

Treball de Fi de Grau

Grau en enginyeria en tecnologies industrials

Desenvolupament d'una eina de disseny per al càlcul de costos a parcs fotovoltaics

MEMÒRIA

Autor: Antonio Martí Artigues
Director: Jose Luís Domínguez
Director: Mikel De Prada
Ponent: Oriol Gomis Bellmunt
Convocatòria: Juliol 2015



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En els últims anys, l'esgotament dels recursos fòssils utilitzats per a generar energia elèctrica ha incentivat el creixement i l'explotació d'altres tipus de fonts d'energia, principalment de caràcter renovable. Com a causa d'aquest fet, s'han desenvolupat, entre d'altres, eines de caràcter informàtic que faciliten el càlcul i disseny de parcs energètics renovables.

A grans trets, el treball exposat es troba dedicat a la millora d'una eina de disseny per a parcs fotovoltaics.

Més concretament, es realitza un estudi dels diversos paràmetres que influeixen a l'hora de dissenyar una planta fotovoltaica, proposant simplificacions per al model elèctric que descriu el funcionament del circuit fotovoltaic. A més, a mode d'avaluar l'impacte energètic i econòmic que tenen les idealitzacions proposades es realitza una simulació a un any del funcionament de una instal·lació fotovoltaica, identificant-ne i calculant-ne les pèrdues energètiques a diferents punts de la planta amb el fi d'obtenir l'energia anual generada. Finalment, es realitza un estudi econòmic del cost de l'estació fotovoltaica simulada, analitzant paràmetres com el cost de cicle de vida de la instal·lació o el rati de cost per watt obtingut.

Finalment, a mode de millorar l'eina, es dissenyen els models simplificats utilitzant l'eina de càlcul matemàtic *MATLAB*, per tal de realitzar una comparativa entre els temps de còmput utilitzats per a les diferents propostes de simplificacions, tot establint com a referència el model sense idealitzacions.

Sumari

Resum.....	0
1 Glossari.....	6
2 Prefaci.....	7
2.1 Origen del projecte.....	7
2.2 Motivació.....	7
2.3 Requeriments previs	7
3 Introducció	8
3.1 Objectius del projecte	8
3.2 Abast del projecte	8
4 Introducció a l'energia fotovoltaica	9
4.1 Marc actual de l'energia solar fotovoltaica.....	9
4.2 Instal·lacions fotovoltaiques	9
4.2.1 Components d'un sistema solar fotovoltaic connectat a xarxa	10
5 Caracterització de la planta PV connectada a xarxa	13
5.1 Circuit fotovoltaic.....	13
5.2 Cel·la, mòdul, <i>string</i> , <i>array</i>	13
5.3 Models fotovoltaics.....	14
5.3.1 Model ideal.....	14
5.3.2 Model one-diode.....	15
5.4 Corba característica del mòdul fotovoltaic	17
5.5 Paràmetres que influeixen	18
5.5.1 Efecte del nombre de cel·les en sèrie i paral·lel (N_s i N_p)	18
5.5.2 Efecte de les resistències R_s i R_p	19
5.5.3 Efecte de la temperatura i irradiació solar.....	21
6 Pèrdues en la planta fotovoltaica.....	26
6.1 Pèrdues per efecte d'ombratge	26
6.2 Pèrdues en el cablejat	29
6.3 Pèrdues per temperatura.....	32
6.4 Pèrdues per el rendiment de l'inversor	32
6.5 Pèrdues per el rendiment del transformador	33
6.6 Pèrdues per contaminació o <i>soiling</i>	33
6.7 Pèrdues degudes a la degradació o <i>aging</i>	34
7 Propostes de disseny i optimització	35
7.1 Model one-diode : referència	35

7.2 Primera proposta: model ideal	36
7.3 Segona proposta: model mitjana	40
7.4 Tercera proposta: Model de zones de transició.....	45
7.4.1 Anàlisi de l'string de transició	45
7.4.2 Anàlisi de la fila de transició.....	48
7.4.3 Anàlisi de la fila i l' <i>string</i> de transició conjuntament	52
7.4.4 Simulació model distribucions	54
8 Simulació planta PV d'aproximadament 1MW	56
8.1 Descripció de la planta fotovoltaica simulada	56
8.1.1 Esquema del tracker solar.....	56
8.1.2 Esquema de la planta fotovoltaica.....	57
8.2 Consideracions inicials de la simulació.....	57
8.2.1 Tipus d'inversor utilitzat.....	58
8.2.2 Dimensionament del cablejat	59
8.3 Simulació de la planta amb el model one-diode.....	59
8.3.1 Pèrdues per l'efecte d'ombres	60
8.3.2 Pèrdues degudes al rang de l'inversor	60
8.3.3 Pèrdues en el cablejat	60
8.3.4 Pèrdues degudes a l'eficiència de l'inversor	64
8.3.5 Pèrdues degudes a l'eficiència del transformador.....	64
8.3.6 Pèrdues degudes a la brutícia acumulada (<i>soiling</i>).....	64
8.3.7 Resultat de la simulació.....	65
8.4 Simulació de la planta amb el model ideal corregit.....	65
8.4.1 Pèrdues per l'efecte d'ombres	65
8.4.2 Pèrdues degudes al rang de l'inversor	65
8.4.3 Pèrdues per cablejat.....	66
8.4.4 Pèrdues degudes a l'eficiència de l'inversor	67
8.4.5 Pèrdues degudes a l'eficiència del transformador.....	67
8.4.6 Pèrdues degudes a la brutícia acumulada (<i>soiling</i>).....	67
8.4.7 <i>Resultat de la simulació</i>	68
8.5 Simulació de la planta amb model mitjana	68
8.5.1 Pèrdues per l'efecte d'ombres	69
8.5.2 Pèrdues degudes al rang de l'inversor	69
8.5.3 Pèrdues en el cablejat	69
8.5.4 Pèrdues de ratis constants	73

8.5.5	Resultats de la simulació	73
8.6	Simulació de la planta amb el model distribució	74
8.6.1	Pèrdues per l'efecte d'ombres	74
8.6.2	Pèrdues degudes al rang de l'inversor	75
8.6.3	Pèrdues en el cablejat	75
8.6.4	Pèrdues de ratis constants	75
8.6.5	Resultats de la simulació	76
8.7	Anàlisi de resultats de la simulació	76
9	Costos de la instal·lació fotovoltaica	80
9.1	Càlcul del cost dels components de la instal·lació (CC)	80
9.2	Cost d'instal·lació dels components de la planta (IC)	84
9.3	Cost de desmantellament (DC)	84
9.4	Cost associat al interès bancari anual (CP)	84
9.5	Cost de manteniment anual de la instal·lació (M)	84
9.6	Càlcul del cost total de cicle de vida de la instal·lació (LCC)	85
9.7	Càlcul del període de retorn de la inversió per a diferents models	85
10	Scripts dissenyats per a l'eina	88
	Conclusions	92
	Pressupost	93
	Pressupost del programari	93
	Pressupost dels recursos humans	93
	Pressupost total del projecte	93
	Bibliografia	94

1 Glossari

G : irradiació incident (W/m^2)

G_n : irradiació de referència ($1000 W/m^2$)

I_d : Intensitat del díode (A)

V_{oc} : Voltatge en circuit obert (V)

I_{cc} : Intensitat de curtcircuit (A)

I_{ph} : Intensitat fotovoltaica (A)

I_o : Intensitat de saturació del díode (A)

N_s : nombre de mòduls en sèrie

N_p : nombre de mòduls en paral·lel

n_s : nombre de cel·les en sèrie

R_s : resistència en sèrie (Ω)

R_p : resistència en paral·lel (Ω)

q : càrrega de l'electró (C)

a : constant d'idealitat

k_i : coeficient corrector de la intensitat (A/K)

k_v : coeficient corrector del voltatge (V/K)

k : constant de Boltzmann (J/K)

I_{pmp} : Intensitat al punt de màxima potència (A)

V_{pmp} : Voltatge al punt de màxima potència (A)

P.R: performance rati (%)

T_c : Temperatura de treball de la cel·la ($^{\circ}C$)

T_{ref} : Temperatura de referència de la cel·la ($25^{\circ}C$)

2 Prefaci

2.1 Origen del projecte

L'institut de recerca en energia de Catalunya (IREC) va desenvolupar una eina d'anàlisi tecnicoeconòmic aplicada a plantes fotovoltaiques la qual, a través d'una sèrie de variables d'entrada establertes per el fabricant, és capaç de calcular-ne les corbes de funcionament de la instal·lació, les pèrdues energètiques, els costos de la planta, el període de retorn de la inversió... Es tracta d'una eina de disseny per a instal·lacions fotovoltaiques que permet avaluar el comportament de la planta durant tot el seu cicle de vida, amb el fi de proporcionar a la persona o empresa interessada en implementar una instal·lació solar diferents detalls de la inversió a realitzar, com la seva rendibilitat o idoneïtat.

Al marge de la alta precisió dels resultats obtinguts per a l'eina, el fet que l'estri de disseny disposi d'una estructura de càlculs complexa, es tradueix en alts temps de còmput per aconseguir el resultat. És en aquest marc on es troba l'origen del projecte: la necessitat d'optimitzar l'eina dissenyada amb el fi de reduir el cost temporal establert a l'hora de realitzar la totalitat dels càlculs.

2.2 Motivació

Per una banda, la realització d'aquest projecte ha estat motivat per l'interès en la realització d'un estudi relacionat amb el món de les energies renovables, fet que ha permès la adquisició i consolidació de diversos coneixements no treballats durant el grau d'enginyeria en tecnologies industrials. D'altra banda, un altra motiu no menys important ha estat la possibilitat d'afrontar-me a un problema real d'enginyeria, posant a prova la capacitat d'anàlisi i recerca a l'hora d'aconseguir resultats determinats.

Finalment, el fet de realitzar el projecte per a l'IREC ha esdevingut una motivació personal, doncs es pretén que els resultats obtinguts siguin útils per a una posterior optimització de la eina de disseny.

2.3 Requeriments previs

Per a la realització i comprensió del projecte són necessaris coneixements previs relacionats amb el disseny de plantes fotovoltaiques connectades a la xarxa així com dels diferents paràmetres que poden influir a la producció energètica al llarg de la vida de treball de la estació.

A més, per a la realització i interpretació dels diferents scripts en MATLAB és necessari familiaritzar-se en l'eina de càlcul matemàtic i el seu llenguatge de programació.

3 Introducció

3.1 Objectius del projecte

Per una banda, l'objectiu principal del projecte tracta sobre el desenvolupament paral·lel d'una eina de disseny de parcs fotovoltaics que, a grans trets, permeti analitzar, a través de les dades aportades per el fabricant, les corbes de funcionament de la instal·lació, trobar el punt òptim de funcionament en el circuit i calcular les pèrdues energètiques generades a diferents punts de la instal·lació, tot realitzant un anàlisi d'impacte econòmic.

D'altra banda, i establint així un altre objectiu, durant el desenvolupament de l'eina s'haurà de minimitzar el temps de còmput que utilitza el software emprat, implementant tècniques de programació i conceptes matemàtics que permetin reduir el temps de càlcul, a mode de millorar l'eina. Per a realitzar aquesta tasca, es dissenyaran i s'analitzaran diversos models de càlcul de circuits fotovoltaics i s'analitzarà l'error comès a cada model emprat. Es tracta de trobar un model de càlcul òptim per a l'eina de disseny, que minimitzi el temps de computació emprat, treballant sempre dintre d'un marge acceptable d'error (calculable i mesurable).

Per últim, i definint així l'última pauta, s'hauran de implementar els diferents scripts en MATLAB el més senzills i optimitzats possibles, a mode de reduir el cost de temps perdut degut a la resolució del programa per part de l'eina.

3.2 Abast del projecte

L'abast del següent projecte passa per a estudiar i analitzar el comportament de la planta en diferents punts de la instal·lació: des de que es genera l'energia solar a les cel·les fotovoltaïques, passant per als mòduls i *arrays* fotovoltaïcs, el cablejat de la instal·lació i altres dispositius com l'inversor o transformador instal·lats ...fins a arribar al punt de connexió a xarxa. D'aquesta manera, l'abast de l'estudi es relaciona amb el procés complet de generació d'energia dintre d'una instal·lació fotovoltaïca.

4 Introducció a l'energia fotovoltaica

4.1 Marc actual de l'energia solar fotovoltaica

L'esgotament inevitable dels elements fòssils unit a la consideració social per el medi ambient que s'ha produït durant les últimes dècades ha creat la necessitat de trobar fonts d'energia de caràcter il·limitat i sostenible. És en aquest marc on sorgeixen les energies renovables, el creixement de les quals s'ha incrementat ràpidament els últims anys.

Dintre de les energies renovables hi trobem l'energia solar fotovoltaica, una font d'energia que permet produir electricitat utilitzant la radiació solar i que actualment representa aproximadament un 5% de la producció mundial d'energia d'aquests tipus.

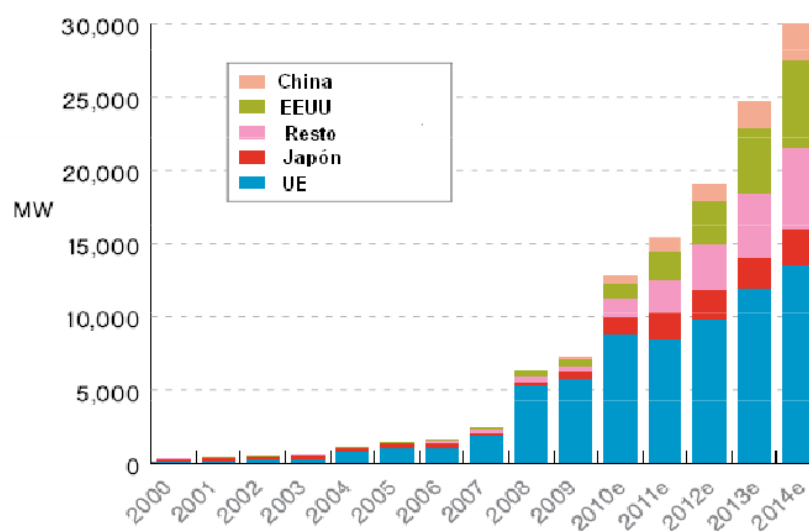


Figura 1 Evolució any a any de la potència solar instal·lada.

Durant els últims anys, en el camp de l'activitat fotovoltaica, l'aplicació que major expansió ha experimentat ha estat la dels sistemes de connexió a la xarxa elèctrica. L'extensió a gran escala d'aquest tipus d'aplicacions ha requerit el desenvolupament d'una enginyeria específica la qual permet, d'una banda, optimitzar el disseny i funcionament, i de l'altra, avaluar el seu impacte en el conjunt del sistema elèctric, tenint cura en tot moment la integració dels sistemes i respectant l'entorn arquitectònic i ambiental. En aquest marc sorgeixen les eines de disseny, les quals permeten facilitar la feina de dimensionament i reproducció de aquests tipus d'instal·lacions.

4.2 Instal·lacions fotovoltaiques

De manera general, es pot distingir entre instal·lacions fotovoltaiques connectades a xarxa i instal·lacions fotovoltaiques aïllades.

D'una banda, les connectades a xarxa conformen la principal aplicació de l'energia fotovoltaica en Espanya [1]. Es troben formades per un generador fotovoltaic i un sistema de condicionament de potència, encarregat de transformar l'energia en forma de corrent continu a corrent altern, amb les característiques de la xarxa de distribució. El sistema de condicionament de potència és l'inversor, que ha de complir tots els requisits de seguretat i garantia perquè el seu funcionament no provoqui alteracions a la xarxa ni disminueixi la seva seguretat, comptant per a això amb les funcions de protecció corresponents.

D'altra banda, les aplicacions aïllades són usades a petita escala, generalment a zones no urbanitzades on és necessari l'ús de l'electricitat. Les instal·lacions fotovoltaïques aïllades



Figura 2 Mostra d'instal·lacions fotovoltaïques connectada a xarxa i aïllada, respectivament.

poden comptar o no amb sistemes de acumulació o bateries. Aquests tipus de components corresponen en un 90 % a les estacionàries del tipus Plom - Àcid, que amb un manteniment adequat s'adapten perfectament als sistemes de generació.

Al llarg de l'estudi, ens centrarem en les instal·lacions fotovoltaïques connectades a xarxa, doncs l'eina de programació es troba dissenyada per aquests tipus d'instal·lacions.

4.2.1 Components d'un sistema solar fotovoltaic connectat a xarxa

Dins d'una instal·lació solar fotovoltaica tenim diversos dispositius o equips que hem de dimensionar perquè sigui possible la transformació de la radiació solar en energia elèctrica que injectem a la xarxa.

Panells fotovoltaics

Els panells solars o mòduls fotovoltaics són el principal dispositiu que conforma la planta fotovoltaica. Es troben formats per la interconnexió de cèl·lules solars encapsulades entre materials que les protegeixen dels efectes de la intempèrie, són les encarregades de captar

L'energia procedent del sol en forma de radiació solar i transformar-la en energia elèctrica per l'efecte fotovoltaic. L'efecte fotoelèctric es produeix en incidir la radiació solar sobre els materials semiconductors extrínsecs que conformen la cel·la, deixant lliures els electrons. En el mercat actual existeixen diversos tipus de cèl·lules fotovoltaïques, diferenciades per el material que les conforma. Les més utilitzades degut al seu major rendiment (15 – 18%), són les de silici monocristal·lí, fabricades a partir d'un únic cristall de silici extret d'un bany de silici fos.

