simulació.

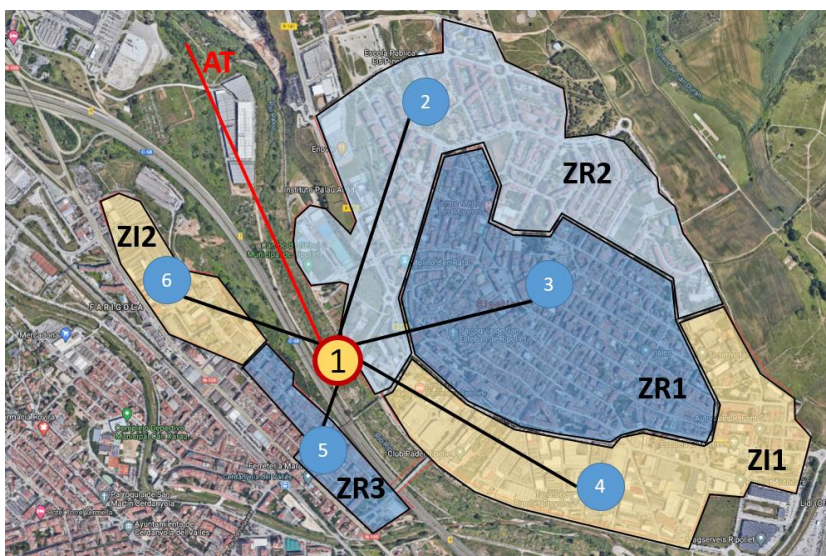
- Generadors síncrons: en els sistemes anomenats *Slack Bus* en anglès, són els busos encarregats de subministrar potència activa i reactiva per equilibrar el sistema.
- Transformadors: s'utilitzen per adequar els nivells de tensió als diferents punts de la xarxa. La relació de transformació pot ser fixa o variada. La modificació de mòdul o fase permet també adaptar el flux de potència activa i reactiva a la línia.
- Línies de transmissió: és l'element encarregat de connectar la resta d'elements per transportar l'energia fins als punts de consum. Les seves caracterització es fa amb les resistències, que s'obtenen en funció de la distància i els cables utilitzats.
- Bateria de condensadors: són equips que permeten reduir la demanda d'energia reactiva de la xarxa. Se solen implementar en punts en que hi ha una càrrega reactiva massa elevada.
- Càrregues: Són aquells punts on es produeix el consum de l'energia del sistema per realitzar operacions industrials o domèstiques.

9. Modelització

9.1. Distribució de les càrregues i de les produccions fotovoltaïques

Per modelitzar el cas, s'ha dividit el consum en 6 zones identificades en el mapa que, segons la mida i el tipus d'activitat que s'hi realitza, presenten consums i futures produccions fotovoltaïques diferents. El tipus de xarxa escollit és radial, donat que es tracta de la més emprada per motius econòmics.

El consum en les zones residencials s'ha distribuït en funció de la població que hi viu, aplicant dues densitats de població, que proporcionen la població total real de Ripollet, 38.347 habitants. Pel que fa al consum en les zones residencials i la futura producció fotoelèctrica, s'han repartit tenint en compte únicament les àrees corresponents a cada zona.



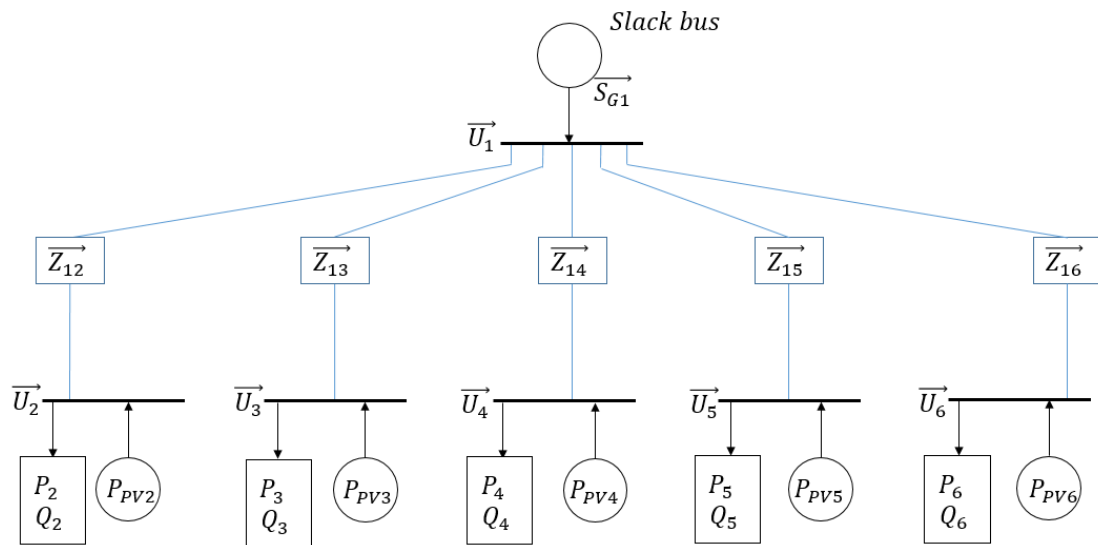
Il·lustració 9.1- Esquema de les connexions d'AT

Nom	Tipus	Àrea	Densitat Pobl	Població	Part del consum	Prod. Fotoelectr
ZR1	Residencial	735.492	0,0348	25.570	0,6668	0,4545
ZR2	Residencial	773.004	0,0116	8.958	0,2336	0,4777
ZR3	Residencial	109.841	0,0348	3.819	0,0996	0,0679
ZI1	Industrial	647.826	-	-	0,8093	0,8093
ZI2	Industrial	152.645	-	-	0,1907	0,1907

Taula 9.1 – Repartiment del consum i l'energia fotovoltaica produïda per zones

Per a la caracterització de la càrrega s'ha utilitzat un factor de potència de 0,95 en les zones residencials i de 0,85 per a les industrials.

D'aquesta manera, ens queda un sistema com el de l'esquema següent. Les càrregues i produccions fotovoltaïques seran diferents en cada hora del dia per a les estacions d'hivern i estiu, que són els dos casos extrems.



II-lustració 9.2 – Esquema elèctric del transport a AT de les zones

9.2. Selecció i caracterització del cablejat

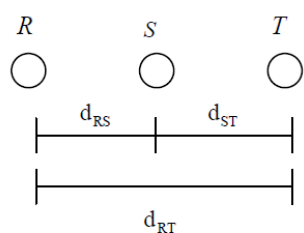
El cablejat seleccionat es tracta d'un cable coaxial d'alta tensió d'alumini, que és dels més utilitzats per a aquest tipus d'instal·lació. El diàmetre de cada branca s'ha dimensionat en funció de la potència màxima a de transportar, sent de 20 mm per a les potències superiors a 500 MW i de 15 mm per a les inferiors.

Tenint els diàmetres i les distàncies mínimes entre nodes, s'han calculat les resistències corresponents a cada connexió, segons [5]:

$$R = \rho \cdot \frac{\text{long}}{S} \quad \text{Eq 9.1}$$

$$X_L = \omega \cdot L \quad \text{Eq 9.2}$$

$$L = \left[\frac{1}{2n} + 2 \cdot \ln \left(\frac{D_e}{r_e} \right) \right] \cdot 10^{-4} \cdot \text{long} \quad \text{Eq 9.3}$$



$$D_{e\text{ circuito}} = \sqrt[3]{d_{RS} \cdot d_{ST} \cdot d_{RT}} \quad [m]$$

Eq 9.4

Nom zona	ZR2	ZR1	ZI1	ZR3	ZI2
ID Zona	2	3	4	5	6
Pact max (MW)	196,80	560,54	633,56	83,71	149,28
long min (km)	0,97	0,76	1,10	0,33	0,69
long (km)	1,46	1,14	1,65	0,50	1,04
Material	Al	Al	Al	Al	Al
Resist. Cable (Ω/km)	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04
Dext (mm)	15	20	20	15	15
ρ (Ωmm ² /km)	26	26	26	26	26
S (mm ²)	706,86	1256,64	1256,64	706,86	706,86
R (Ω)	0,054	0,024	0,034	0,018	0,038
drs, dst (m)	-	-	0,10	-	0,10
De (m)	-	-	0,13	-	0,13
L [H/km]	5,00E-05	5,00E-05	9,62E-05	5,00E-05	9,62E-05
XL(Ω)	0,023	0,018	0,050	0,008	0,031

Taula 9.2 – Caracterització de les connexions a cada zona

Havent realitzat la simulació del sistema, posteriorment en aquest treball, es verificarà que la selecció escollida compleix amb les caigudes màximes de tensió admeses. En cas negatiu, es redimensionarà el cablejat, per reduir les pèrdues, i es tornarà a simular.