Tot i així, a causa del seu alt cost, està començant a utilitzar-se de forma massiva el silici policristal·lí, molt més barat de fabricar ja que està format per un conjunt d'estructures macrocristal·lines de silici i, a més, el seu rendiment és bastant proper al de les cèl·lules monocristal·lines, en torn al 12% i 14%. Cal esmentar que en les simulacions realitzades durant tot el transcurs de l'anàlisi s'han considerat aquests tipus de cel·les.

Finalment hi ha una altra família de cèl·lules solars constituïdes de silici amorf, de fabricació més simple que les anteriors però es degraden més ràpidament i el seu rendiment és bastant inferior a el de les cèl·lules cristal·lines, inferior al 10% [2].

Estructura Suport

Els mòduls fotovoltaics es situen sobre la denominada estructura de suport, la qual té per missió sostenir els panells fotovoltaics, a més, ha de complir les especificacions de disseny de la instal·lació (orientació i angle d'inclinació) i les pautes descrites en el Plec de Condicions Tècniques de l'Institut per a la diversificació i Estalvi d'Energia (IDAE) [2].

Hi pot haver dos tipus de suport: fix i mòbil. Per una banda, les estructures fixes tenen una orientació i inclinació fixa que es calcula a l'hora de dissenyar la instal·lació depenent de la localització de l'emplaçament de la planta. D'altra banda, les estructures mòbils són aquelles on els panells poden orientar-se en torn a la posició del sol, fet que permet rebre més irradiació. Existeixen 3 tipus de estructures mòbils, depenent del seu abast d'orientació: *one axis N-S*, *one axis E-O* i *doble axis*.

En les simulacions realitzades, s'ha definit una estructura de suport fixe, amb un angle entre la superfície del terra i el panell d'aproximadament 30° .

Inversor

Anteriorment s'ha vist que la potencia que generen els panells solars fotovoltaics es proporcional a la radiació solar que capten. Aquesta potència generada és contínua, de manera

que a l'hora de lliurar-la a la xarxa, cal tractar-la perquè compleixi les característiques establertes, doncs ha de ser sinusoidal, amb una freqüència estàndard de 50-60Hz (dependent del país de ubicació de la planta) i uns valors de tensió determinats per no crear perturbacions en la xarxa de subministrament.

L'inversor és l'equip electrònic que permet injectar a la xarxa elèctrica comercial l'energia produïda pel generador fotovoltaic. La seva funció principal és convertir el corrent continu procedent dels panells fotovoltaics en corrent altern. El seu rendiment oscil·la entre el 90% i el 97% i depèn de la variació de la potència de la instal·lació, per la qual cosa s'intentarà que l'inversor treballi amb potències properes o iguals a la nominal.

Per evitar que el rendiment disminueixi amb la variació de la potència de entrada procedent dels panells solars, els inversors han d'estar equipats amb dispositius electrònics que permetin realitzar un seguiment del punt de màxima potència dels panells, permetent obtenir la màxima eficiència possible del generador fotovoltaic en qualsevol circumstància de funcionament.

Un dels paràmetres importants que defineixen un inversor és el rang de tensions al qual pot funcionar amb més rendiment, doncs fixa els valors de tensió (i per tant, de potència) a la qual pot treballar la planta fotovoltaica. Més endavant, veurem que aquest fenomen es tradueix en pèrdues energètiques per a la instal·lació.

Proteccions

A més de les proteccions integrades en l'inversor i en els diferents mòduls fotovoltaics, cal equipar la instal·lació amb proteccions addicionals que protegeixin tant la seguretat de la instal·lació i equips com la seguretat de les persones responsables del seu funcionament i manteniment.

- Interruptor general manual, que serà un interruptor magnetotèrmic amb intensitat de curtcircuit superior a la indicada per l'empresa distribuïdora en el punt de connexió.
- Interruptor automàtic diferencial, per tal de protegir les persones en el cas de derivació d'algun element de la part de contínua de la instal·lació.
- Interruptor automàtic de la interconnexió, per a la desconexió-connexió automàtica de la instal·lació fotovoltaica en cas de pèrdua de tensió o freqüència de la xarxa, al costat d'un relé d'enclavament.
- Protecció per a la interconnexió de màxima i mínima freqüència (51 i 49Hz, respectivament) i de màxima i mínima tensió (1,1 i 0,85 Um, respectivament) [3].

5 Caracterització de la planta PV connectada a xarxa

5.1 Circuit fotovoltaic

El circuit característic d'una cel·la fotovoltaica es troba format principalment per un generador de corrent (fotodetector), un díode de protecció i resistències en sèrie i en paral·lel disposades tal hi com s'observa a la figura.

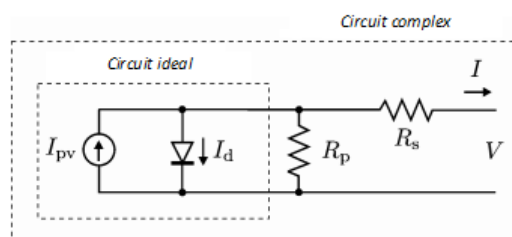


Figura 3 Esquema elèctric del circuit fotovoltaic

Depenent de si en el circuit fotovoltaic es tenen en compte les resistències es poden definir dos tipus de models: l'ideal i el one-diode, equacions característiques dels quals s'analitzaran a continuació.

5.2 Cel·la, mòdul, *string*, *array*

L'element de construcció més senzill d'un sistema fotovoltaic és la cel·la fotovoltaica. Aquest element és capaç de produir fins a 0.5V de potencial elèctric quan s'exposa a la llum solar; d'altra banda, la intensitat que genera és proporcional a la seva superfície i depèn de la irradiació solar incident.

El conjunt de cel·les en sèrie unides per un díode conformen l'element del segon esglaió del sistema fotovoltaic: els grups fotovoltaics. Tal hi com s'observa a la figura, el díode es troba connectat en paral·lel al conjunt de cel·les. Discretitzant el circuit, el grup fotovoltaic es sol representar com assenyalat a la imatge. (veure figura 3.1)

Seguidament i conformant així el tercer grup de la cadena fotovoltaica es troben els mòduls fotovoltaics. Un mòdul es troba caracteritzat per a un conjunt de grups fotovoltaics disposats en sèrie, de manera que la intensitat generada per a un mòdul és la mateixa que la aconseguida per a un grup fotovoltaic. En canvi, el potencial obtingut per el mòdul és la suma dels n potencials que generen els n grups fotovoltaics que conformen el mòdul. Per al model discret, el mòdul fotovoltaic es pot representar com s'observa en la figura. (veure figura 3.2)

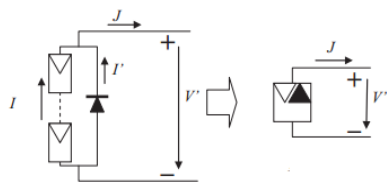


Figura 4.1 Esquema del grup fotovoltaic

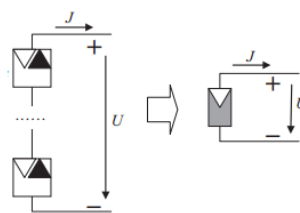


Figura 3.2 Esquema del mòdul fotovoltaic

Com a quart element del sistema fotovoltaic hi trobem l'*string* o panell fotovoltaic: conjunt de mòduls fotovoltaics disposats en sèrie. Els paràmetres I, V del circuit de l'*string* es comporten de la mateixa manera que en el cas anterior, la intensitat es manté igual que al mòdul i el voltatge és la suma de voltatges generats per els N_s mòduls que el conformen. Per al model discret, l'*string* es simbolitza tal hi com s'observa a la figura posterior. (veure figura 4.1)

Per últim, en el cinquè esglaió de la cadena d'elements fotovoltaics es troba l'*array* o matriu fotovoltaica. Es tracta de la combinació en paral·lel de *strings*. D'aquesta manera, la intensitat que genera l'element total és la suma d'intensitats dels N_p *strings* disposats en paral·lel, i el potencial generat total és el mateix que el que genera cada fila de d'*strings*, o dit d'una altra manera, equival al voltatge que generen els N_s mòduls que conformen l'*string*.

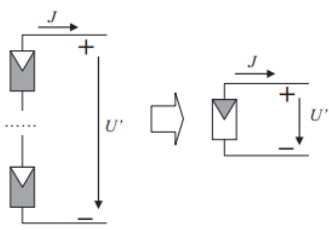


Figura 5.1 Esquema de l'string fotovoltaic.

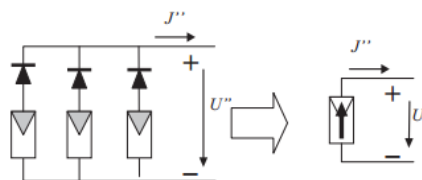


Figura 4.2 Esquema de l'array fotovoltaic.

En una instal·lació fotovoltaica, l'*array* fotovoltaic també es denominat *tracker* solar; de manera que la combinació de diversos elements d'aquest tipus conformen la totalitat de l'estació solar.

5.3 Models fotovoltaics

5.3.1 Model ideal

El circuit equivalent d'una cel·la ideal, tal hi com es pot observar a la figura 2 prové de considerar un valor per a les resistències de $R_s = 0$ i $R_p = \infty$. D'aquesta manera, l'equació característica de la cel·la ideal prové de realitzar el mètode dels nusos ($\sum I = 0$) en el punt de sortida del circuit. Així doncs, la intensitat de sortida de la cel·la fotovoltaica ideal és la suma,

en el signe correcte, de la intensitat que genera el fotodetector i la intensitat que deixa passar el díode de seguretat [4].

$$I = I_{pv} - \underbrace{I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]}_{I_d}$$

On I_{pv} és la corrent generada per la incidència de la llum (directament proporcional a la irradiació del sol), I_d és la equació característica del díode Shockley, I_o és la intensitat de saturació inversa pròpia del díode, q és la càrrega característica de l'electró ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C), k és la constant de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K), T (en Kelvin) és la temperatura de la junció p-n (la temperatura de treball de la cel·la), i a és la constant d'idealitat del díode.

Com a resultat, la corba V-I per el model ideal és la superposició de les corbes característiques dels dos dispositius principals de la cel·la ideal fotovoltaica: el fotodetector (generador de corrent) i el díode de seguretat.

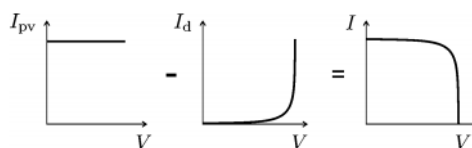


Figura 6 Representació de la corba V-I, a base de la combinació de I_{ph} i I_d

5.3.2 Model one-diode

L'equació ideal de la cel·la fotovoltaica no representa de manera exacta la corba I-V experimental. A la pràctica, les cel·les fotovoltaiques es troben sotmeses a càrregues, representades al circuit elèctric com a resistències en sèrie i en paral·lel. El conjunt de resistències afecten a la corba característica del circuit de determinades maneres, tal hi com s'exposarà a continuació [5]. Així doncs, per a representar el comportament del sistema fotovoltaic elemental de manera fidel a la realitat, cal afegir el conjunt de resistències esmentades a l'equació ideal.

$$I = I_{pv} - I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V + R_s \cdot I}{a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p}$$

De la mateixa manera que en la equació ideal, s'utilitza el mètode de nusos al punt de sortida del circuit per a determinar la equació característica. Analitzant ambdues equacions, es pot observar com en el model one-diode augmenta la intensitat que passa per el díode de protecció i, al mateix torn, es redueix la intensitat de sortida del circuit.

A l'equació anterior les variables R_s i R_p són les resistències en sèrie i en paral·lel del circuit elèctric. Analitzant matemàticament l'equació del model one-diode, s'observa que la introducció dels diferents termes converteix la intensitat de sortida del circuit en una funció implícita dependent del voltatge i de la mateixa intensitat, ($I = f(V, I)$). Aquest fet, com s'explicarà en apartats posteriors, fa que la resolució matemàtica de la equació es compliqui.

Després d'haver vist les equacions (ideal i del model one-diode) de les cel·les fotovoltaïques, per a interpretar matemàticament el comportament del mòdul fotovoltaic s'ha d'incloure a l'equació característica de la cel·la la variable n_s , corresponent al nombre de cel·les en sèrie que conté el mòdul.

$$I = I_{pv} - I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V + R_s \cdot I}{n_s \cdot a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V/n_s + R_s \cdot I}{R_p}$$

Amb la introducció del nou paràmetre, s'aconsegueix augmentar el voltatge de la corba característica, mentre que la intensitat es manté invariant entre cel·la i mòdul.

Finalment, per a representar la corba de l'array fotovoltaic s'han d'incloure a l'equació les variables N_p i N_s , corresponents al nombre de mòduls en paral·lel i sèrie respectivament. L'equació de l'*string* esdevé la mateixa equació però considerant $N_p = 1$.

$$I = I_{pv,a} - I_{o,a} \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V + R_s \cdot I \cdot N_s/N_p}{n_s \cdot a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I \cdot N_s/N_p}{R_p \cdot N_s/N_p}$$

On a l'expressió anterior $I_{pv,a}$ és la intensitat fotovoltaica que generen els N_p mòduls que conformen l'array i $I_{o,a}$ és la suma de les intensitats de saturació dels N_p díodes que es troben als mòduls que completen l'array.

Equacions implícites en la funció característica

A les funcions anteriors hi apareixen variables, com la intensitat fotovoltaica o la intensitat de saturació del díode, que disposen, al seu torn, d'equacions que les caracteritzen. A continuació, s'exposen les equacions d'aquestes variables per a l'array fotovoltaic sencer (cal esmentar que els productes amb els termes N_p i N_s de les equacions patiran variacions dependent de a l'esglaió que es trobi l'element fotovoltaic que es vulgui representar).

Per una banda, la equació que representa la intensitat fotovoltaica generada per els fotodetectors de l'array és directament proporcional a la irradiació que incideix sobre el receptor. El segon terme de l'equació es tracta d'un factor corrector de la temperatura, que simula l'efecte que té la temperatura sobre les plaques.

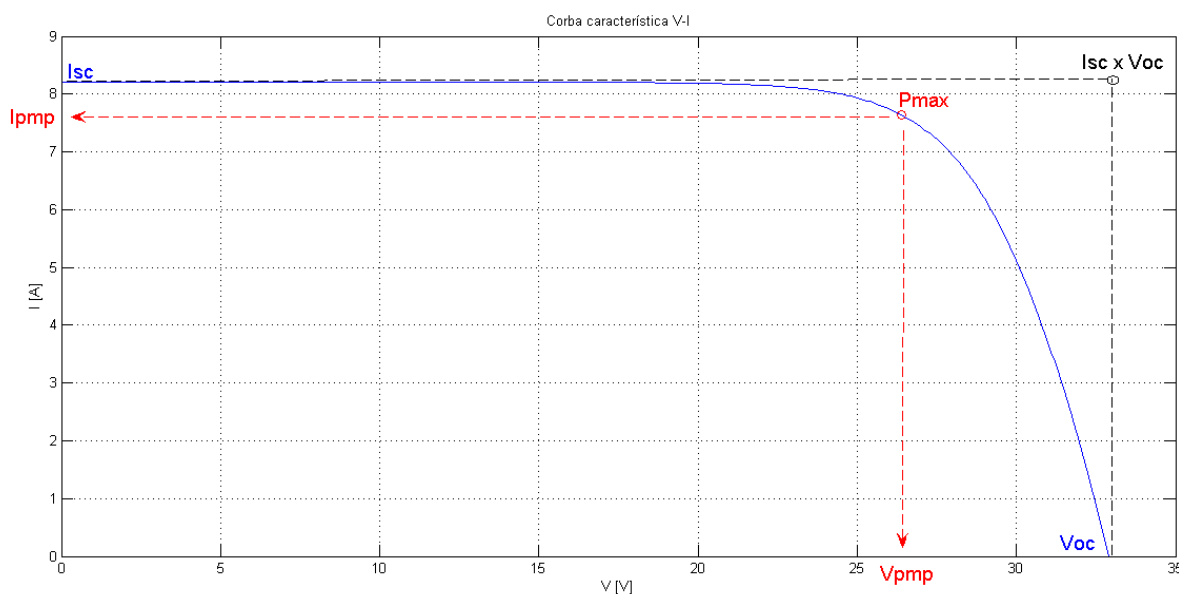
$$I_{pv,a} = \frac{G}{G_n} \cdot (I_{cc} \cdot N_p + k_i \cdot (T_c - T_{ref}))$$

D'altra banda, la equació que caracteritza la intensitat de saturació del díode depèn estretament de la temperatura de treball de la cel·la. Com s'observa, s'hi inclouen els coeficients de corrent i voltatge per a corregir els valors d'ambdós paràmetres elèctrics.

$$I_{o,a} = \frac{I_{cc} \cdot N_p + k_i \cdot (T_c - T_{ref})}{\exp\left(\frac{q \cdot V_c \cdot N_s + k_v \cdot (T_c - T_{ref})}{n_s \cdot a \cdot k \cdot T_c}\right) - 1}$$

5.4 Corba característica del mòdul fotovoltaic

Les corbes V-I i P-V que caracteritzen el funcionament dels mòduls fotovoltaics són útils per a determinar alguns paràmetres de treball de la instal·lació, permeten la senzilla interpretació dels diferents models fotovoltaics i, a més, permeten relacionar amb simplicitat les tres variables elèctriques (V,I i P), cosa que esdevé de gran utilitat a l'hora de dissenyar la planta de manera òptima. A continuació es presenten els principals paràmetres de una corba característica I-V d'un mòdul fotovoltaic, en una situació de temperatura i irradiació determinada.



Gràfica 1 Representació de la corba V-I d'un mòdul fotovoltaic, incloent-hi els seus elements principals.

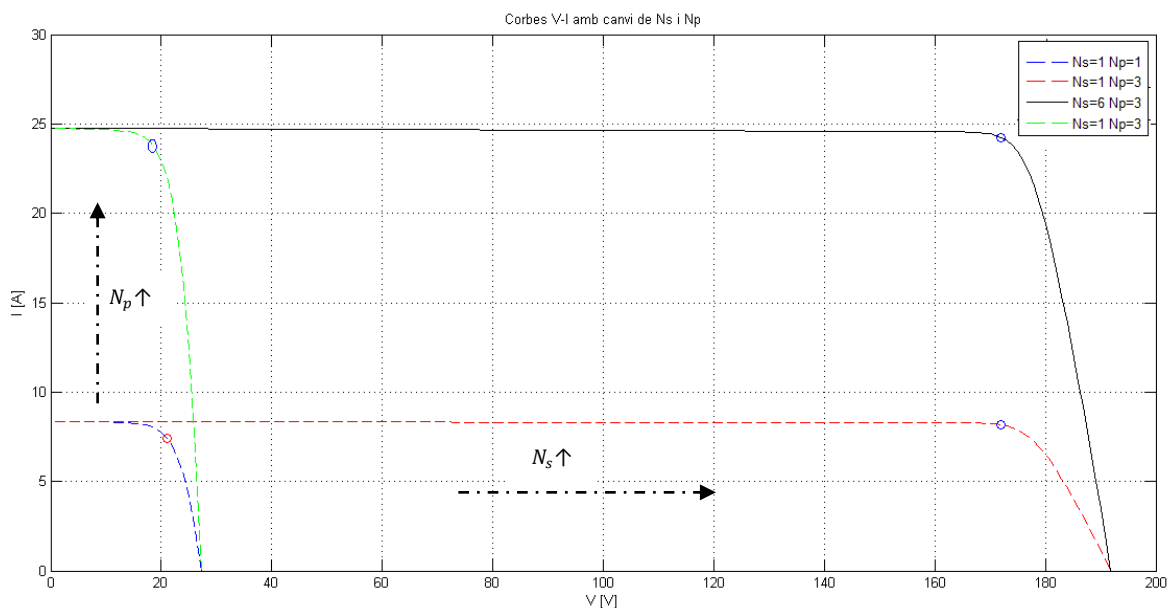
- *Corrent de curtcircuit (I_{cc} ó I_{sc})* : correspon a la màxima intensitat a la que treballarà la cel·la fotovoltaica en unes condicions de irradiació i temperatura corresponents a un voltatge nul.
- *Voltatge de circuit obert (V_{oc})* : es tracta del màxim voltatge al que treballarà el dispositiu fotovoltaic en unes condicions de irradiació i temperatura corresponents a un corrent nul.
- *Punt de potència màxima (P_{max})* : A la corba I-V correspon al parell màxim V-I, sota el qual el dispositiu treballa a la potència màxima que es pot obtenir en unes condicions de irradiació i temperatura determinades.
- *Intensitat al punt de potència màxima (I_{pmp})* : correspon al valor de la intensitat al punt de potència màxima de la corba.
- *Voltatge al punt de potència màxima (V_{pmp})* : correspon al valor del voltatge al punt de potència màxima de la corba.
- *Factor de forma* : es tracta de un paràmetre de disseny que indica la qualitat del dispositiu fotovoltaic. Més concretament, és la relació que existeix entre el valor de P_{max} i el producte el $V_{oc} \cdot I_{cc}$. Es pot expressar en tant per cent o tant per 1.

5.5 Paràmetres que influeixen

A aquesta secció s'analitzen els paràmetres principals que poden influir sobre les corbes característiques del circuit fotovoltaic. A més, s'avalua el comportament de les cobres V-I i P-V davant possibles alteracions de les variables analitzades.

5.5.1 Efecte del nombre de cel·les en sèrie i paral·lel (N_s i N_p)

El nombre de cel·les en sèrie i en paral·lel que conformen l'*array*, afecten de manera directa tant a la intensitat com al voltatge total de la corba característica. Com s'observa a la il·lustració següent, per a diferents distribucions de N_s i N_p els valors de la intensitat i voltatge varien proporcionalment al augmentar el nombre de mòduls de la distribució.

Gràfica 2 Corbes V-I amb canvi de N_s i N_p

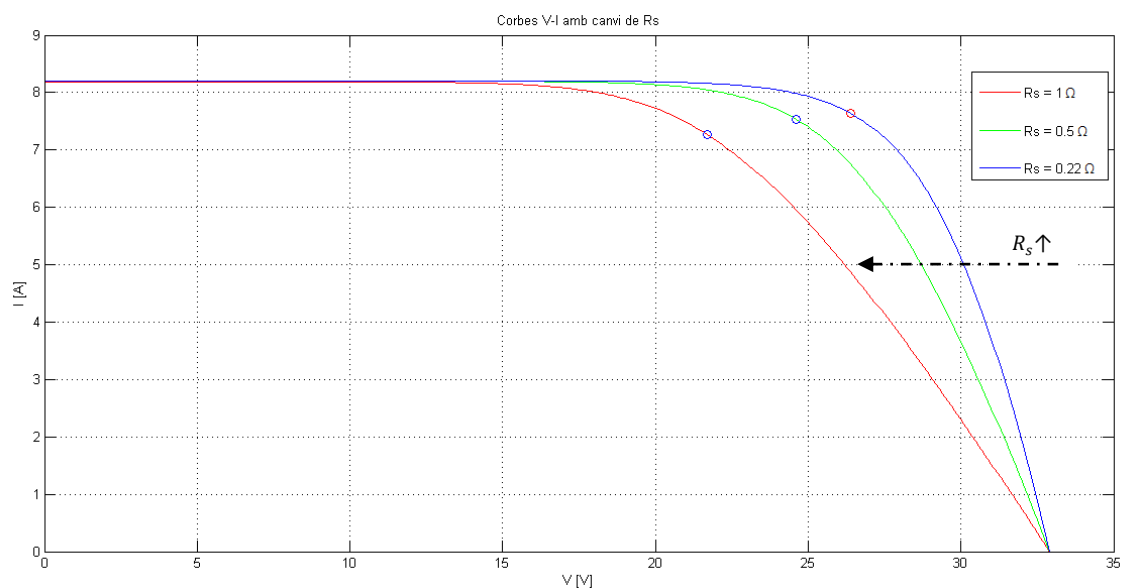
Com s'observa, la principal diferència entre el mòdul, l'*string* i l'*array* és el nombre de mòduls en sèrie i en paral·lel que els conformen. Per una banda, si es va augmentant el nombre de mòduls en sèrie, el voltatge en buit del circuit va augmentant proporcionalment ($V'_{oc} = V_{oc} \cdot N_s$). D'altra banda, si es va incrementant el nombre de mòduls en paral·lel, el que varia proporcionalment és la intensitat de curtcircuit ($I'_{cc} = I_{cc} \cdot N_p$).

5.5.2 Efecte de les resistències R_s i R_p

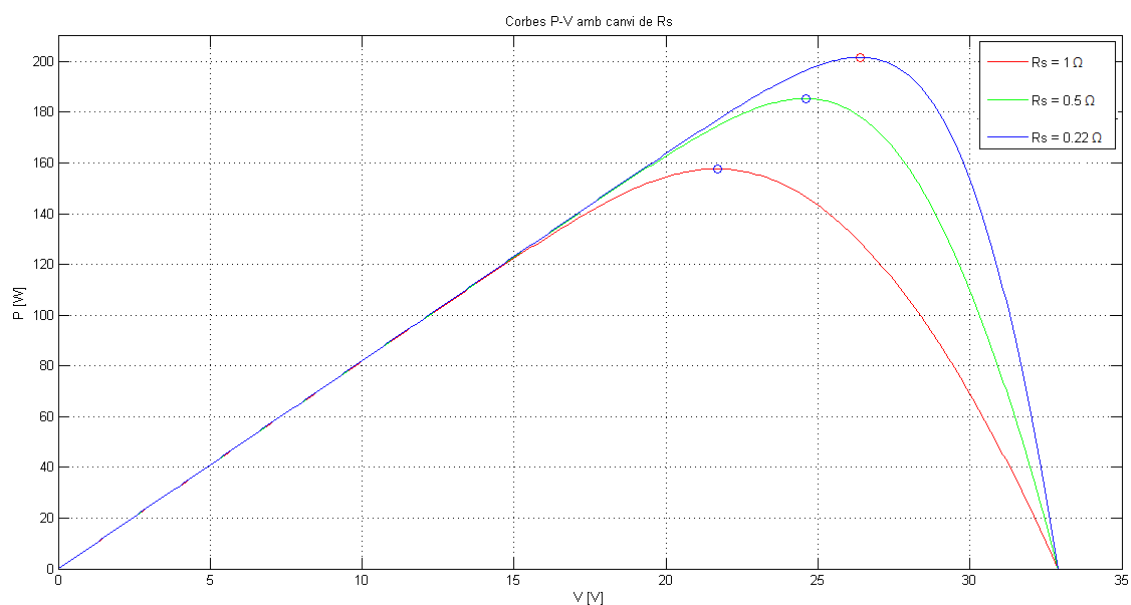
Variacions en els valors de les resistències en sèrie i en paral·lel produeixen variacions en la intensitat de sortida del circuit fotovoltaic. Aquest fenomen es reflexa de manera notòria en les corbes característiques V-I i P-V, les variacions de les quals expliquen el comportament del circuit fotovoltaic.

Variació de la resistència R_s

Si es produeix un augment de la resistència en sèrie, es produeix una reducció del corrent de sortida del circuit i, a l'hora, la intensitat que passa per el díode augmenta. L'augment de I_d fa que el voltatge entre borns del díode augmenti de manera exponencial, podent arribar a valors constants de potencials per a una determinada intensitat. Aquest fet es tradueix en una caiguda de la intensitat de la corba V-I a partir d'un punt de potencial menor a mesura que s'augmenta el valor de la resistència en sèrie.



Gràfica 3 Corbes V-I amb canvi de la resistència en sèrie



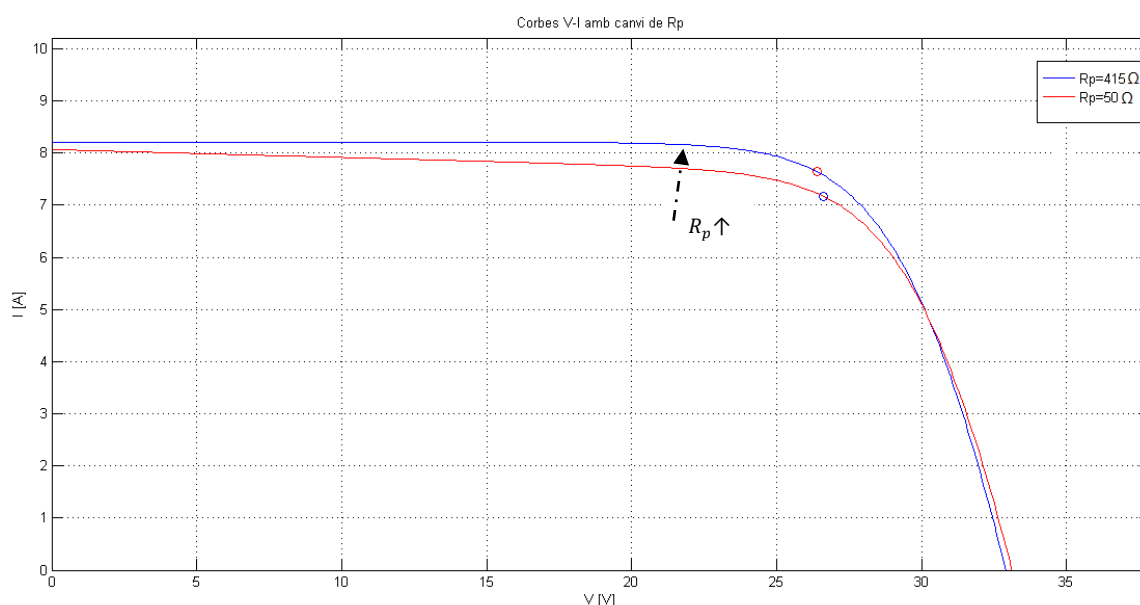
Gràfica 4 Corbes P-V amb canvi de la resistència en sèrie

Tal hi com s'observa a les figures anteriors, el fet que la caiguda d'intensitat es produeixi abans a les corbes V-I, fa que la potència al punt de funcionament variï de manera inversament proporcional al canvi de valors de R_s , de manera que interessarà tenir resistències en sèrie el més petites possibles.

Variació de la resistència R_p

Al contrari que en el cas anterior, si s'augmenta la resistència en paral·lel del circuit fotovoltaic es produeix un augment de la intensitat de sortida. Tal hi com es comprova al gràfic posterior,

L'atenuació de la corba V-I a mesura que es redueix la resistència en paral·lel comença a valors de voltatge baixos i es manté fins al punt de funcionament.



Gràfica 5 Corbes V-I amb canvi de la resistència en paral·lel

El fenomen s'explica tenint en compte la llei de nusos, doncs a mesura que la resistència en paral·lel augmenta disminueix la intensitat que passa per la branca i, com a conseqüència, s'incrementa la de sortida.

5.5.3 Efecte de la temperatura i irradiació solar

Per a determinar l'efecte de la irradiació i temperatura en les corbes característiques del circuit tant per el model ideal com per el one-diode, s'ha realitzat una simulació utilitzant una base de dades que inclou mesures experimentals de diferents paràmetres que influeixen en el disseny de la planta. Més concretament, en aquest conjunt de dades si presenten, entre d'altres variables, les temperatures i les irradiacions solars del Marroc durant cada hora de l'any 1990.

Amb la simulació d'un any natural d'un lloc determinat, es pot obtenir una anàlisi complexa de la influència que tenen alguns factors en el model de disseny.

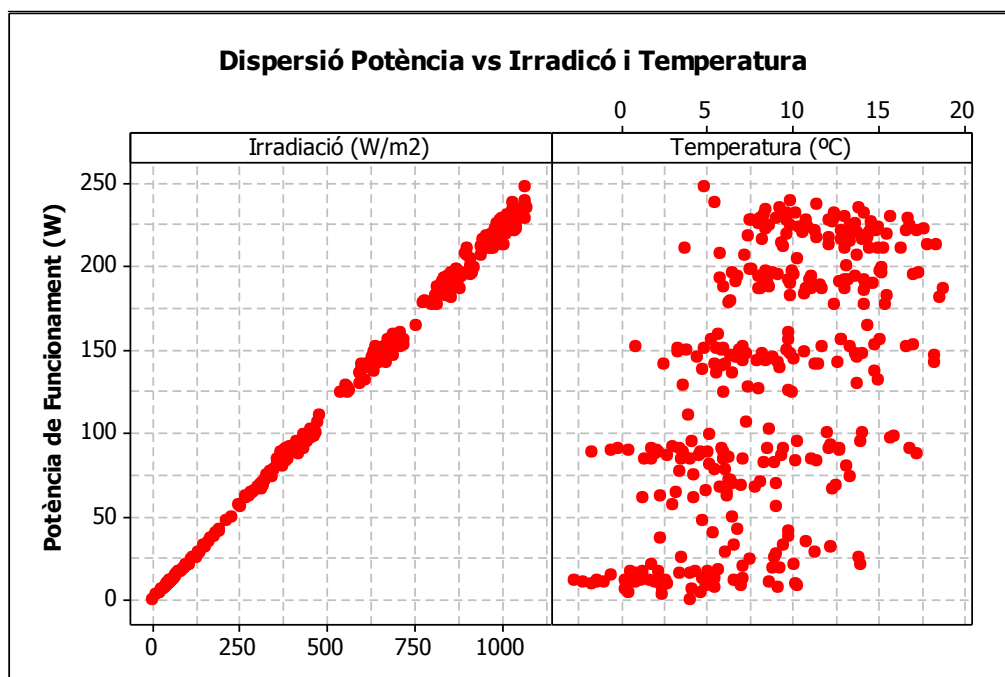
Condicions de la simulació

Per a realitzar l'anàlisi s'han discretitzat els diferents models fotovoltaics amb dues variables d'estudi: la temperatura i la irradiació solar. Així doncs, aquest anàlisi permetrà observar les diferències significatives entre models en funció d'ambdues variables.