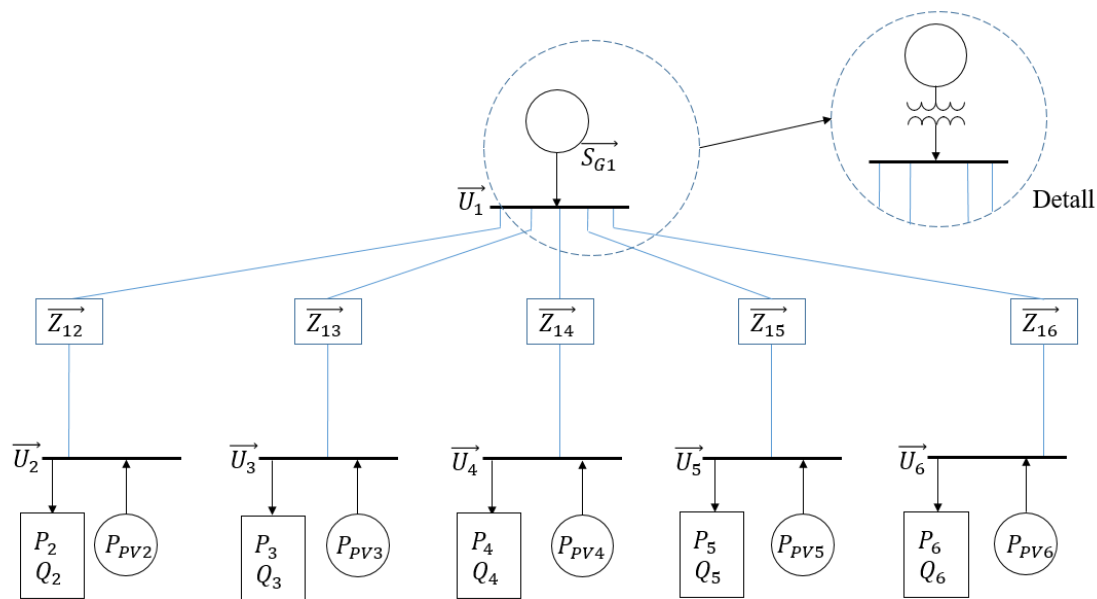
10. Problema de flux de càrrega

El problema de flux de càrrega, també anomenat flux de potència, és una metodologia típica a seguir per al càlcul del transport i distribució d'energia elèctrica en règim permanent. L'objectiu és calcular els fluxos i les tensions en diferents punts de la instal·lació, donada una xarxa amb les generacions i les càrregues. En un inici, s'havia començat la simulació per blocs amb una extensió de Simulink, finalment s'ha optat per fer un programa numèric per facilitar el tractament de totes les dades. A continuació s'expliquen els passos que segueix el programa per a calcular les caigudes tensió en cada node i per a totes les hores.

10.1. Suposicions i simplificacions

S'assumeix que els consums són constants per a cada hora del dia. La variació al llarg del temps és prou baixa com per fer aquesta consideració. Com s'ha vist anteriorment, el canvi de les potències és prou baix com per estudiar-ho separant simplement per hores, no s'hi ha trobat cap singularitat per aquest rang de separació.

Els transformadors de les centrals generadores se suposen ideals, en la majoria de casos es fa aquesta simplificació. Per tant, no hi ha pèrdues i les potències generades són les subministrades als busos directament. És per aquest motiu que als esquemes únicament hi apareix el símbol del generador, en comptes del conjunt generador-transformador.



Il·lustració 10.1 – Esquema elèctric de les distribucions amb la producció fotovoltaica

10.2. Sistema per unitat

Amb la finalitat de fer els diferents elements més uniformes i simplificar els càlculs, es realitza l'anàlisi de la xarxa en tant per unitat. Aquest sistema consisteix en normalitzar la les variables de tensió, corrent, impedància i potència per quantificar els valors en un mateix valor base.

$$Magnitud = \frac{Magnitud\ real}{Valor\ base} \tag{Eq 10.1}$$

En règim permanent sinusoidal es compleixen les equacions de tensió i potència:

$$\vec{U} = \vec{Z} \cdot \vec{I} \tag{Eq 10.2}$$

$$\vec{S} = \vec{U} \cdot \vec{I} \tag{Eq 10.3}$$

Per realitzar la transformació a valors p.u. es divideixen les Eq 10.2 i 10.3 en magnituds reals per les corresponents magnituds base:

$$\frac{\vec{U}}{U_B} = \frac{\vec{Z}}{Z_B} \cdot \vec{I} \quad \text{Eq 10.4}$$

$$\frac{\vec{S}}{S_B} = \frac{\vec{U}}{U_B} \cdot \vec{I} \quad \text{Eq 10.5}$$

D'aquesta forma, s'obté la mateixa forma en sistema per unitat:

$$\vec{U}_{pu} = \vec{Z}_{pu} \cdot \vec{I}_{pu} \quad \text{Eq 10.6}$$

$$\vec{S}_{pu} = \vec{U}_{pu} \cdot \vec{I}_{pu} \quad \text{Eq 10.7}$$

Les relacions es compleixen també per a la resta de variables normalitzades, de forma que s'obtenen les equacions següents:

$$\vec{Z}_{pu} = R_{pu} + jX_{pu} \quad R_{pu} = \frac{R}{Z_B} \quad X_{pu} = \frac{X}{Z_B} \quad \text{Eq 10.8}$$

$$\vec{S}_{pu} = P_{pu} + jQ_{pu} \quad P_{pu} = \frac{P}{S_B} \quad Q_{pu} = \frac{Q}{S_B} \quad \text{Eq 10.9}$$

Per al cas a estudiar, s'han escollit els següents valors base de potència i tensió per simplificar els càlculs, la resta a partir de les expressions Eq 10.2 i 10.3:

$$V_B = 20 \text{ kV}$$

$$S_B = 100 \text{ MVA}$$

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = 4 \Omega$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B} = 5000 \text{ A}$$

Es normalitzen tots els valors corresponents als consums, tensions i resistències per a tots els casos, és a dir, per tots els nodes, per cada hora i per a hivern i estiu. Aquests són els valors que s'utilitzaran per a fer el problema de flux de càrregues. A continuació es mostra l'exemple de la taula de valors per al Juliol a les 12h.

A cada node se li assigna una tensió i una potència complexes, de forma que es poden separar en 4 variables reals:

- El mòdul de la tensió U_i .
- L'argument de la tensió δ_i .
- La potència activa injectada P_i (negatives per a les càrregues i positives per a les fonts).
- La potència reactiva injectada Q_i (negativa en les càrregues capacitives).

Valors inicials en referència a la base escollida						
Estiu 12h						
Nom zona	CT	ZR2	ZR1	ZI1	ZR3	ZI2
P	?	-0,829	-2,367	-5,212	-0,353	-1,228
Q	?	-0,273	-0,778	-3,230	-0,116	-0,761
U	1,05	?	?	?	?	?
δ	0º	?	?	?	?	?

Taula 10.1 – Valors coneguts i incògnites a determinar

10.3. Matriu d'admitància

La matriu d'admitància és un model matemàtic que representa les admitàncies de les connexions entre els diversos nodes de la malla, és característica de la instal·lació i simètrica. Les primeres línies del programa estan destinades al càlcul d'aquesta matriu, a continuació se'n mostren les fórmules matemàtiques que s'han utilitzat.

En primer lloc s'obté l'admitància de cada branca, segons:

$$y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} = \frac{1}{R_{ij}} + \frac{1}{X_{ij}} i \quad \text{Eq 10.10}$$

Els elements de la diagonal es calculen aplicant la suma d'admitàncies de totes les branques que estan connectades al nus i:

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \quad \text{Eq 10.11}$$

Els elements de fora de la diagonal són igual al negatiu de l'admitància que connecta els nusos i j.