Per a la simulació s'han considerat constants algunes variables característiques de la cel·la fotovoltaica, així com les condicions ambient. La càrrega de l'electró s'ha definit com $q = 1.60217646 \times 10^{-19} \text{ C}$, la constant de Boltzmann és $k = 1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, la temperatura de referència de la cel·la s'ha establert com $T_{ref} = 298 \text{ K}$, l'energia de Gap del material semiconductor disposa d'una valor de $E_g = 1,12 \text{ eV}$, el factors correcció de la intensitat i voltatge s'han considerat $k_i = 0,0032 \frac{\text{A}}{\text{K}}$ i $K_v = -0,1230 \frac{\text{V}}{\text{K}}$. La constant d'idealitat, ja definida en les prestacions del fabricant, disposa d'una valor de $a = 1,3$. Altres variables característiques del circuit fotovoltaic com les resistències disposen d'uns valors de $R_s = 0,221 \Omega$ i $R_p = 415,405 \Omega$. Finalment, el grup fotovoltaic es troba format per a un nombre de cel·les en sèrie de $N_s = 54$ i disposa de un valor de voltatge en buit de $V_{oc} = 32,9 \text{ V}$.

Després d'haver realitzat la simulació, es comprova com ambdues variables denoten un augment proporcional de la potència a mesura que s'augmenten els valors d'ambdós paràmetres.

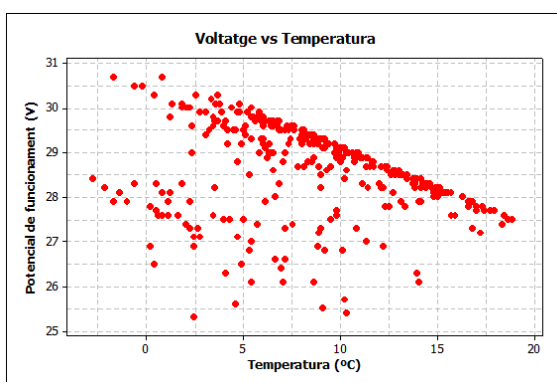
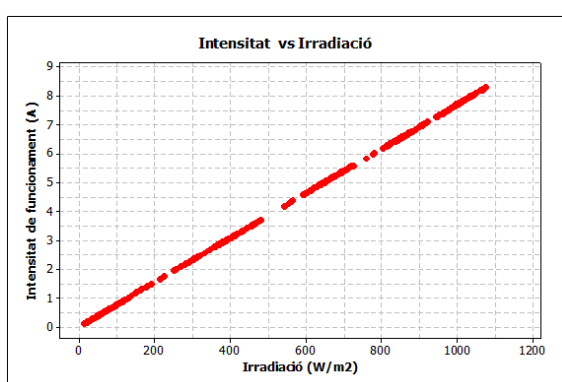
Per a la irradiació, s'estableix una relació lineal clara amb la potència de funcionament del mòdul. En canvi, pel que fa a la temperatura la dispersió no denota una relació explícita, tot i que es deixa entreveure un augment (amb alta variabilitat) de la potència al incrementar la temperatura.



Gràfica 6 Dispersió de la potència de funcionament amb la irradiació solar i la temperatura.

Al llarg de la simulació s'ha observat que la irradiació presenta una dependència clara sobre la intensitat de sortida del circuit fotovoltaic, degut al principi de funcionament de les cel·les. En canvi, la temperatura es troba íntimament relacionada al potencial de sortida del mòdul solar.

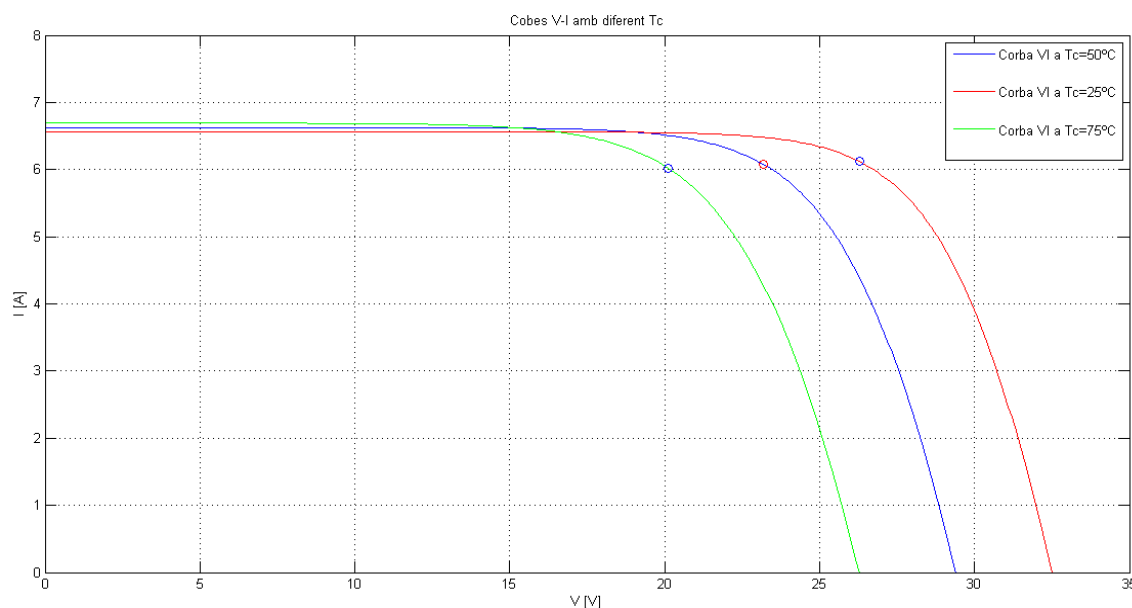
Com s'observa als diagrames de continuació, ambdues dependències presenten variabilitats diferents. Pel que fa la relació entre el voltatge i la temperatura, es presenta una gran dispersió entre els diferents punts, cosa que explica la dispersió entre la temperatura i la potència de funcionament (mostrada al gràfic anterior). Finalment, s'accepta que la relació lineal que s'estableix entre la potència i la irradiació, ve donada per la dependència lineal que té la intensitat amb aquest tipus de paràmetre.



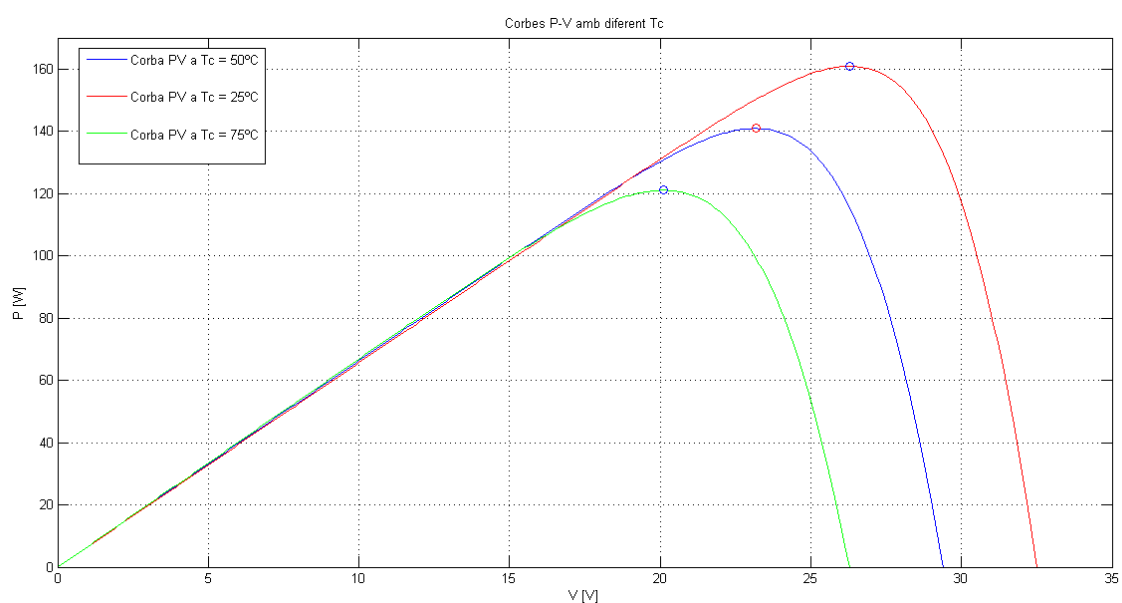
Gràfica 7.1 Dispersió de la intensitat i la irradiació solar. Gràfica 7.2 Dispersió entre el voltatge i la temperatura.

Influència de la temperatura en la corba i punts de funcionament

S'observa que a mesura que va augmentant la temperatura de funcionament de la placa, el valor de voltatge en buit del mòdul va disminuint. A més, tot hi que en el punt de funcionament la intensitat no experimenta grans canvis, el desplaçament del punt V_{oc} fa desplaçar, a l'hora, el punt de màxima potència cap a voltatges majors. Com a resultat, s'experimenta una reducció de la potència de treball a mesura que la temperatura de funcionament de la placa va augmentant.



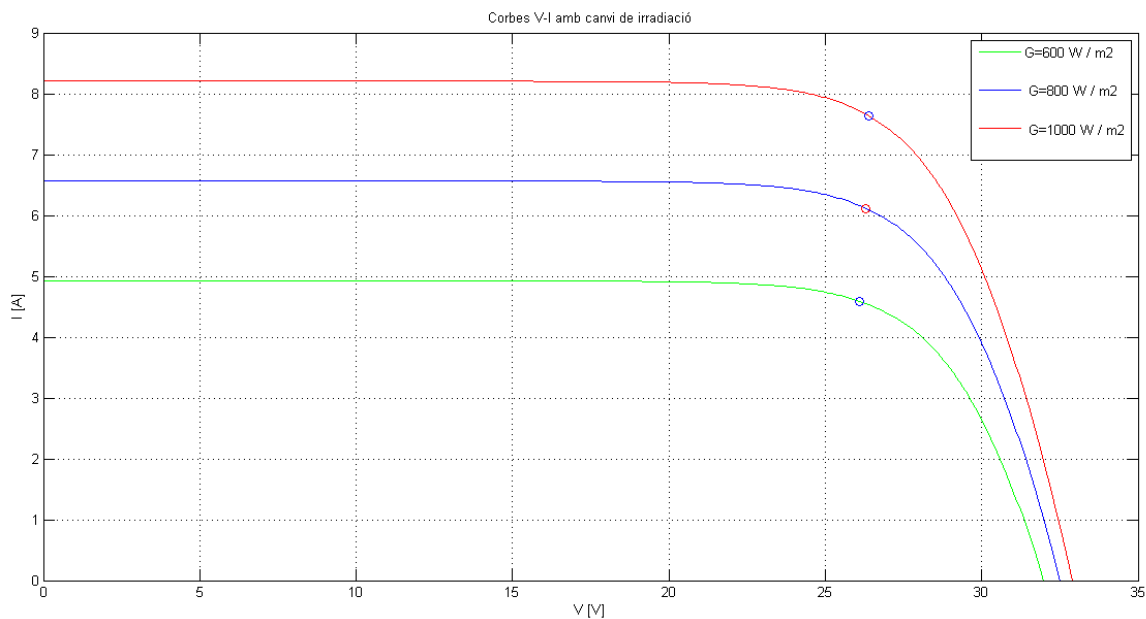
Gràfica 8 Corbes V-I amb canvi de la temperatura de funcionament de la cel·la



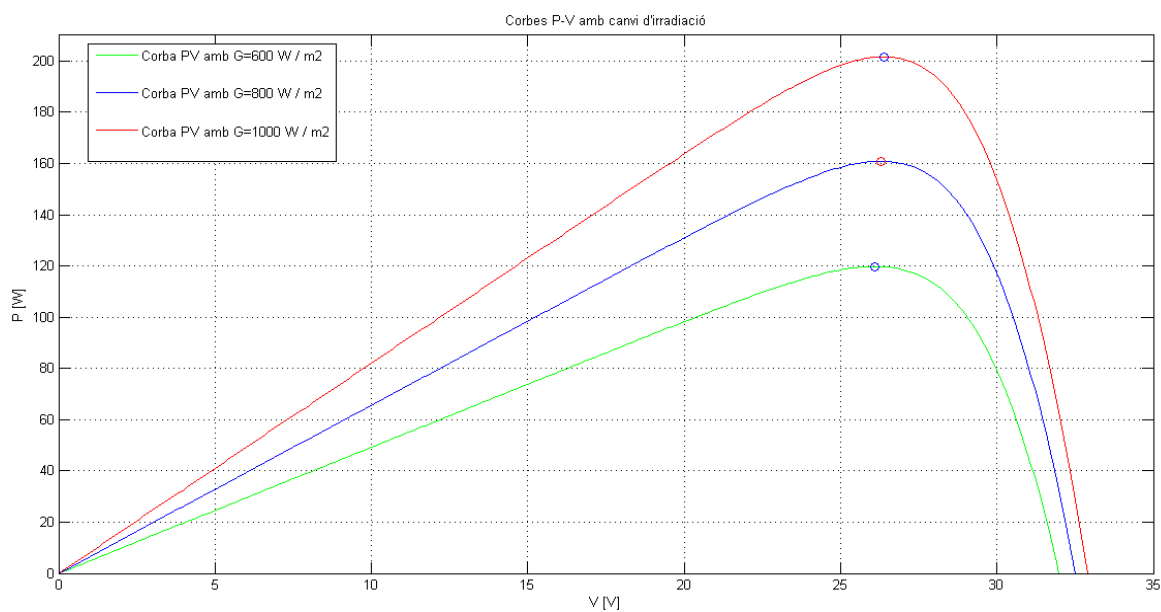
Gràfica 9 Corbes P-V amb canvi de la temperatura de funcionament de la cel·la

Influència de la irradiació solar en la corba i punts de funcionament.

Tal hi com s'ha observat en els diagrames de dispersió anteriors, la intensitat que genera el fotodetector I_{ph} és gairebé proporcional a la irradiació solar incident. Aquest fet es tradueix en augments proporcionals de la intensitat de sortida del circuit a mesura que s'augmenta el paràmetre analitzat.



Gràfica 10 Corbes V-I amb canvi de la irradiació solar incident a la cel·la



Gràfica 11 Corbes P-V amb canvi de la irradiació solar incident a la cel·la

A les corbes característiques, s'observa, a més, que l'augment de intensitat degut al canvi de irradiació produeix un augment proporcional de la potència de funcionament generada. Aquest fenomen es produeix a causa de que el potencial de sortida del circuit es veu poc alterat davant les variacions de irradiació.

6 Pèrdues en la planta fotovoltaica

Igual que en altres processos de generació de potència elèctrica, les pèrdues són un factor determinant que cal tenir present en tot moment per poder posteriorment avaluar els rendiments dels equips.

A priori resulta molt fàcil pensar que l'energia produïda per una instal·lació fotovoltaica és directament proporcional a la irradiació incident en el pla del generador fotovoltaic. Així per exemple, en un sistema amb un generador fotovoltaic d'1 m² de superfície i de potència nominal 1 kWp instal·lat amb unes condicions meteorològiques tals que rebí una irradiació anual de 1500 kWh / m², el generador en absència de pèrdues produiria 1500 kWh.

Ara bé, l'experiència i diferents estudis mostren que l'energia produïda per un mòdul fotovoltaic és prou inferior. Més concretament, la eficiència d'un mòdul fotovoltaic, i principal causa de pèrdues energètiques, es troba al voltant del 15%. Aquests tipus de pèrdues degut a la eficiència de la cel·la fotovoltaica es troben intrínsecament incloses a les equacions que descriuen els diferents models.

A aquest apartat, s'exposaran les pèrdues energètiques principals que es produeixen al marge de la baixa eficiència del transformador, així com els diferents mètodes emprats per a quantificar-les [6].

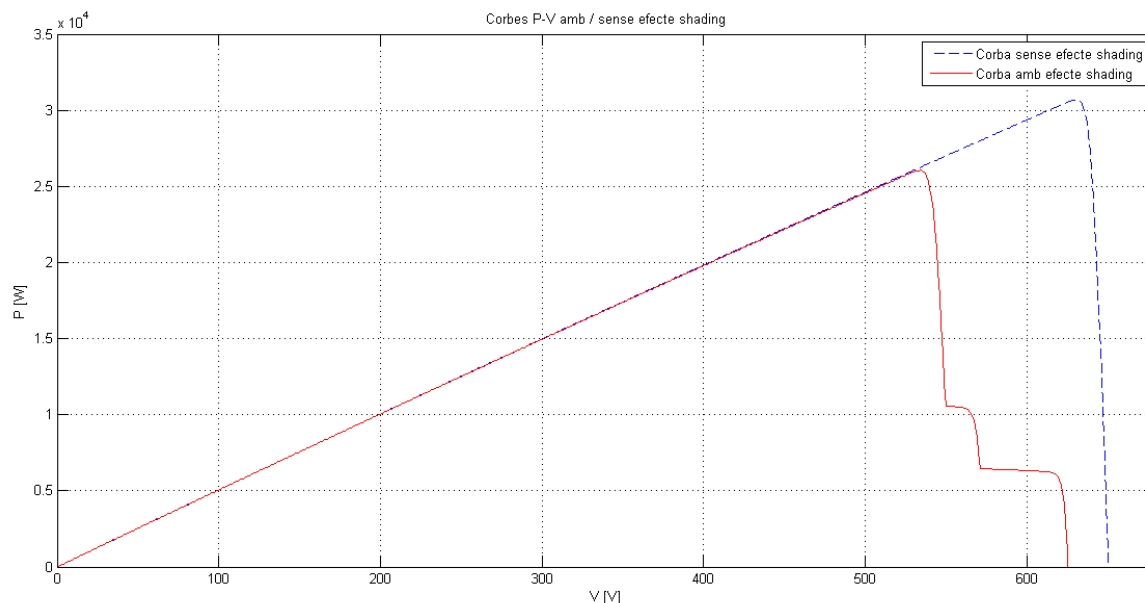
6.1 Pèrdues per efecte d'ombratge

L'ombratge en una instal·lació fotovoltaica és la principal causa de pèrdues energètiques dintre del sistema. Aquesta situació implica que pot haver-hi cèl·lules fotovoltaiques que treballen en diferents condicions de irradiància dins de la mateixa instal·lació, cosa que pot afectar a alguns paràmetres de treball, com la polarització del díode. A més, la situació d'ombra parcial dintre dels mòduls fotovoltaics pot causar canvis de temperatura entre els elements veïns.

Efecte de shading sobre les corbes característiques

El fet de tenir diferents distribucions de irradiàncies en un mateix sistema, fa que no es treballi a la màxima potència possible, doncs els mòduls amb zones ombrejades no generen la mateixa intensitat que els mòduls que treballen a irradiació màxima.

Aquest fet es tradueix a les corbes característiques en una reducció de la potència al punt de funcionament, tal hi com s'il·lustra a la figura següent.



Gràfica 12 Corbes V-I amb i sense efecte d'ombrejat.

Mètode de generació de les corbes amb efecte de shading

Com es pot observar en la corba P-V, la corba total que genera el *tracker* és la combinació de les diferents corbes característiques dels diferents grups ombrejats, superposats de la manera adequada.

A l'eina de disseny, per a representar les corbes característiques tenint en compte l'efecte d'ombratge, s'ha usat el mètode descrit a un article tècnic realitzat a la universitat de Vigo, Espanya.[7]

Per a una distribució com la de la figura representada posteriorment, es divideix el *tracker* en tres grups d'strings diferents (G_1, G_2 i G_3), depenent de les distribucions de irradiacions disposades en cada grup. Al mateix torn, cada grup d'*strings* pot dividir-se en subgrups diferents (g_1, g_2, g_3); doncs en un mateix grup G_i hi pot haver-hi més d'un tipus d'irradiació.

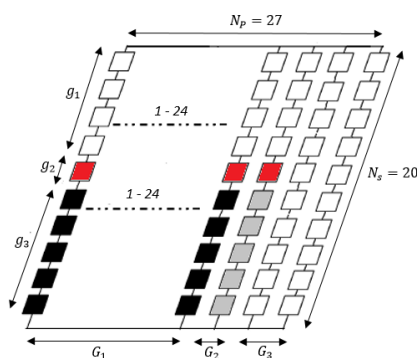
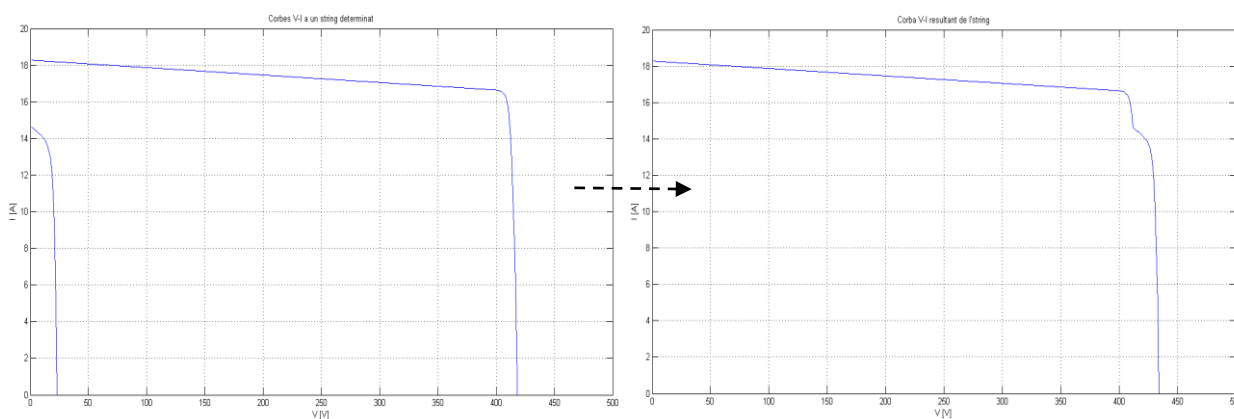


Figura 7 Distribució d'ombres en el tracker fotovoltaic

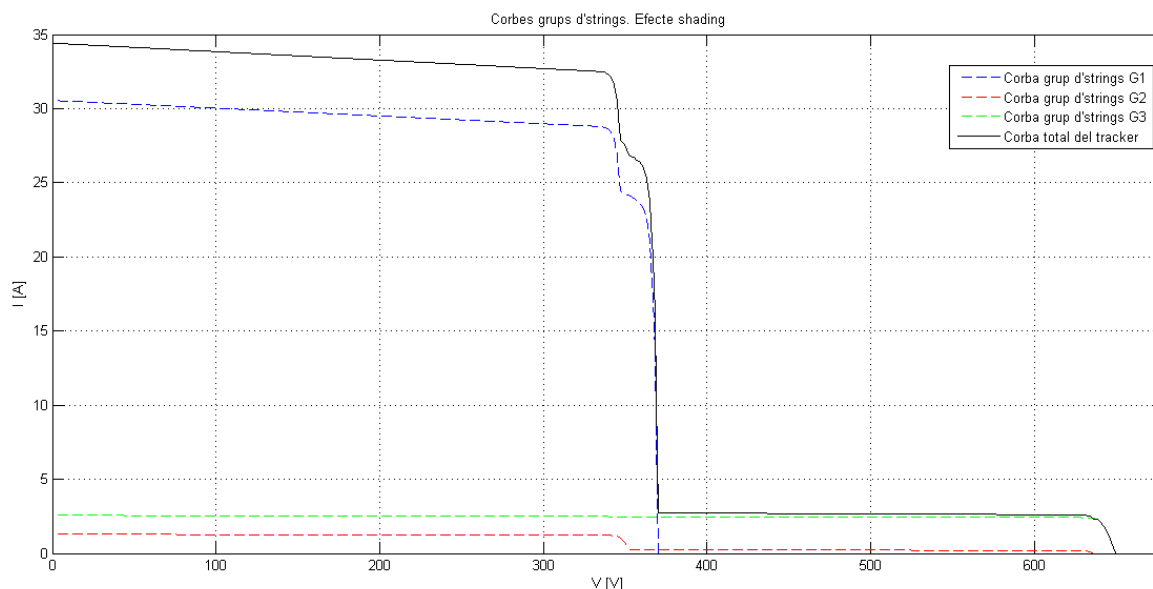
Cada un dels grups g_i inclosos a dintre d'un grup d'*strings* principal G_i , generen una intensitat diferent, proporcional a la irradiació que els hi arriba. En aquesta diferència de intensitats en una mateixa fila de mòduls, els díodes realitzen una funció important, només deixant actius els mòduls que generen les intensitats màximes de la fila. D'aquesta manera, conforme la intensitat va disminuint al llarg de la corba, els subgrups g_i es van sumant a la corba de treball. Pel que fa al voltatge, la suma dels diferents valors de V_{oc} de les diferents corbes g_i correspon al V_{oc} total del *tracker*. Així doncs, per a representar les corbes característiques dels grups d'*strings* G_i , cal anar superposant en l'eix del voltatge les diferents corbes que generen els subgrups g_i , tal hi com s'observa a la gràfica següent.



Gràfica 13 Concatenació de corbes V-I per a formar la corba total de l'string.

Finalment, per a representar la corba total del *tracker*, cal unir les corbes dels diferents grups d'*strings* per mitjà de la suma de les seves intensitats a cada pas de voltatge de la corba. S'ha de fer així degut a la disposició en paral·lel dels grups G_i , que obliga a sumar les seves intensitats per a obtenir la intensitat total.

A la gràfica següent, s'observa com la corba total del *tracker* s'ha obtingut a partir de la suma de les intensitats de les diferents corbes dels grups a cada punt. A més, tal hi com es pot observar, les corbes dels diferents grups d'*strings* s'han obtingut a través de la superposició en l'eix del voltatge de les diferents corbes dels subgrups. El mètode de superposició de les diferents corbes s'ha extret de un article tècnic realitzat per Hiren Patel i Vivek Agarwal. [8]



Gràfica 14 Corbes V-I per grups d'strings en un tracker.

6.2 Pèrdues en el cablejat

Tant en la part DC com en la part AC (des de la sortida dels inversors fins als comptadors d'energia) de la instal·lació es produeixen unes pèrdues energètiques originades per les caigudes de tensió quan una determinada corrent circula per un conductor d'un material i secció determinats. Aquests tipus de pèrdues solen representar generalment un 0,5-1% del total de l'energia produïda, de manera que en l'eina de disseny serà força interessant reduir el màxim possible aquest tipus de despeses.

Les pèrdues per cablejat són proporcionals a la intensitat al quadrat que circula per el conductor i a la resistència que ofereix aquest ($P_{perd} = R \cdot I^2$). La resistència del cable, al seu torn, és inversament proporcional a la seva secció i proporcional a la seva longitud, de manera que per a reduir al màxim les despeses energètiques d'aquest tipus es pot de optimitzar la secció i longitud del cable.

Càlcul de la secció òptima de cablejat

Per al disseny de la secció òptima del cablejat, s'ha creat un script dintre de l'eina de disseny anomenat *seccio.m*, on s'han tingut en compte els criteris de màxim intensitat admissible i màxima caiguda de tensió permesa, tal hi com s'explica en una publicació de l'European Copper Institute [9].

Primerament, s'han fet una sèrie de consideracions inicials que cal tenir en compte:

- 1) Els paràmetres de les cel·les fotovoltaïques utilitzades són els teòrics, donats per el fabricant.
- 2) Només s'han considerat dos materials possibles per al cablejat: el coure i l'alumini.
- 3) El cablejat s'ha considerat exterior i amb unes característiques determinades, esmentades posteriorment.
- 4) No s'ha considerat el factor corrector per agrupament de cablejat en el disseny per a intensitat.
- 5) Si és necessita més d'un conductor, es disposaran en paral·lel.
- 6) La secció òptima és la màxima trobada amb els dos criteris.

Disseny per a la màxima intensitat permesa

La intensitat màxima admissible en un cable és el valor màxim de intensitat que el conductor és capaç de suportar permanentment sense que aquest superi la temperatura màxima que suporta l'aïllament del cable.

La norma que en la actualitat contempla les intensitats màximes admissibles en els cables o conductores instal·lats a l'exterior és la UNE 20460-5-523:2004. Aquesta norma o criteri estableix que a l'hora de dissenyar una instal·lació, el màxim corrent calculat ha de ser incrementat amb un marge d'un 25%. A més, quan la temperatura d'operació dels cables s'incrementa per sobre dels 40°C, s'ha d'aplicar un factor corrector de temperatura.

Primerament, per al càlcul del factor corrector de la temperatura s'ha tingut en compte la diferència de temperatures entre la temperatura establerta de referència a Espanya i la temperatura de funcionament del cablejat.

$$fact_{corr,temp} = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_{amb}}{\theta_c - \theta_{ref}}}$$

On θ_c fa referència a la temperatura de funcionament del conductor, θ_{amb} és la temperatura ambient del medi on es troba la planta i θ_{ref} és tracta de la temperatura de referència establerta a Espanya, 40°C per a cablejat a l'aire lliure i 25°C per a instal·lacions amb cablejat enterrat. Cal esmentar, que el factor corrector calculat s'aplicarà dos cops ja que el cablejat exterior es troba sotmès a l'exposició del sol.

Seguidament, tenint la intensitat que passa per les cel·les a potència màxima (I_{pmp} , donada per el fabricant), s'ha calculat la intensitat admissible màxima corregida.

$$I'_{max,admin} = \frac{1.25 \cdot I_{tot}}{fact_{corr,temp} \cdot fact_{corr,temp}}$$

On la I_{tot} és la intensitat a potència màxima que passa per a les N_p cel·les connectades en paral·lel.

Finalment, tal i com estableix la norma a la qual hem fet referència, a partir de la intensitat corregida s'assigna una secció de la taula A.52-1 bis (*veure annex A.1*). Cal esmentar que el cablejat utilitzat és de classe F, cables unipolars a l'aire lliure, on la distància del cable al sòl és superior a la longitud d'aïllament del conductor. A més, el tipus d'aïllament per a aquestes instal·lacions és XLPE, fets de polietilè reticulat.

Disseny per a la màxima d.d.p permesa

El disseny per a la màxima caiguda de tensió permesa, tal i com dicta l'article ITC-BT 40, estableix que entre el generador (en el nostre cas, les cel·les fotovoltaïques) i el punt de connexió a la xarxa pública de distribució no hi pot haver una diferència de potencial superior del 1.5% treballant a intensitat nominal.

Per a començar, s'ha assumit que un 1% d'aquesta caiguda de tensió prové de la d.d.p generada a la línia DC principal (la que s'està dissenyant). El 0.5% restant correspon a la caiguda produïda a la resta de cablejat de la instal·lació.

Així doncs, s'ha calculat la màxima caiguda de tensió permesa com:

$$e_{max} = U_{tot} \cdot 0.01$$

On la U_{tot} fa referència al voltatge que s'estableix entre les N_s plaques disposades en sèrie, treballant a U_{pmp} (voltatge entre plaques treballant a potència màxima).

Seguidament, s'ha calculat la secció òptima utilitzant la definició de conductivitat elèctrica del material.

$$S_{opt} = \frac{L \cdot I_{nom}}{\gamma \cdot e}$$

On L és la longitud del cablejat, I_{nom} es tracta del corrent nominal de la instal·lació, establert per el fabricant i γ fa referència a la conductivitat elèctrica pròpia del material del conductor.

Elecció de la secció òptima

En l'script *seccio.m* creat, s'elegeix la secció màxima de les ambdues calculades, ja que amb una secció major qualsevol, ambdós criteris es compleixen. A més, l'eina també estableix quants de connectors en paral·lel es necessiten.

6.3 Pèrdues per temperatura

El rendiment de les cel·les fotovoltaïques varia en funció de la temperatura. Per a temperatures per sota dels 25 °C (considerada la temperatura de referència de la cel·la) es redueix la potència de sortida dels dispositius fotovoltaïcs, mentre que si la temperatura es troba per sobre del valor de referència, la potència generada augmenta. Per a determinar l'efecte que té la temperatura sobre el funcionament de la cel·la, es defineixen els coeficients per a la intensitat i el voltatge [10].

Aquets tipus de coeficients varien en funció del tipus de cel·la fotovoltaïca utilitzada en la instal·lació. En el nostre cas, es treballarà amb cel·les policristal·lines amb coeficients $K_v = -0,1230 \frac{V}{K}$ i $K_i = 0,0032 \frac{A}{K}$. L'efecte de la temperatura ja es té en compte en les equacions dels models exposats al capítol anterior, de manera que les pèrdues degudes a aquest fenomen són contemplades amb la correcció de les variables V,I del circuit fotovoltaïc.

D'aquesta manera, els termes $k_i \cdot (T_c - T_{ref})$ i $k_v \cdot (T_c - T_{ref})$ incloses en les equacions característiques dels diferents models exposats representen les correccions de la intensitat i el voltatge que s'han de realitzar degut a l'efecte de la temperatura.

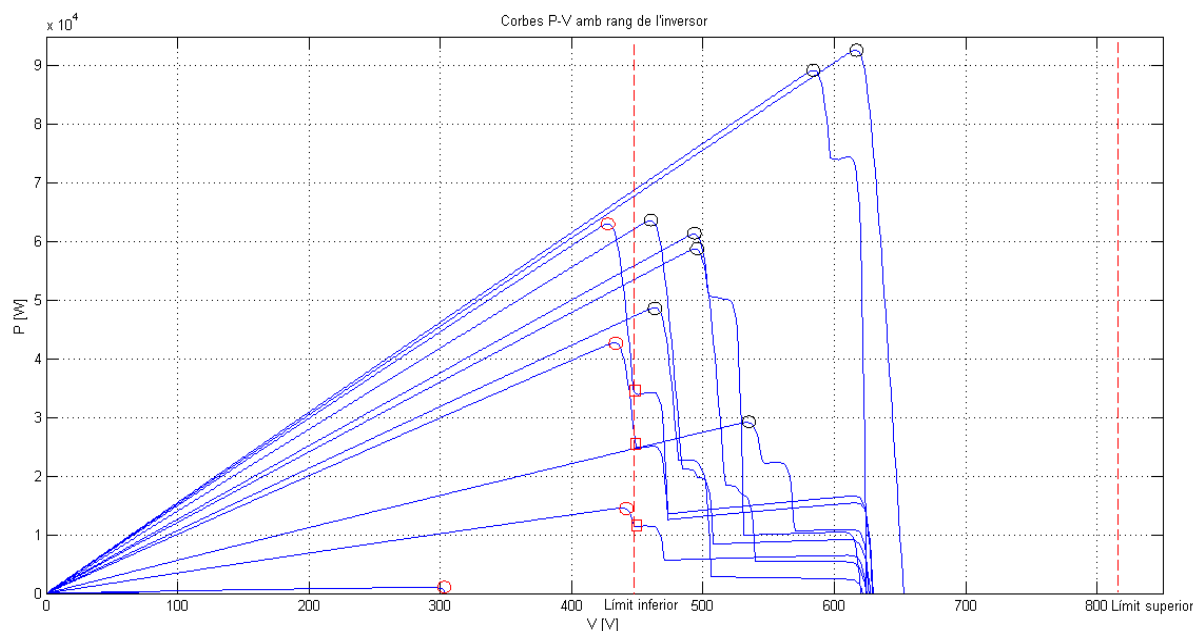
6.4 Pèrdues per el rendiment de l'inversor

L'inversor fotovoltaïc es troba caracteritzat per la corba rendiment – potència de treball. Dit d'una altra manera, el rendiment del dispositiu inversor depèn de la potència en que es troba treballant. Per aquest motiu, en l'elecció del inversor a l'hora de dissenyar la planta s'haurà de tenir en compte la potència a la qual el dispositiu treballa a màxim rendiment. A mode de simplificar el càlcul de pèrdues, a l'hora de calcular-les amb la nostre eina de disseny, es considerarà un rendiment d'inversor constant.