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad \text{Eq 10.12}$$

El programa s'ha fet de forma que és capaç de calcular la matriu d'admitància per a qualsevol xarxa radial. Les variables d'entrada són dos vectors, un corresponent a les resistències de cada branca i l'altre a les reactàncies inductives. Cal entrar els dos vectors ja havent realitzat el canvi de sistema per unitat, a continuació se'n mostren els valors. Per a les xarxes trifàsiques s'han mantingut les potències i les resistències en el transport són les equivalents al cablejat en paral·lel.

	R (Ω)	X _L (Ω)	R pu	X _L pu
Z12	0,0535	0,0229	0,0134	0,0057
Z13	0,0236	0,0179	0,0059	0,0045
Z14	0,0341	0,0498	0,0085	0,0125
Z15	0,0182	0,0180	0,0046	0,0045
Z16	0,0381	0,0313	0,0095	0,0078

Taula 10.2 – Valors reals i en p.u. de les resistències i inductàncies

Per al cas d'estudi, els càlculs que realitza el programa són els següents:

Vector d'admitàncies:

$$\forall j \quad y_{1j} = \frac{1}{Z_{1j}} = \frac{1}{R_{1j}} + \frac{1}{X_{1j}} i \quad \text{Eq 10.13}$$

Elements de la matriu d'admitància:

$$\overrightarrow{Y_{11}} = \overrightarrow{y_{12}} + \overrightarrow{y_{13}} + \overrightarrow{y_{14}} + \overrightarrow{y_{15}} + \overrightarrow{y_{16}}$$

$$\overrightarrow{Y_{22}} = \overrightarrow{y_{12}}$$

$$\overrightarrow{Y_{33}} = \overrightarrow{y_{33}}$$

$$\overrightarrow{Y_{44}} = \overrightarrow{y_{44}}$$

$$\overrightarrow{Y_{55}} = \overrightarrow{y_{55}}$$

$$\overrightarrow{Y_{66}} = \overrightarrow{y_{66}}$$

$$\overrightarrow{Y_{12}} = \overrightarrow{Y_{21}} = -\overrightarrow{y_{12}}$$

$$\overrightarrow{Y_{13}} = \overrightarrow{Y_{31}} = -\overrightarrow{y_{13}}$$

$$\overrightarrow{Y_{14}} = \overrightarrow{Y_{41}} = -\overrightarrow{y_{14}}$$

$$\overrightarrow{Y_{15}} = \overrightarrow{Y_{51}} = -\overrightarrow{y_{15}}$$

$$\overrightarrow{Y_{16}} = \overrightarrow{Y_{61}} = -\overrightarrow{y_{16}}$$

La resta d'elements són igual a 0 degut a que es tracta d'una xarxa radial i no hi ha connexions entre els nodes de les càrregues. D'aquesta manera, queda la matriu Y com la següent:

379,77-308,31i	-63,41+29,27i	-115,38+76,92i	-40+53,33i	-100+100i	-60,98+48,78i
-63,41+29,27i	63,41-29,27i	0	0	0	0
-115,38+76,92i	0	115,38-76,92i	0	0	0
-40+53,33i	0	0	40-53,33i	0	0
-100+100i	0	0	0	100-100i	0
-60,98+48,78i	0	0	0	0	60,98-48,78i

Taula 10.3 – Matriu d'admitàncies per al cas concret en p.u.

10.4. Mètode de Newton-Raphson

Es tracta d'un sistema d' n equacions, on n és el nombre de busos del sistema, que parteixen de l'equació de potència complexa corresponent a cada bus i :

$$\vec{S}_i = \vec{U}_i \cdot \vec{I}_i^* \quad \text{Eq 10.14}$$

Aplicant l'anàlisi nodal del circuit equivalent s'obtenen les següents equacions per a cada bus:

$$\vec{I}_i = \sum_{k=1}^n \vec{Y}_{ik} \vec{U}_k \quad \text{Eq 10.15}$$

Substituint a l'equació de potència (Eq 10.14), s'obté:

$$\vec{S}_i = \vec{U}_i \cdot \left(\sum_{k=1}^n \vec{Y}_{ik} \cdot \vec{U}_k \right)^* \quad \text{Eq 10.16}$$

Utilitzant la forma exponencial complexa, s'obtenen les següents equacions:

$$\vec{U}_i = U_i \cdot e^{j\delta_{ik}} \quad \text{Eq 10.18}$$

$$\vec{Y}_{ik} = Y_{ik} \cdot e^{j\gamma_{ik}} \quad \text{Eq 10.17}$$

$$\delta_{ik} = \delta_i - \delta_k \quad \text{Eq 10.19}$$

$$\vec{S}_i = U_i \cdot \sum_{k=1}^n U_k \cdot Y_{ik} \cdot e^{j(\delta_{ik} - \gamma_{ik})} \quad \text{Eq 10.20}$$

Aplicant la fórmula d'Euler, se separen en les potències reals i imaginàries:

$$P_i = U_i \sum_{k=1}^n U_k \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \gamma_{ik}) \quad \text{Eq 10.21}$$

$$Q_i = U_i \sum_{k=1}^n U_k \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \gamma_{ik}) \quad \text{Eq 10.22}$$

Excloent el bus oscil·lant (*Slack, node 1*), el vector d'incògnites és:

$$x = (\delta | U)^T = (\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n | U_2, U_3, \dots, U_n)^T$$

Els residus de potències, per tant, són:

$$\Delta P_i = P_i^0 - P_i(x) = P_i^0 - U_i \sum_{k=1}^n U_k \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \gamma_{ik}) \quad \text{Eq 10.23}$$

$$\Delta Q_i = Q_i^0 - Q_i(x) = Q_i^0 - U_i \sum_{k=1}^n U_k \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \gamma_{ik}) \quad \text{Eq 10.24}$$

Es tracta doncs d'un sistema de $2x(n-1)$ equacions reals en les que les incògnites formen el vector x que, amb la matriu jacobiana, es representa de la forma següent:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} \quad \text{Eq 10.25}$$

En forma reduïda queda expressat com:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad \text{Eq 10.26}$$

Tenint clar el càlcul d'aquestes variables es pot explicar el procediment complet de Newton-Rapson amb els següents passos:

1. Fer una estimació inicial per realitzar la primera iteració, normalment es pren el perfil

pla. En el nostre cas, tenint l'angle amb graus i els voltatges en valors per unitat:

Node	$\Delta(^{\circ})$	U (pu)
1	0	1,05
2	0	1
3	0	1
4	0	1
5	0	1
6	0	1

Taula 10.4 – Valors llavor iteració, aproximació perfil pla

2. Calcular els valors de les funcions $(\Delta P|(\Delta Q)$.
3. Calcular la matriu Jacobiana per a aquests valors.
4. Obtenir els increments dels mòduls i angles de les tensions $(\Delta\delta|(\Delta U)$.
5. Actualitzar variables:

$$\begin{bmatrix} \delta \\ U \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} \delta \\ U \end{bmatrix}^0 + \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad \text{Eq 10.27}$$

6. Repetir el procés complet per als nous valors fins que els increments de les potències calculades siguin més petits d'un valor prefixat. En el programa creat, s'han fet 100 iteracions per a cada cas i s'ha observat que els canvis en les potències per aquest nombre d'iteracions són prou petits (coincideixen amb les potències de les càrregues fins a la centèsima) com per no haver de realitzar més iteracions.

10.5. Programa creat per a la simulació

Per tal d'agilitzar el càlcul, s'ha creat una eina que permet llegir els valors de les potències per a cada cas d'una fulla de càlcul Excel. Aquesta funció també processa les dades, realitza el procediment anterior per a cada cas, i escriu una nova fulla d'Excel amb els resultats (consultar Annex B per fer servir el programa i veure el codi).

Cal tenir present que aquest programa ha estat creat per implementar-se per al càlcul de qualsevol xarxa radial amb una única font d'alimentació. Els càlculs de les matrius

d'admitància, jacobiana i la resta de vectors han estat programats de forma que es generen automàticament per a qualsevol dimensió però únicament per al cas de xarxes radials amb una sola font.

10.5.1. Instruccions per implementar aquesta eina per altres casos

El primer pas és calcular totes les variables en base per unitat, com s'ha explicat anteriorment. Aquest pas ajuda al programa a ser més eficient i simplifica els càlculs, però sense aplicar-lo també funcionaria.

El node 1 del programa sempre s'assigna a la font d'alimentació.