Pèrdues degudes a la saturació

L'inversor fotovoltaïc només pot treballar entre uns valors de voltatge establerts per el fabricant (rang de funcionament). Per el bon disseny d'una planta fotovoltaïca és important que els punts de funcionament dels diferents *trackers* es trobin dintre d'aquests límits. Si no és així, l'inversor

limita el funcionament del *tracker*, i és aquest dispositiu el que estableix el voltatge de funcionament (corresponent a uns dels límits del seu rang).



Gràfica 15 Corbes P-V amb la representació del rang de funcionament de l'inversor.

A la figura anterior s'observa com els *trackers* que es queden fora del rang de funcionament de l'inversor són obligats a treballar al voltatge corresponent al límit inferior, $P(V = V_{inv})$. Aquesta situació es denomina saturació a causa de l'inversor i es tradueix en una reducció de la potència que genera el dispositiu fotovoltaic.

6.5 Pèrdues per el rendiment del transformador

De la mateixa manera que l'inversor, el transformador també disposa d'una eficiència depenent del model. Generalment, el rendiment del transformador és major que el de l'inversor, es sol fixar al voltant d'un 99%. Per a les simulacions posteriors es considerarà aquest valor de rendiment.

6.6 Pèrdues per contaminació o soiling

La deposició de pols i brutícia a la superfície dels mòduls fotovoltaics causa una disminució de la potència generada per part del mòdul. D'una banda, aquesta reducció de potència pot ser causada per la presència d'una brutícia uniforme sobre el mòdul, que dona lloc a una disminució del corrent i tensió lliurada pel generador fotovoltaic. D'altra banda, la presència de focus de brutícia localitzats pot donar lloc a un augment de les pèrdues de *missmatch* (pèrdues degudes al interconnexionat del mòdul) i a les pèrdues per formació de punts calents [11].

Generalment, les pèrdues per aquest tipus de fenomen són avaluades entre un 1-3%. Per a la nostre eina de disseny, s'establirà unes pèrdues de *soiling* del 2% [12].

6.7 Pèrdues degudes a la degradació o *aging*

Normalment, la vida útil estimada de les cel·les fotovoltaïques és d'aproximadament 20-30 anys[13]. No obstant, conforme es va utilitzant la instal·lació el rendiment de les cel·les va disminuint. Aquest fenomen es coneix com a degradació o *aging* de la cel·la fotovoltaïca i depèn del lloc en que estigui instal·lada la instal·lació i del temps de en que el dispositiu ha estat treballant.

Per al càlcul de pèrdues energètiques de les diferents simulacions que s'han realitzat, no s'ha tingut en compte aquets tipus de despeses, doncs les simulacions realitzades només inclouen el funcionament de la planta durant el període d'un any natural.

7 Propostes de disseny i millora

Després d'haver analitzat els diferents paràmetres que afecten al funcionament d'una planta fotovoltaica i estudiat les diferents pèrdues que fan disminuir la potència obtinguda per l'estació, es proposaran diferents models per a l'eina de disseny, basats principalment en realitzar correccions als models predeterminats, modificar diferents distribucions per els elements de la planta o, inclús, canviar les corbes de funcionament del sistema.

La recerca de nous models que puguin descriure de la manera més aproximada possible el funcionament real de la instal·lació té com a objectiu principal el de millorar l'eina de disseny, intentant trobar una relació òptima entre el temps utilitzat per a realitzar els càlculs i l'error comès al llarg de les diferents idealitzacions que es proposen.

Per a un millor anàlisi dels diferents models que es proposen a continuació, s'han realitzat *scripts* que permeten simular el funcionament d'un *tracker* fotovoltaic sotmès a determinades situacions de temperatura i irradiació durant cada hora de sol del primer mes de l'any.

Els *scripts* dissenyats basen el seu funcionament en reproduir per mitjà de les equacions característiques de cada model, les situacions de treball d'una *array* o *tracker* fotovoltaic. Per a representar les distribucions de irradiacions i ombres que es produeixen a cada hora determinada del *tracker* s'utilitza el vector de matrius *GDATA.mat*, conjunt de matrius 27x20 on cada element de les quals representa la irradiació que disposa cada mòdul a una hora i dia determinats.

7.1 Model one-diode : referència

El primer model analitzat i programat per l'eina de disseny basa el seu funcionament en el model one-diode descrit en capítols anteriors. Per a representar el comportament de la planta utilitzant dit model s'ha dissenyat l'script *ShadowsData1.m*, el qual, a través d'unes variables d'entrada determinades per el fabricant, calcula les diferents corbes característiques del circuit fotovoltaic. Les equacions que determinen les corbes resultants de l'script corresponen al model one-diode exposat anteriorment.

Els punts de funcionament utilitzat aquest model s'ha obtingut mitjançant el disseny de l'script *puntFuncionamentIData.m*, el qual troba el punt (V,I) en el qual es produeix la potència màxima per a una situació (dia i hora) determinada.

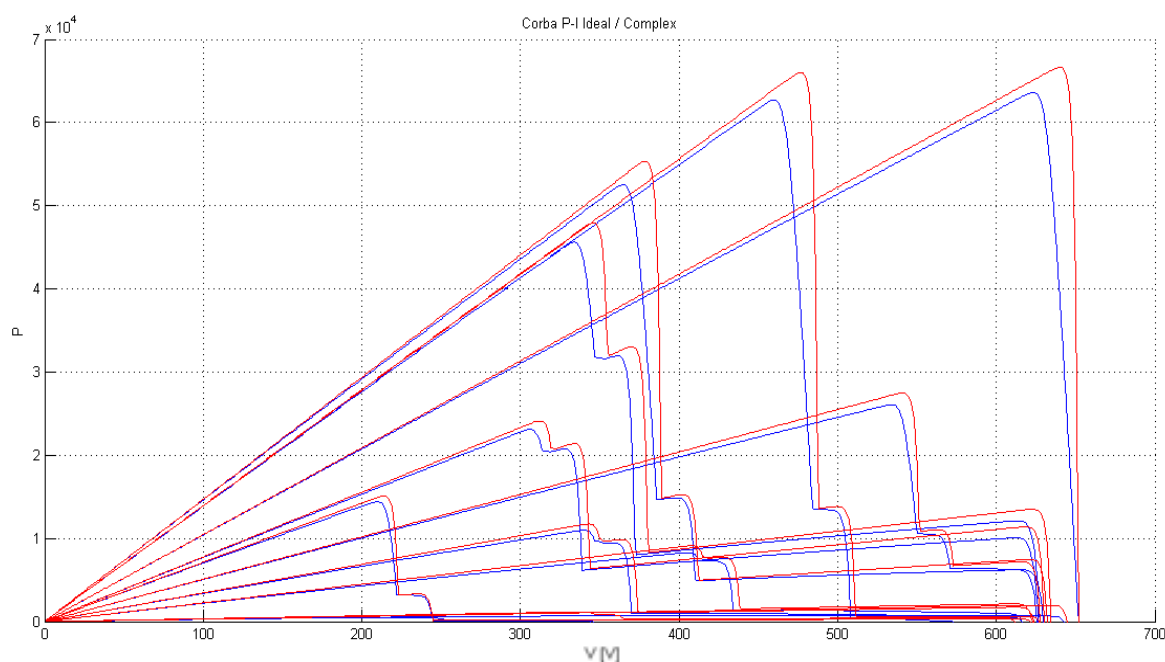
Com ja s'ha esmentat, el fet que l'equació del model d'un díode que relaciona la intensitat de sortida amb el potencial del circuit sigui una funció implícita, fa que s'hagi de definir un pas de voltatge concret per a la seva resolució. Com a *outputs* o variables de sortida de l'script es defineixen dues matrius de vectors, corresponents als punts de intensitat i potencial que representen la corba característica V-I per a cada hora i dia de simulació.

El fet que el model analitzat s'apropi al funcionament real de la instal·lació, fa que les corbes obtingudes amb el model detallat, s'utilitzin de referència per a comparar les corbes característiques que generen els models proposat a continuació.

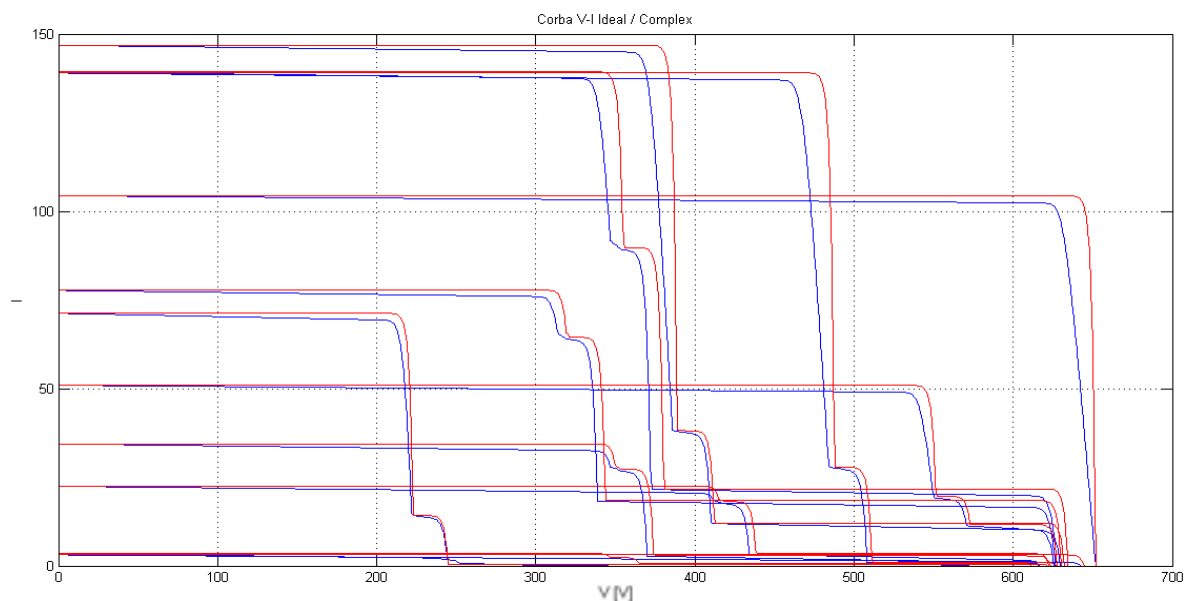
7.2 Primera proposta: model ideal

Amb l'script creat *ShadowsData1.m*, s'ha creat un altre script amb la mateixa estructura, **ShadowsDataIdeal1.m**, que simula les mateixes distribucions de plantes, en les mateixes situacions, però utilitzant el model ideal. Dit model, com ja s'ha descrit en capítols anteriors, serà representat mitjançant les equacions característiques del model ja esmentades.

Els gràfics adjunts representen les corbes V-I i P-V ideals i del model one-diode generades per la planta el primer dia de l'any. S'observa que el model ideal disposa de punts de funcionament sempre superiors al model d'un sol díode.



Gràfica 15 Corbes P-V per a un dia en model one-díode i ideal



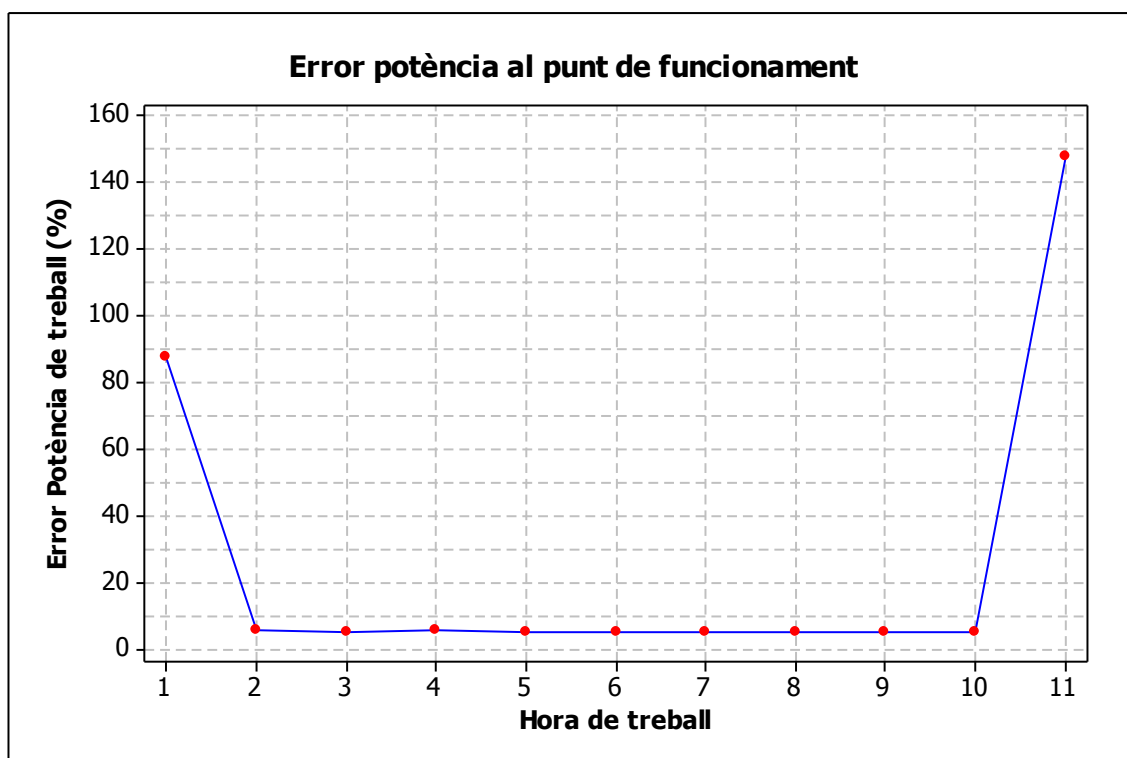
Gràfica 16 Corbes V-I per a un dia en model one-diode i ideal

El que es pretén estudiar és la comparativa entre models, buscar si les diferències entre punts de funcionament de cada corba són significatives i analitzar les dependències de l'error creat entre models amb diferents variables de la simulació.

Per tal de quantificar la diferència entre models, s'ha dissenyat un *script* anomenat *puntFuncionamentIdeal.m* que calcula els punts de funcionament de la simulació per als diferents models, els compara i calcula l'error generat per a cada dia i hora simulada.

Inicialment, a mode de determinar la raó de l'error que es produeix als punts de treball, s'ha realitzat una simulació per al primer mes de l'any (cada hora de treball per els 31 dies de simulació).

Per a calcular l'error mitjà produït entre models, no s'han inclòs els punts de funcionament calculats a la primera i última hora de sol, on es produeixen irradiacions baixes. S'ha fet així ja que, com es pot comprovar en el gràfic següent, els punts calculats tenen valors tant baixos que petites diferències entre ells representen errors que falsegen la mitjana total de l'error (*veure annex B.1*).



Gràfica 16 Representació temporal de l'error percentual entre la potència del model one-diode i ideal

Així doncs, sense tenir en compte la primera i la última hora del dia, l'error mitjà generat entre ambdós models és del 5,37 %. Valor que no podem considerar significatiu fins que no s'analitzi la diferència de l'energia generada al llarg de tot un any natural.

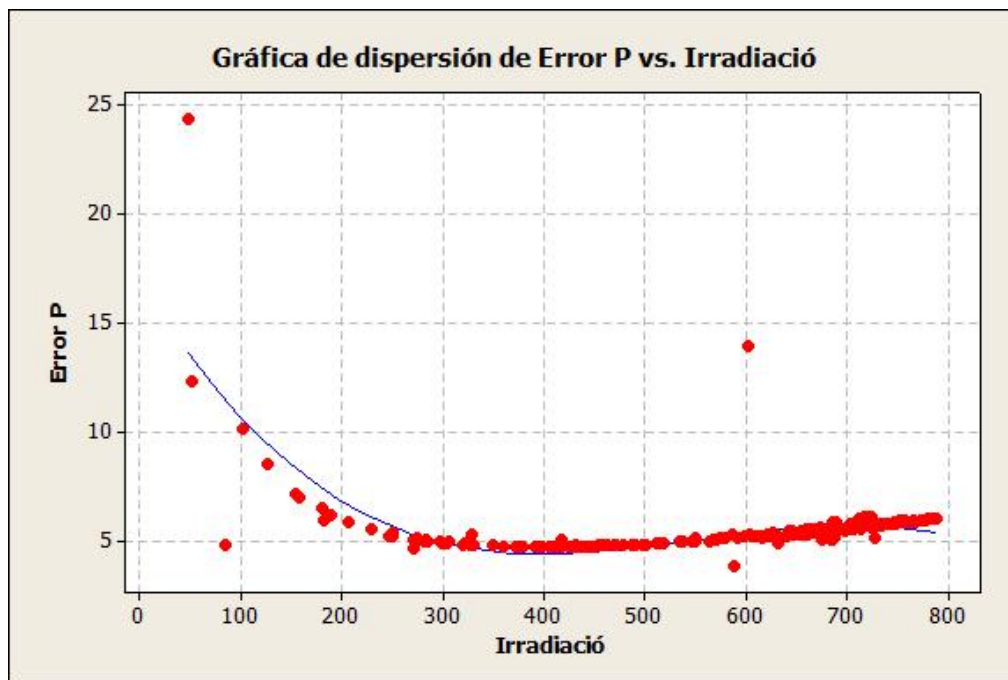
Dependència de la irradiació

Després d'analitzar l'error que es produeix entre models a les 3 variables del circuit (V,I,P), ja s'ha fet notar una certa dependència entre l'error i la irradiació solar.