10.5.1.1. Càlcul d'un sol cas

Per a fer el càlcul d'un sol cas, n'hi ha prou amb carregar únicament l'arxiu *CARREGUES.m*, adjunt a l'*Annex B*. A continuació cal cridar la funció *carregues* amb les següents entrades, per aquest ordre:

- Vector de resistències R: Vector horitzontal amb les resistències de cada branca, ordenadament.

$$R = [R_{12}, R_{13}, \dots, R_{1n}]$$

- Vector d'inductàncies X: vector horitzontal amb el valor de les inductàncies de cada branca.

$$X = [X_{12}, X_{13}, \dots, X_{1n}]$$

- Vector de mòduls dels voltatges V: vector horitzontal amb els mòduls dels voltatges inicials de cada node, té una dimensió més que aquests dos últims degut a que la xarxa radial té un node més que el nombre de branques (el node de la font, 1).

$$V = [V_1, V_2, V_3, \dots, V_n]$$

- Vector d'angles dels voltatges d: vector horitzontal amb els angles inicials de cada node.

$$d = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_n]$$

- Vector de potències actives P: Vector de potències actives de les càrregues, no s'hi introdueix la potència de la font degut a que no es coneix. Cal que les càrregues

s'introdueixin en negatiu o positiu en tractar-se d'una font.

$$P = [P_2, P_3, \dots, P_n]$$

- Vector de potències reactives Q: Vector de potències reactives.

$$Q = [Q_2, Q_3, \dots, Q_n]$$

El programa mostrarà la variable S, que és un vector amb les potències corresponents a cada node, inclòs el de la font, que era el desconegut. També es poden consultar els valors dels voltatges en forma rectangular en el vector V.

En cas que es vulgui modificar el nombre d'iteracions, per adaptar-lo a un altre valor o fer que s'aturi per a un error concret, es pot modificar la variable *iteracions*, a la línia 34 del codi.

10.5.1.2. Càlcul per molts casos

Donat el nombre de casos que s'estudia en el present treball, s'han dissenyat dos programes més per agilitzar el procés. D'aquesta forma, únicament cal indicar-li al programa en quins arxius ha de buscar les potències.

El programa *excelCarregues* és per al càlcul de les potències i el programa *excelVoltatges* és per al càlcul dels voltatges, però el procediment a seguir és el mateix.

Inicialment s'han d'entrar els vectors R, X, V i d, com s'ha dit interiorment però directament al codi (les línies de la 4 a la 7).

Posteriorment cal indicar quins valors de les càrregues ha d'agafar de l'excel, a la línia 9 les potències actives i les reactives a la 10. També cal canviar el valor base per adaptar les variables al cas concret.

	Nom de l'arxiu	Nº fulla	Inici: Final
9 -	Ptothivern=xlswrite('ConsumMat.xlsx',	2,	'G26:AE30')
10 -	Qtothivern=xlswrite('ConsumMat.xlsx',	2,	'G42:AE46')
11			
12 -	Ptothivern=Ptothivern/100		
13 -	Qtothivern=Qtothivern/100		

Canvi a p.u.

Il·lustració 10.2 – Entrades codi

Per acabar, cal indicar-li també a on ha d'escriure els resultats.

```

34 - | xlsxwrite('estiuPV.xlsx', Ptot, 'P')
35 - | xlsxwrite('estiuPV.xlsx', Qtot, 'Q')
    
```

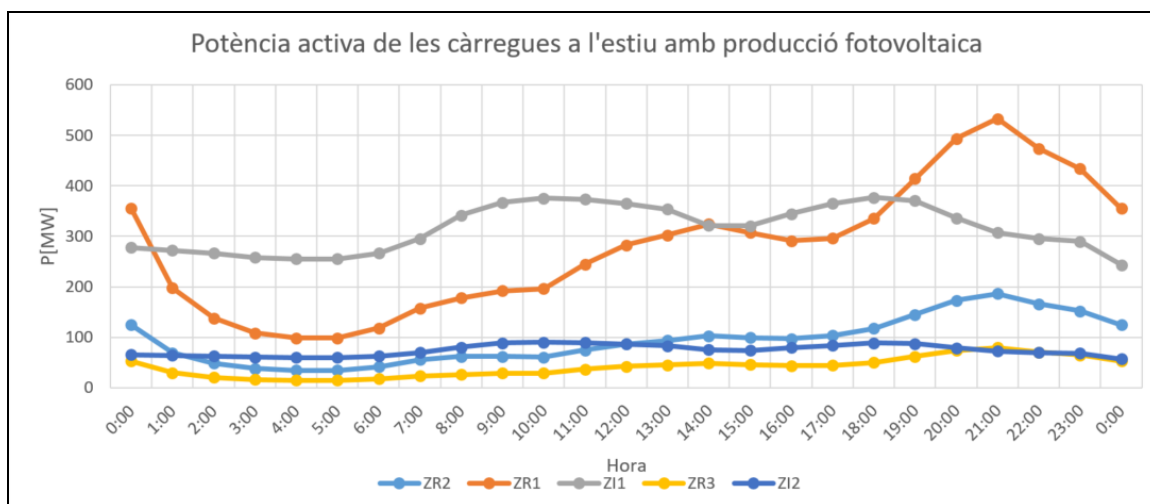
Il·lustració 10.3 – Especificació resultats codi

10.6. Aplicació de la simulació i resultats

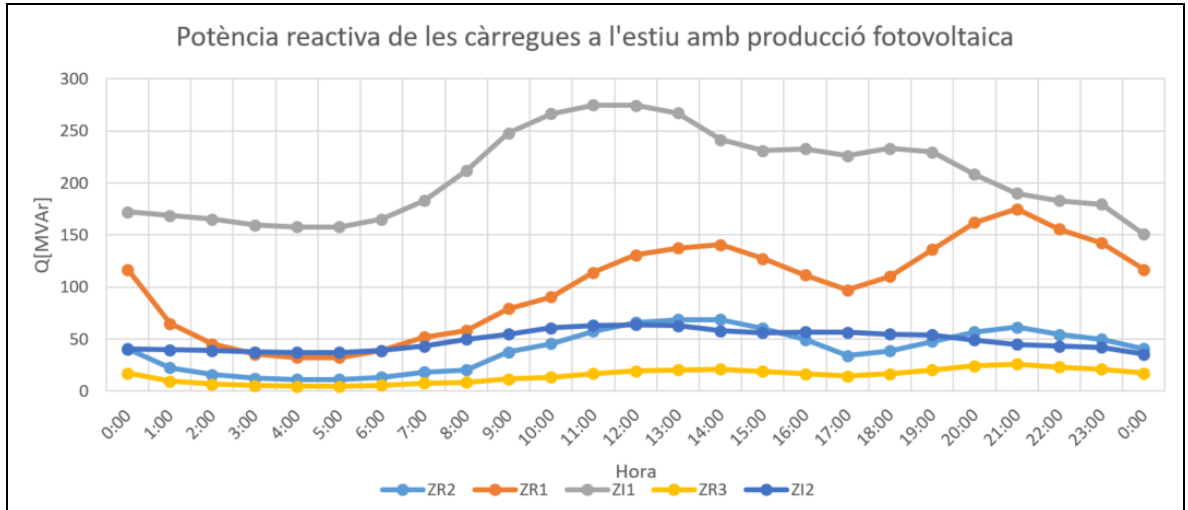
10.6.1. Simulació amb generació fotovoltaica

En primer lloc s'ha generat una fulla de càlcul amb les potències consumides a cada hora per a cada zona. Coneixent les càrregues i produccions fotovoltaïques corresponents a cada hora, s'ha calculat com a càrrega a abastir per una central externa com la diferència de la càrrega total consumida P i la producció fotovoltaica per a una mateixa zona. Les càrregues reactives han quedat igual que quan no hi ha producció fotovoltaica. De forma que s'entén que s'aprofita tota la producció fotovoltaica per realitzar accions en la zona, no s'ha trobat cap cas en què la potència fotovoltaica d'una zona excedeixi el consum en aquell instant.