Per a quantificar-la, s'ha realitzat un diagrama *bivariant*, obtenint la recta de regressió que es generaria. S'observa una dependència quadràtica d'ambdues variables que es tradueix a un augment de l'error quan la irradiació és petita.

Aquest fet pot fer preveure que, si l'error percentual màxim es troba quan la planta treballa a potències baixes, probablement l'error calculat d'energia generada total usant ambdós models presentarà un valor més baix que l'error mitjà entre potències.

Es decideix prescindir dels punts de funcionament calculats a les hores extrem del dia (quan surt i marxa el sol), situacions on les irradiacions són baixes i l'error generat es presenta alt.



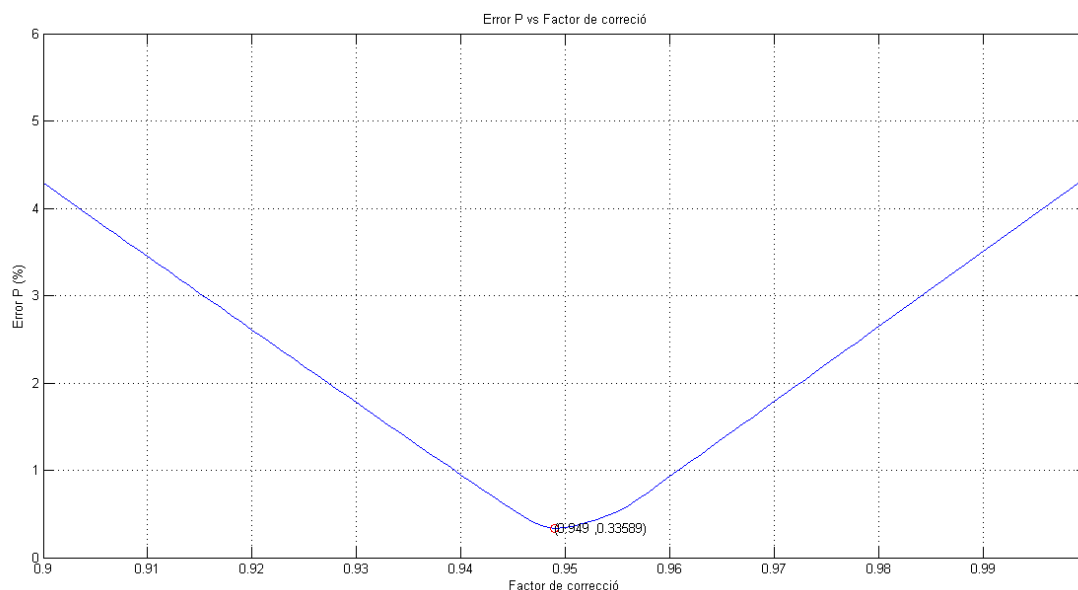
Gràfica 17 Dispersió entre l'error de la potència de funcionament entre el model ideal i one-diode amb la irradiació

Després d'observar que entre models es genera un error mitjà del voltant d'un 5%, i que la variabilitat d'aquest és baixa, s'ha creat l'*script puntfuncionamentDataCorrecio.m* a través del qual es calcula el punt de funcionament utilitzant el model ideal multiplicat per un factor corrector. El programa dissenyat troba el factor que minimitza l'error de potència entre el model ideal i el de referència. De manera que, al seu torn, es minimitza l'error entre les energies generades per a cada model. L'error percentual generat és la diferència percentual entre el model one-diode i l'ideal corregit, tal hi com es presenta a l'equació següent.

$$Error(\%) = \frac{P_{funcionamentComplex} - P_{funcionamentIdeal} \cdot factorcorrector}{P_{funcionamentComplex}} \cdot 100$$

L'*script* que determina el factor corrector per el qual es presenta el mínim error entre models, basa el seu funcionament en el recorregut de l'equació anterior amb un pas per al factor corrector inclòs en un rang entre 0 i 1. Els *outputs* del programa és el valor del factor corrector trobat i el vector d'errors generats al llarg de la iteració.

D'aquest mode, es pot representar el comportament de l'error entre models a cada pas del factor corrector, tal hi com s'observa a la gràfica.



Gràfica 18 Relació entre l'error comès entre models i el factor corrector dissenyat.

El factor corrector per el qual es genera un error percentual mínim de 0.33589% és de 0,949. Amb el valor calculat s'han obtingut l'energia i l'error corregit en una simulació a 31 dies. (Veure a l'annex, taula B.2).

Utilitzant el factor corrector al punt de funcionament ideal, es redueix l'error al voltant d'un 5%. El valor de l'energia corregida que es genera oscil·la al voltant de l'energia real generada (menor o major depenent dels dies), cosa que fa que l'error al llarg de la simulació sigui quasi nul.

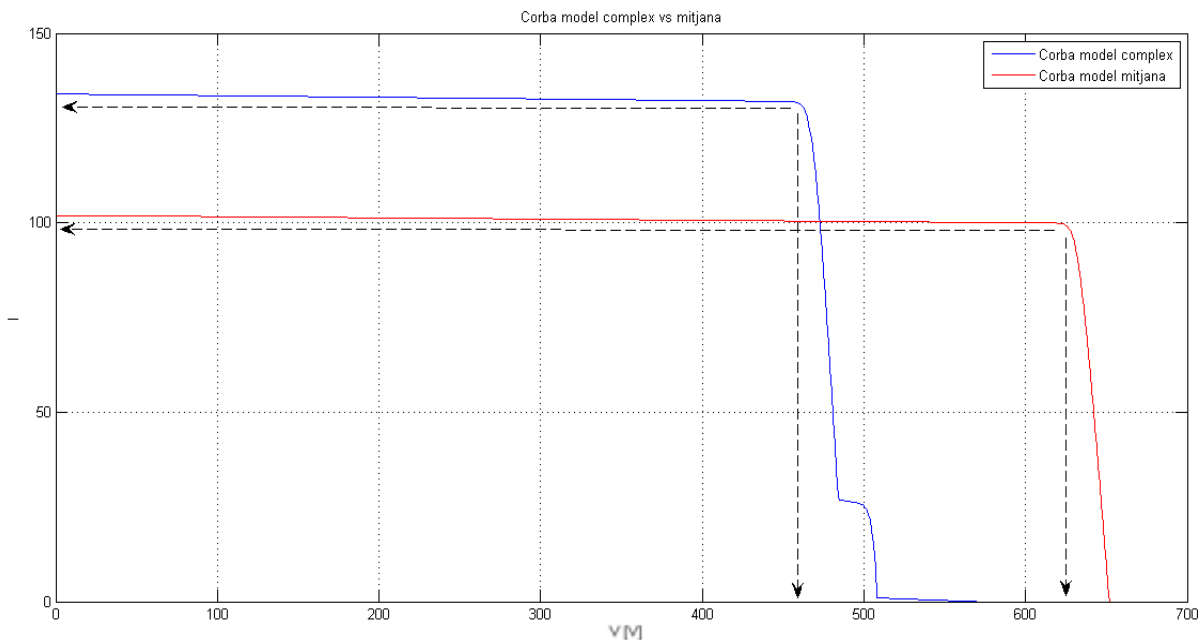
7.3 Segona proposta: model mitjana

El càlcul del punt de funcionament de la planta amb efecte de *shading* obliga a dividir la planta per grups d'*strings*, calcular la corba de cada grup *i*, al seu torn, calcular la corba que genera cada tipus de irradiació dins un determinat grup. El fet que les corbes V-I i P-V obtingudes a partir d'una planta amb ombres vinguin donades com a un subconjunt de corbes superposades, obliga a iterar molts punts per a formar la corba total. El resultat d'aquest fet es tradueix en temps elevats de còmput per part de la eina de disseny.

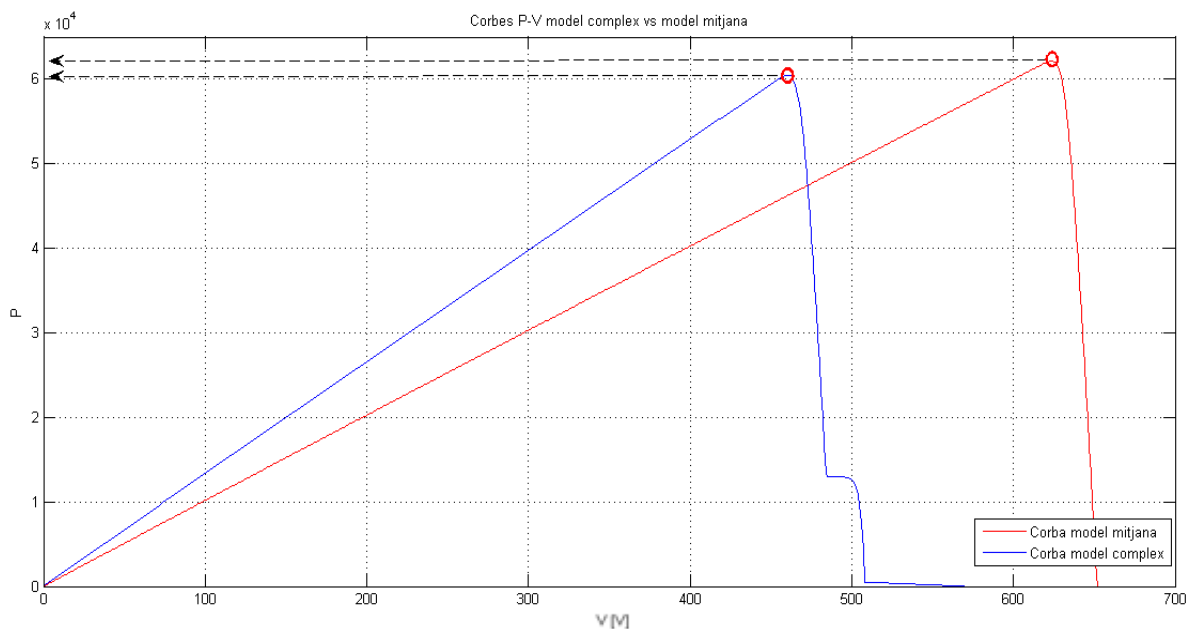
Per a reduir el temps de còmput a l'hora de trobar el punt de treball d'una corba, s'ha analitzat el comportament de la corba obtinguda com a resultat d'aplicar a la planta una irradiació solar mitja, resultat de la mitjana del total de la planta amb efecte *shading*.

$$G_{mitja} = \frac{\sum_{y=0}^{Np} \sum_{i=0}^{Ns} G_{i,y}}{Np \cdot Ns}$$

Simplificant la corba d'efecte *shading* per la corba mitjana obtinguda amb una irradiació mitjana, tal hi com es veu a les gràfiques següents, es canvien totalment tots els punts de la corba, no obstant, es pot obtenir un punt de treball semblant per a ambdues gràfiques calculades. Es tracta doncs, de trobar un model que ajusti tant sols el punt de funcionament, sense tenir en compte els punts restants.



Gràfica 19 Corbes V-I del model one-diode i el model mitjana



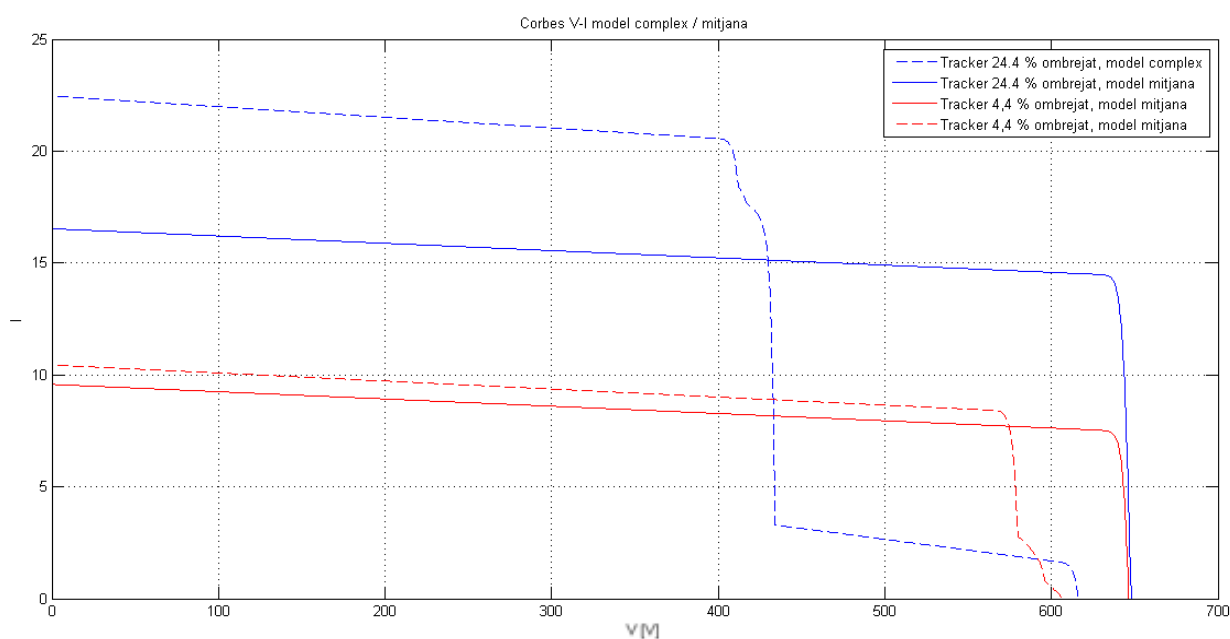
Gràfica 20 Corbes P-V del model one-diode i el model mitjana

A les corbes anteriors, s'observa que la potència entre punts de funcionament, pot ser semblant per a ambdós models, tal hi com passa a la situació representada. No obstant, tal hi com veurem

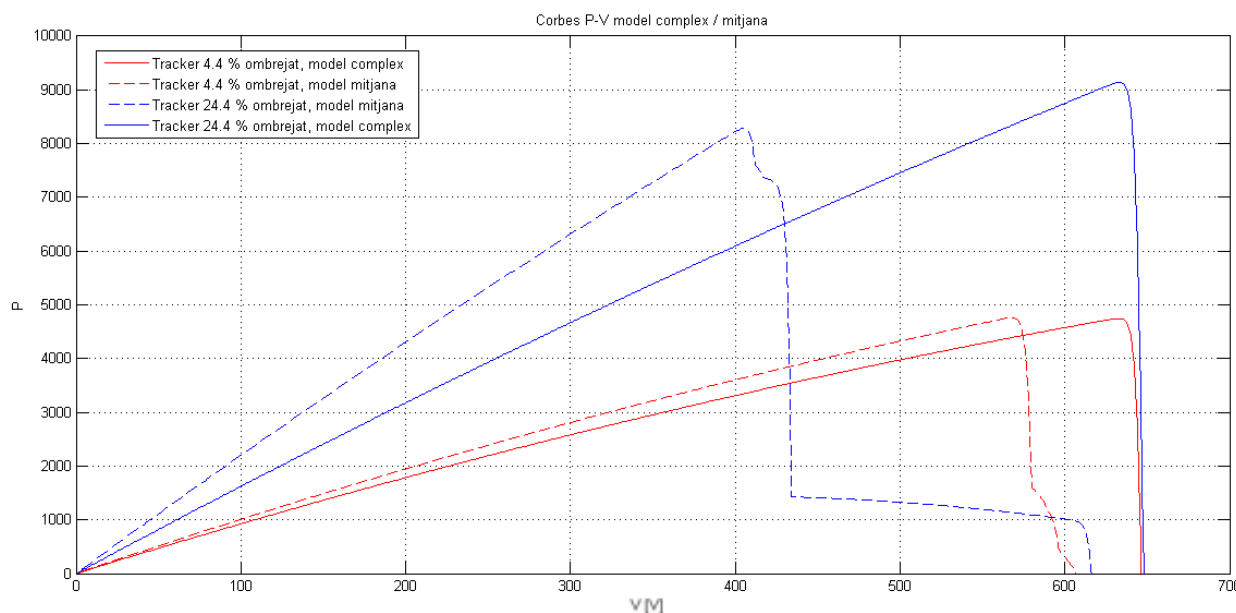
a mesura que s'analitzi el model simulat a un any, l'error creat entre els punts de treball dependrà de l'efecte de *shading* que actua al *tracker*.