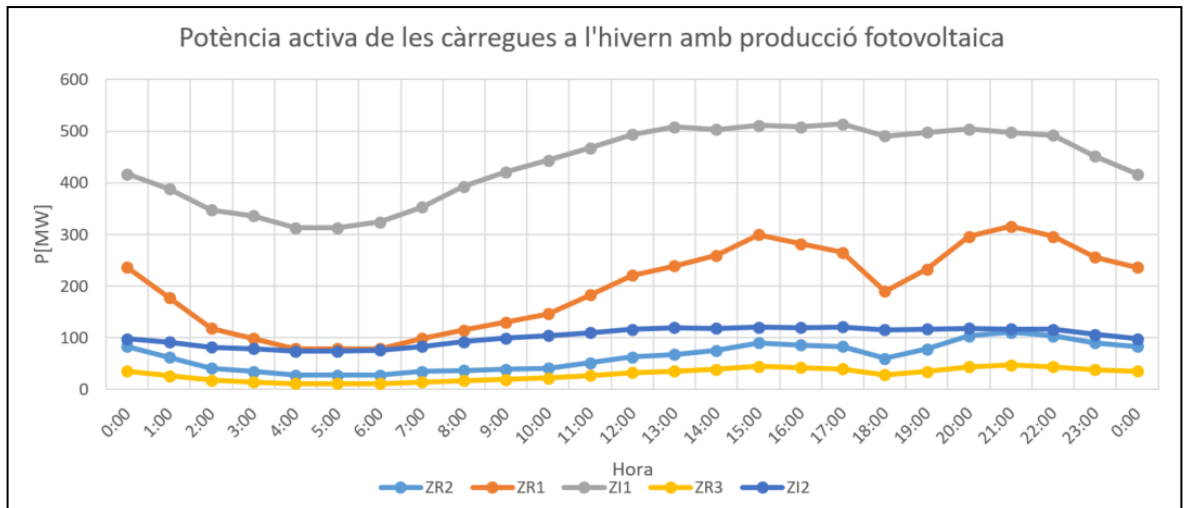
Les corbes de consums a abastir per una font externa tenint producció fotovoltaica són els següents:



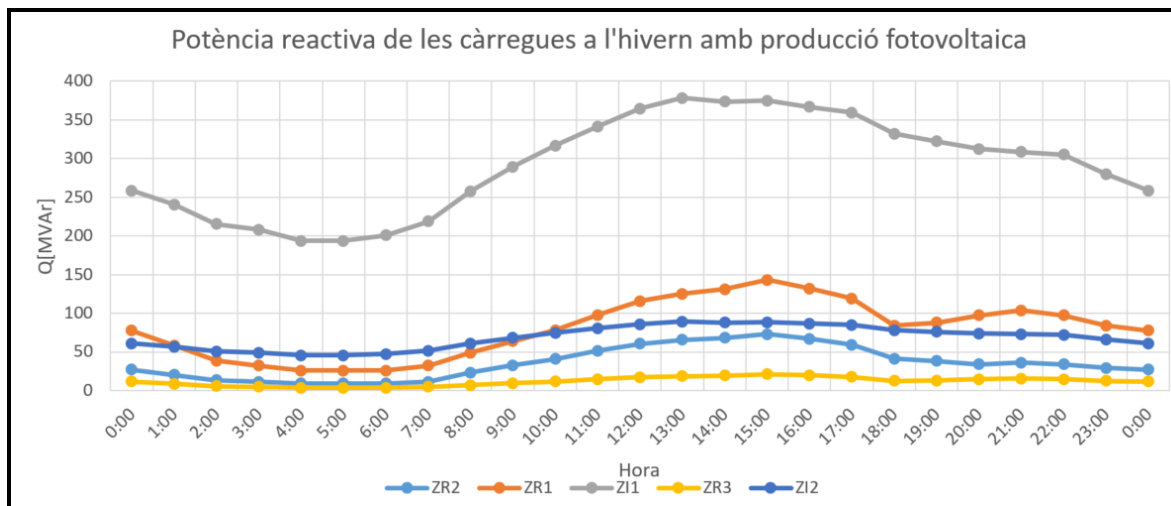
Il·lustració 10.4 -- Corbes de les potències actives de cada zona a l'estiu



Il·lustració 10.5 – Corbes de les potències reactives de les càrreges a l'estiu

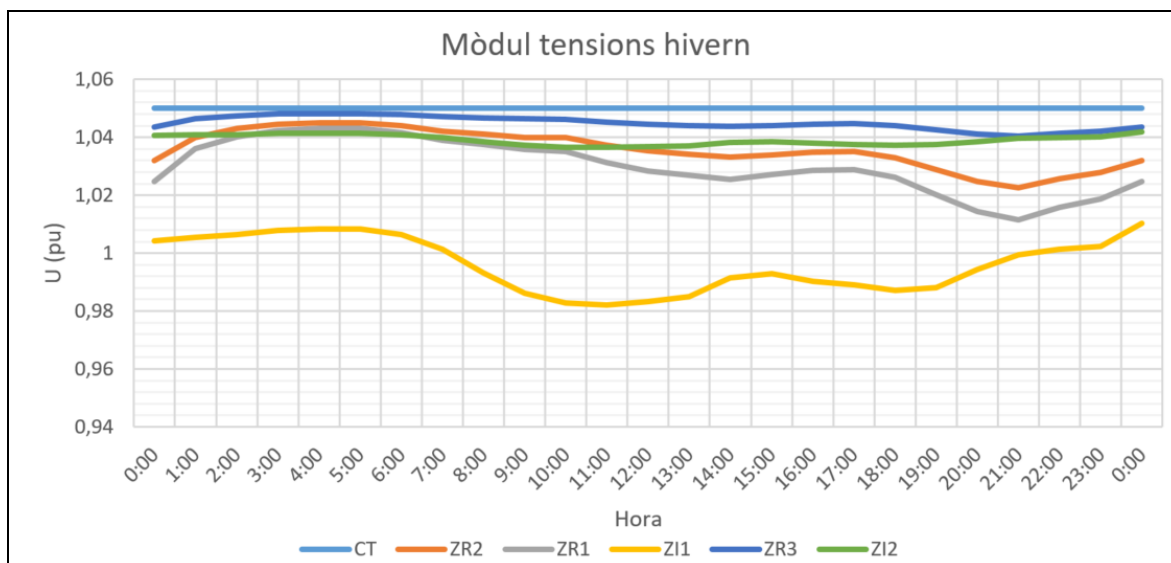


Il·lustració 10.6 – Corbes de les potències actives de cada zona a l'hivern

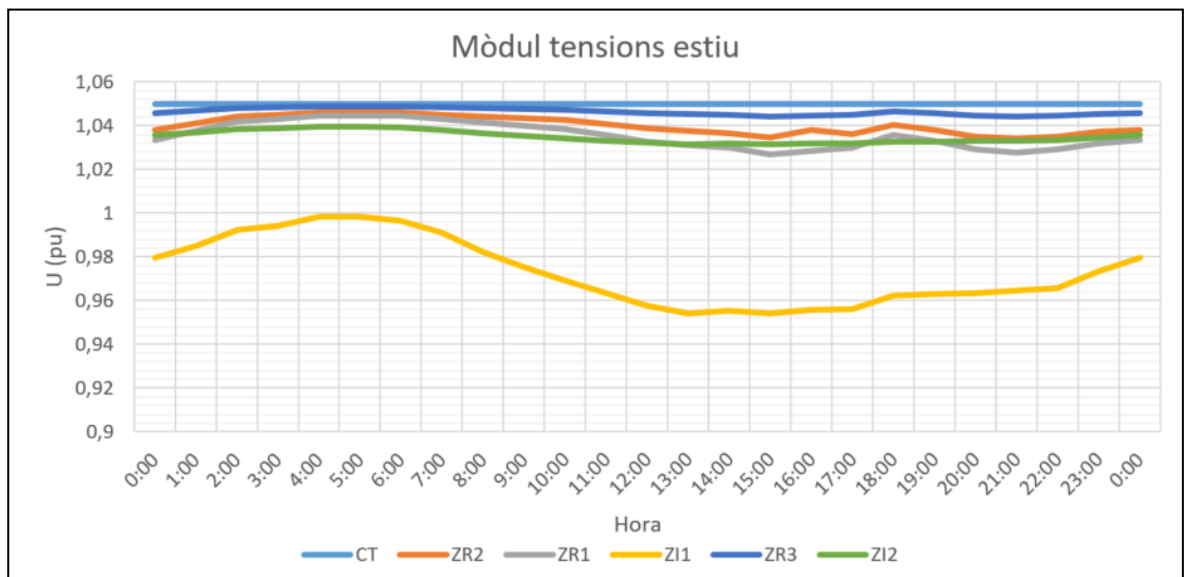


Il·lustració 10.7– Corbes de les potències reactives de cada zona a l'hivern

D'aquesta manera, tenint caracteritzades totes les càrregues, es realitzen les simulacions i s'obtenen els següents resultats:



Il·lustració 10.8 – Mòduls de les tensions a l'hivern amb PV



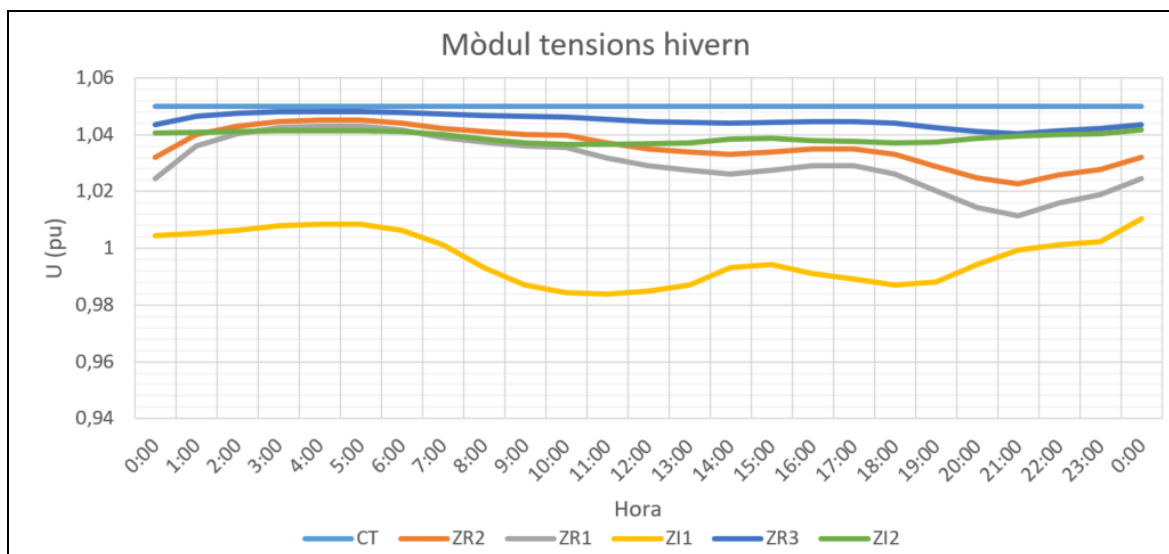
Il·lustració 10.9– Mòduls de les tensions de cada zona a l'estiu amb PV

Com és observable en els gràfics, per aquests casos sembla que les caigudes de tensió són acceptables, sense arribar a ser un 5% inferiors al valor base. Per tant, per aquests dos casos no caldria redimensionar el cablejat per reduir les caigudes. De totes maneres, al no tractar-se del punt final de consum, aquestes tensions són una informació útil a tenir en compte en el dimensionament de les instal·lacions de transformació d'alta a mitja tensió.

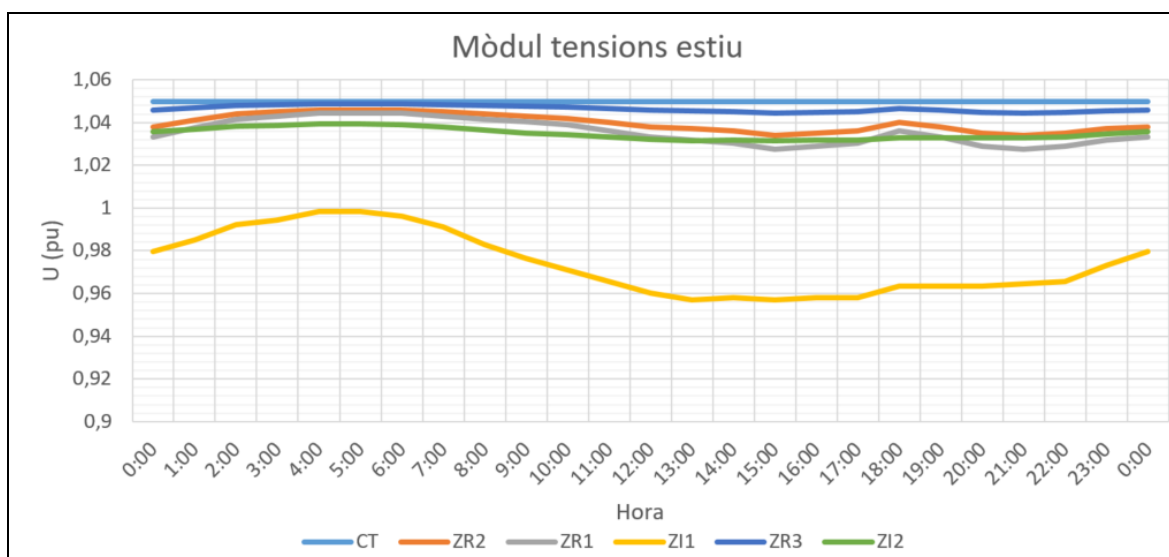
Pel que fa als angles dels voltatges tots són inferiors als 2°, són valors baixos que no cal estudiar amb més detall.

10.6.2. Simulació sense generació fotovoltaica

A continuació, donat que no hi ha aquesta radiació solar tots els dies de l'any, es realitzaran les mateixes simulacions sense a tenir en compte la producció fotovoltaica per veure si el sistema és prou robust com per funcionar en els 4 casos (estiu i hivern, amb i sense radiació solar). Per aquest cas, s'ha agafat les càrregues originals, sense resta la producció fotovoltaica. Els resultats són els següents:



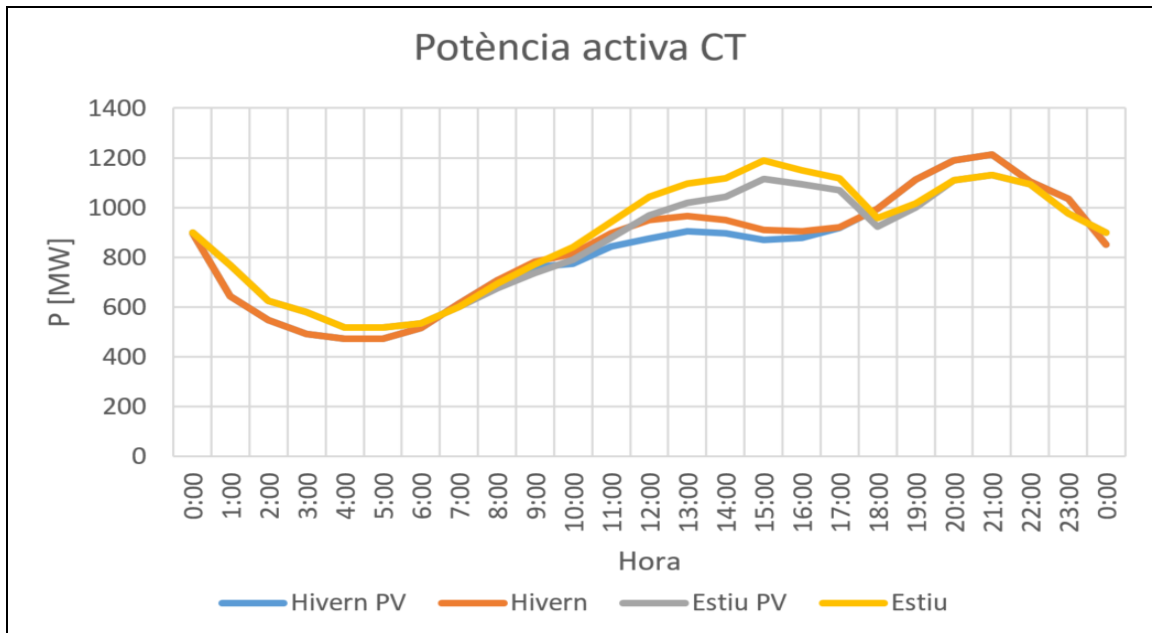
Il·lustració 10.10 – Mòduls de les tensions a l’hivern per a cada zona sense PV



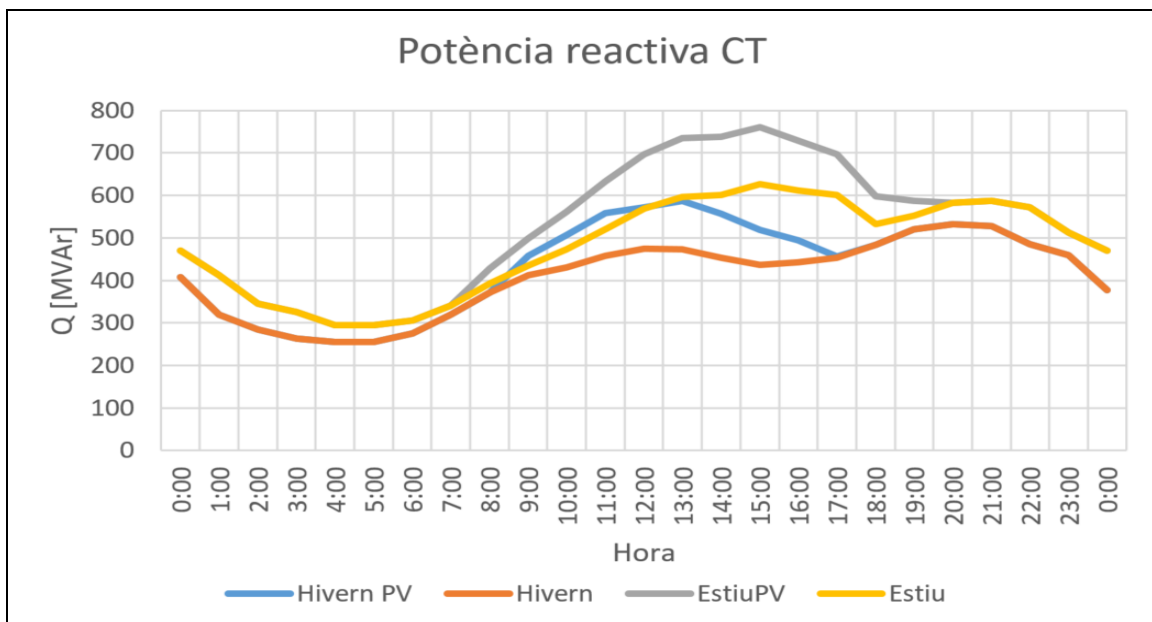
Il·lustració 10.11– Mòduls de les tensions a l’estiu per a cada zona sense PV

Els valors no han variat gaire en aquests últims casos, per tant no cal redimensionar el cablejat per reduir les caigudes de tensió. En tot cas, es podria reduir la secció de les connexions a les zones ZR2, ZR3 i ZI2 per motius econòmics, però els valors tampoc són massa elevats i no resulta un problema per al seu funcionament.

D'altra banda, s'han calculat també la potència del generador juntament amb les de les càrregues, que no es representaran degut a que, al fer-se 100 iteracions per a cada cas, són pràcticament iguals a les inicials. A continuació es mostren les potències que s'hauran de subministrar per una font externa.



II·lustració 10.12 – Potències actives al CT per a tots els casos



II·lustració 10.13 – Potències reactives al CT per a tots els casos

Com s'observa en els gràfics la potència reactiva a injectar és inferior quan s'implementen els panells solars. D'altra banda, la potència reactiva a introduir és superior amb panells, aquest fet és possible que es doni degut a que no s'hi ha implementat cap element per compensar. El factor de potència ha augmentat al disminuir la P de les càrregues, per tant, la instal·lació de les plaques hauria d'anar acompanyada també de bateries de condensadors, per reduir el factor de potència i, per tant, el consum reactiu.

11. Impacte ambiental

Al tractar-se d'una energia renovable, és capaç d'obtenir energia a partir de fonts naturals de forma indefinida sense generar productes nocius per al medi ambient. Cal tenir present que en la producció i el transport dels panells sí que s'emeten residus. A continuació es fa un breu estudi de l'impacte que tenen la producció dels panells i l'energia convencional que es deixa de consumir.

11.1. Producció panells

L'etapa en la qual els panells fotovoltaics generen més impacte ambiental és en la seva producció. Aquest impacte ve donat per l'energia que es consumeix durant l'extracció dels materials que el conformen, el seu processament i fabricació i el transport. La fase més intensiva és en la cadena de producció inicial, on s'extrau i es purifica el silici, aproximadament l'energia que es destina a aquesta etapa representa el 80% de l'energia consumida en tot el procés. El motiu per al qual es produeix aquest consum és degut als processos d'escalfament necessaris per la reducció carbotèrmica del diòxid de silici en forns elèctrics per la seva depuració. Aquests processos de purificació es realitzen en forns, en el cas d'utilitzar un reactor Siemens, el silici s'escalfa a més de 1500°C per a un cert període de temps, utilitzant més de 200kWh/kg.

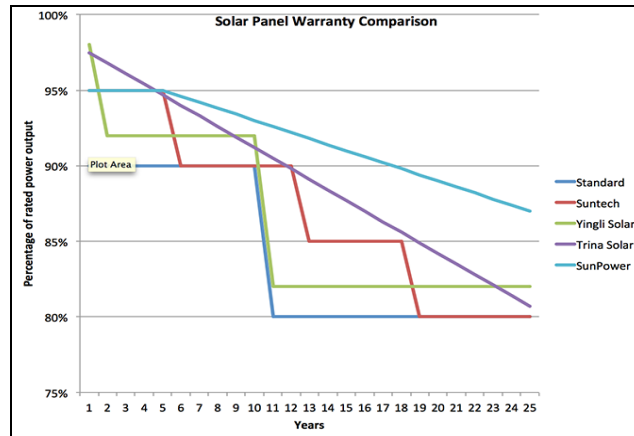
11.2. Energia elèctrica convencional no consumida

Els panells fotovoltaics passaran a tenir un impacte positiu per al medi ambient en el moment en que hagin generat tota la energia que s'ha destinat en la seva producció. A aquest temps se'l coneix com a EPBT (*Energy Payback Time*), a continuació es mostra una taula amb l'estimació d'aquest temps, en anys, per a diferents localitzacions.

Location	Annual GHI (kWh/m ²)	Yield/Year (kWh/kWp)	EPBT (years)
Munich, Germany	1183	1182	1.7
Barcelona, Spain	1635	1651	1.2
Phoenix, Arizona	2093	1939	1.0
New Delhi, India	1973	1830	1.1
Tuas, Singapore	1623	1319	1.5
Perth, Australia	1938	1804	1.1

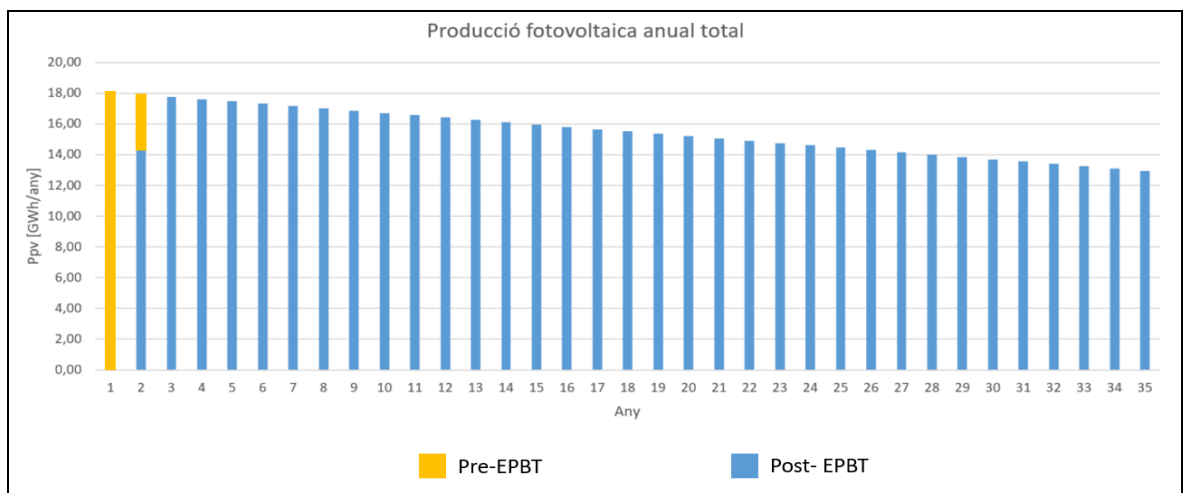
Taula 11.1- EPBT Diferents localitats

Tenint l'EPBT de la localització, es pot calcular com a impacte ambiental positiu tota aquella energia que es genera de forma neta des d'aleshores. De la informació obtinguda sobre la durabilitat dels panells fotovoltaïcs actuals es pot estimar que el seu rendiment cau al 80% quan porta 25 anys de treball i que la seva vida útil pot arribar a ser de fins a 35 anys.



Il·lustració 11.1 – Variació del rendiment de panells fotovoltaïcs

Prenent aquesta rampa per a la resta d'anys fins arribar als 35, es fa l'estimació d'energia estalviada a partir de la mitjana de les dues produccions valuades, la de l'hivern i estiu. A continuació es mostra una gràfica de la producció total de la instal·lació tenint en compte aquestes suposicions.



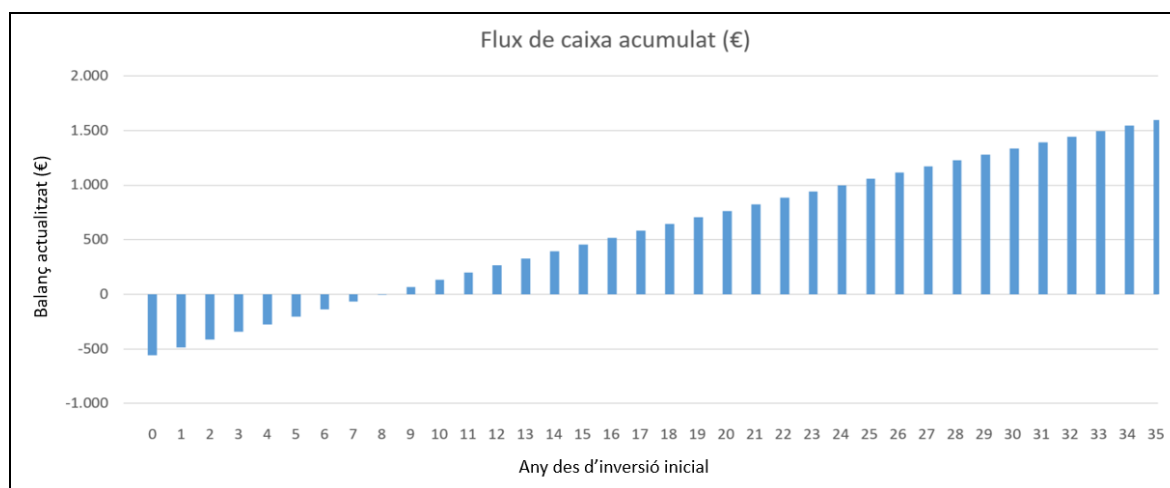
Il·lustració 11.2 – Generació total de la instal·lació per anys

D'aquesta manera, la diferència d'energia neta respecte d'una font no renovable correspon a la producció d'energia post-EPBT, aquesta energia són 521GWh. Aplicant un factor de conversió de 430 gCO₂/kWh, la instal·lació ofereix un estalvi de 224.117 tCO₂ en aquests 35 anys.

12. Anàlisi econòmica

Anàlogament al capítol anterior, es calculen els estalvis per sectors a partir del període de retorn, en aquest cas econòmic. S'estima que el període de retorn econòmic de les plaques solars a Catalunya és d'entorn als 8 anys, per tant, l'estalvi començarà a partir d'aquest instant.

L'àrea de producció fotovoltaica a les 3 zones residencials representa un 53% de la total i, per tant, la generació fotovoltaica també. Suposant que hi ha 2,5 persones per habitatges, que és la mitjana espanyola, es produeixen 624 kWh anualment per habitatge. A continuació es mostra el gràfic que representa el flux de caixa mig per habitatge, actualitzant el rendiment fotovoltaic en cada any.



Il·lustració 12.1 – Flux de Caixa acumulat mitjà per habitatge

A priori, pot semblar que es tracta de quantitats petites, cal tenir en compte de que es tracta de la mitja ponderada de tots els habitatges, dels quals la majoria són blocs de pisos a on hi ha molts habitatges per m² de sòl. La rendibilitat financera al cap de 35 anys és del 287%, generant un benefici mitjà de 1.600 € per habitatge.

Conclusions

S'ha aconseguit crear una eina per al càlcul del flux de potència de qualsevol xarxa radial amb una font d'alimentació.

S'ha realitzat una simulació per a una instal·lació radial a diferents zones, mallades individualment, a on s'aprofita tota l'energia fotovoltaica produïda.

Les caigudes de tensió en la instal·lació han estat prou baixes com per no haver de redimensionar el cablejat escollit inicialment perquè el sistema funcioni correctament.

Es podria redimensionar el cablejat de les zones ZR1, ZR3 i ZI2 per tal de reduir el cost de la instal·lació. Havent-lo redimensionat, caldria fer un altre cop totes les simulacions amb els nous valors de resistències i inductàncies.

Seria convenient afegir bateries de condensadors a la instal·lació en introduir-hi panells fotovoltaics degut a que s'incrementa el factor de potència al reduir únicament el consum de potència activa en les càrregues.

S'ha realitzat una modelització i simulació dels panells elèctrics que permet determinar les corbes de corrent-tensió donades les condicions de radiació solar i temperatura de les cel·les, que es pot utilitzar per a qualsevol condició geogràfica i climatològica.

La caracterització dels consums classificats per zones, activitats, hores i mesos ha estat prou acurada com perquè no hi apareguin singularitats. Aquesta classificació ha permès realitzar un estudi extens dels casos crítics en què es pot trobar el sistema i detectar-hi errors.

La producció fotovoltaica per metre quadrat en les zones industrials ha resultat ser més alta degut al tipus d'arquitectura d'aquestes zones.

L'impacte ambiental total i indirecte a la localitat que tindria la instal·lació és de 224.117 tones de CO₂ que deixarien de ser emeses per la generació d'energia elèctrica provinent de les plantes de generació convencionals.

La rendibilitat econòmica per a aquest tipus d'instal·lació és del 287%, generant un benefici mitjà de 1.660 € per habitatge, al cap de 35 anys.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] RAFAEL SÁNCHEZ-DURÁN, JULIO BARBANCHO I JOAQUÍN LUQUE. *Solar Energy Production for Decarbonization Scenario in Spain*. Sevilla, Desembre 2019.
- [2] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA. *Guía de Consumo Inteligente*. Noviembre 2010.
- [3] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. GENERALITAT DE CATALUNYA, DEPARTAMENT D'INDÚSTRIA, COMERÇ I TURISME. *Atlas de Radiació Solar a Catalunya*. Barcelona, Setembre del 2001.
- [4] DIRECCIÓ DE SERVEIS AMBIENTALS DE L'AMB, BARCELONA REGIONAL. *Balanços energètics dels municipis metropolitans*. Barcelona, 2020.
- [5] RAMÓN M. MUJAL. *Cálculo de líneas y redes eléctricas*. Edicions UPC, Barcelona, 2002.

Bibliografia complementària

<https://www.alimarket.es/construccion/noticia/304226/artesolar-entra-en-el-negocio-de-la-energia-solar-fotovoltaica> (Il·lustració 2.0.1 – Panells fotovoltaics)

<https://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/19841/Challenges-of-Making-Solar-Energy-Economical.aspx> (Il·lustració 4.1 – Funcionament cel·la fotovoltaica bàsica)

<https://breakingenergy.com/2015/03/25/power-grid-of-the-future-distributed-generation-led-by-a-civic-energy-sector/> (Il·lustració 5.1 – Transició de la distribució d'energia elèctrica)

<https://www.monsolar.com/blog/como-afecta-la-temperatura-a-una-placa-solar-2/> (Eq 7.1 – Equació temperatura de treball cel·la fotovoltaica)

<https://www.google.com/search?q=temperatura+media+por+mes+ripollet&og=temperatura+media+por+mes+ripollet&aqs=chrome..69i57.9553j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8> (Il·lustració 7.0.2- Temperatures màximes i mínimes Ripollet per mesos)

<http://palaciosfp.blogspot.com/2012/10/blog-post.html> (Il·lustració 0.3 – Esquema del transport d'una xarxa centralitzada)

https://www.recgroup.com/sites/default/files/documents/wp_recs_leading_energy_payback_time.pdf (Taula 0.1- EPBT Diferents localitats)

<https://solarinstallationpanel.blogspot.com/2015/03/solar-panels-lifespan.html> (Il·lustració 0.4 – Variació del rendiment de panells fotovoltaics)