Per a tenir un concepte de l'error que es pot crear al llarg de la simulació a un any, s'ha simulat el mes de gener, on l'efecte de *shading* és més rellevant. L'error mitjà per al mes de simulació és d'aproximadament un 11,6%. Error relativament gran si es compara amb la resta d'error obtinguts de les simulacions anteriors. (Veure a l'annex la taula de resultats d'error, taula C.1).

A mode de reduir l'error comès entre models, s'ha analitzat la diferència entre ambdós al llarg de l'any. Tal hi com es pot observar a la figura següent, per a un augment del percentatge d'ombra als *trackers*, les corbes generades entre ambdós models es van apropant, de manera que per a un *tracker* totalment assolellat es disposa del mateix tipus de corba amb ambdós models.



Gràfica 21 Corbes V-I del model one-diode i mitjana per a diferents distribucions d'ombra



Gràfica 22 Corbes P-V del model one-diode i mitjana per a diferents distribucions d'ombra

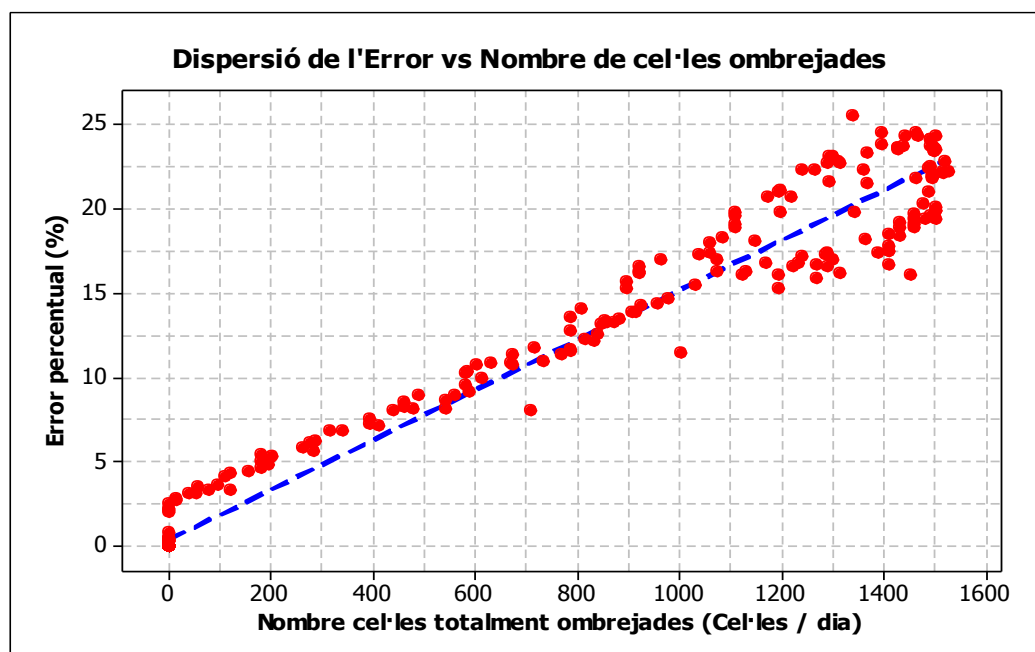
A la corba P-V és on es veu clarament la diferència de potència als punts de funcionament per a ambdós percentatges d'ombra. Per al tracker amb el 4,4% de zona totalment ombrejada, es genera un error entre potències del 0,3%, mentra que per a la distribució amb el percentatge d'ombra major (24,4%), l'error comès augmenta fins al 10,3%. Aquest fet fa denotar una certa dependència entre l'error que es comet amb el model de la mitjana i el nombre de mòduls ombrejats per *tracker*.

Per a veure si realment existeix una dependència entre les variables esmentades, s'ha realitzat un estudi de dispersió. L'estudi s'ha realitzat amb cada punt de funcionament del tracker a cada hora dels 365 dies de l'any.

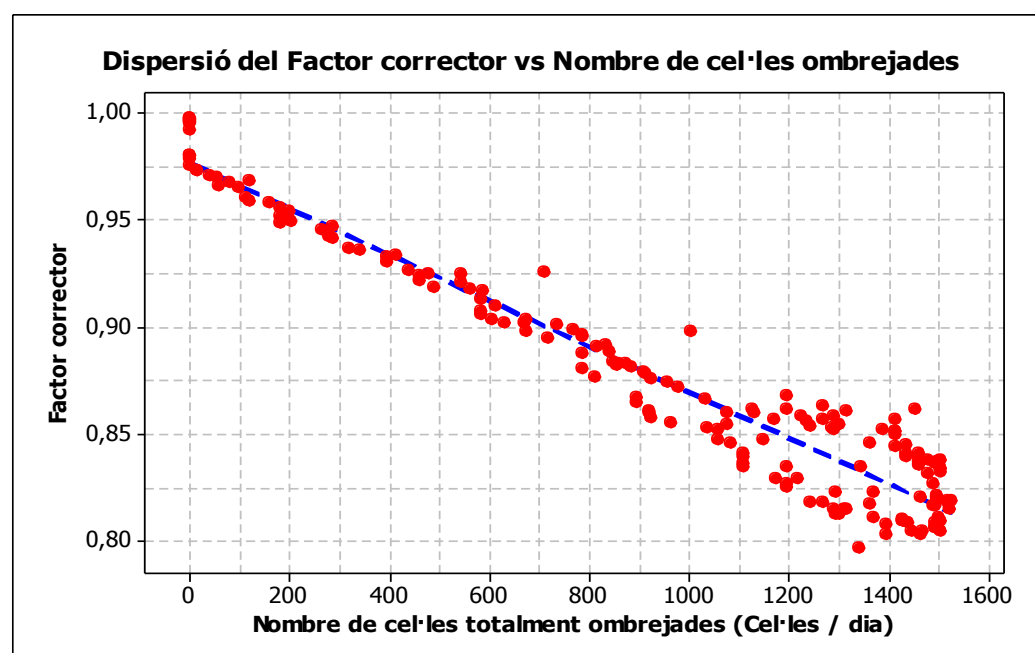
Una vegada haver afirmat la forta dependència, ja lineal, de les variables d'estudi, a través de l'error percentual que es genera entre models, s'ha definit un factor corrector usant la equació següent:

$$F_{corr,i} = \frac{P_{mitjana,i}}{P_{complex,i}}, \text{ on } i = 1 \dots 365$$

Mitjançant aquest factor, es permet corregir la potència calculada amb el model de la mitjana a qualsevol dia de la simulació. A més, el fet que el factor corrector estigui íntimament lligat amb l'error percentual, fa que també es pugui relacionar amb el nombre de cel·les ombrejades del *tracker*.



Gràfica 23 Dispersió de l'error comès entre el model mitjana i el one-diode amb el nombre de cel·les ombrejades



Gràfica 24 Dispersió del factor corrector dissenyat amb el nombre de cel·les ombrejades

Finalment, de la relació trobada entre el factor corrector calculat i el nombre de cel·les totalment ombrejades al *tracker*, s'ha trobat l'equació de regressió, la qual permet relacionar ambdues variables linealment.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Si } N_{cel,ombrejades} \neq 0 & \rightarrow F_{corr,i} = 0,9765 - 0,000107 \cdot N_{cel,ombrejades} \\ \text{Si } N_{cel,ombrejades} = 0 & \rightarrow F_{corr,i} = 1 \end{array} \right\}$$

On $F_{corr,i}$ és el factor corrector (en tant per 1) i $N_{cel,ombrejades}$ és la suma de cel·les totalment ombrejades que es generen a un *tracker* durant totes les hora d'un dia determinat.

7.4 Tercera proposta: Model de zones de transició

Les zones creades dintre del *tracker* no es presenten de forma nítida, sinó que existeix una atenuació de l'efecte de *shading* dintre dels mòduls ombrejats a mesura que es van apropant a les zones assolades. Així doncs, depenent de la distribució de l'ombra dintre de cada *tracker*, es creen diferents zones de transició, que poden afectar d'una o altra manera a les corbes V-I i P-V resultants. Com a resultat, per una banda s'obtenen corbes més complexes, properes al model experimental, però d'altra banda s'obliga a la eina de càlcul de corbes a realitzar més iteracions, cosa que afecta notablement al temps de còmput emprat per l'eina de disseny.

Mitjançant l'estudi de les diferents distribucions que es poden crear al llarg de una simulació a tot l'any, es pretén avaluar la influència que tenen aquestes zones de transició a la corba total del *tracker* i, finalment, analitzar si aquestes zones es poden simplificar amb l'objectiu de trobar un model que redueixi el nombre de iteracions a realitzar per l'eina de disseny. Per a realitzar la simulació s'ha creat l'*script canvidistribucio.m*, el qual modifica les matrius *GDATA.mat* depenent del canvi de distribució a simular. La simulació s'ha realitzat per al mes de gener, on l'efecte *shading* és més significatiu i on és podran apreciar les màximes diferències amb el model one-diode.

7.4.1 Anàlisi de l'string de transició

L'*string* de transició es troba format per un conjunt de mòduls amb irradiacions diferents. En el model estudiat, disposa de 3 tipus d'irradiacions, el que suposa una corba característica formada per 3 subcorbes diferents.

Quan la distribució total del *tracker* presenta 3 (o 2) conjunts d'*strings* diferents, l'string de transició assenyalat només disposa d'una fila de mòduls en paral·lel. Com a màxim, aquesta fila disposa d'una irradiació igual a la solejada, amb

el mateix nombre de mòduls en sèrie que el conjunt d'*strings* corresponent a la zona totalment ombrejada. El fet que el conjunt assenyalat només disposi d'una columna de mòduls en paral·lel es tradueix a les corbes V-I i P-V en intensitats i potències baixes, i, com a conseqüència, la corba total generada no es veurà molt influenciada per l'efecte d'aquests tipus d'*strings* (excepte casos límit).

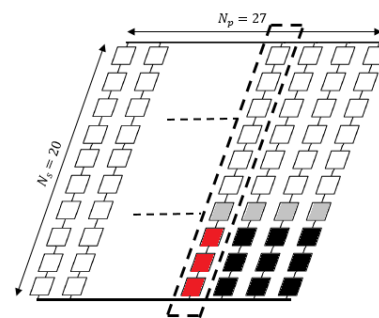
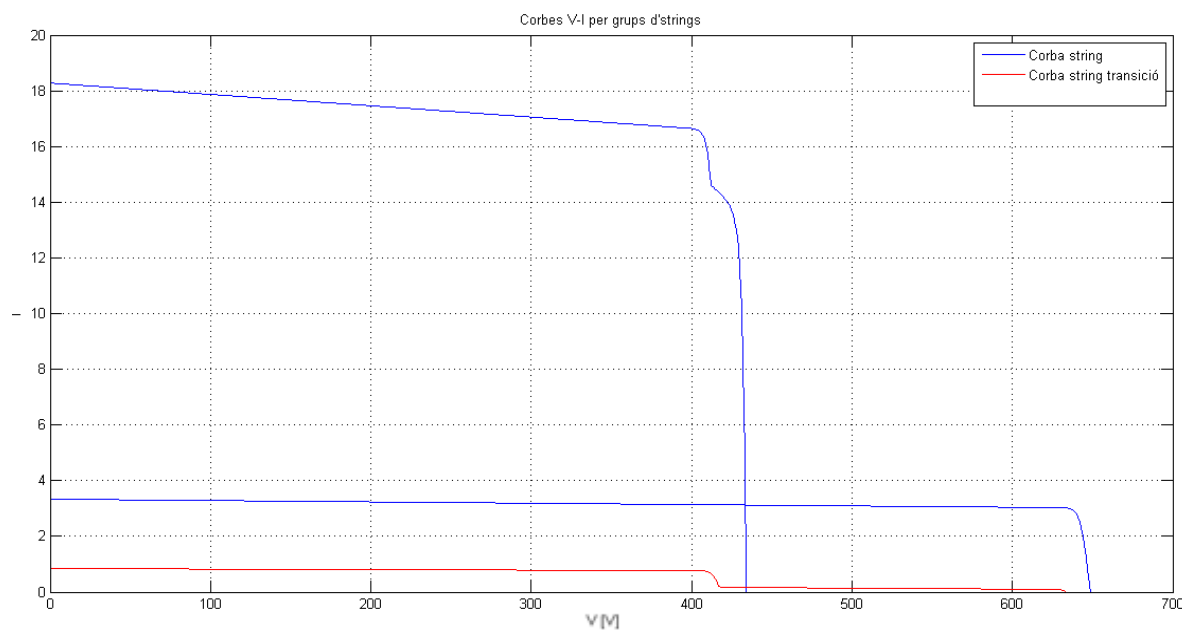
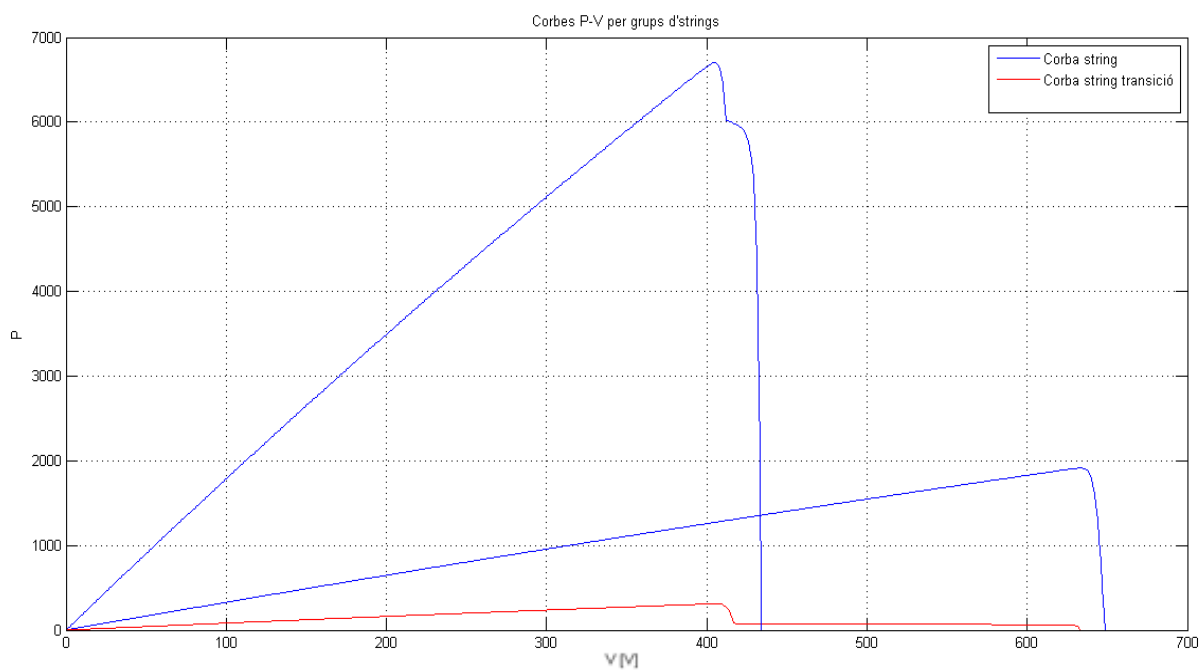


Figura 8 Distribució de les zones ombrejades assenyalant l'string de transició.



Gràfica 25 Corbes V-I dels diferents grups d'strings en una distribució d'ombra determinada.

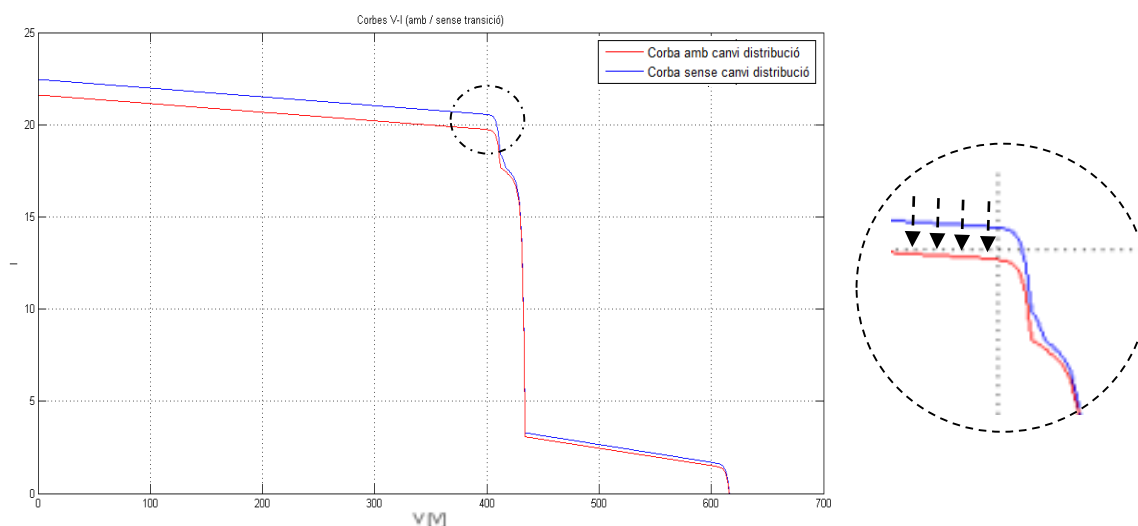


Gràfica 26 Corbes P-V dels diferents grups d'strings en una distribució d'ombra determinada

Les gràfiques anteriors representen les corbes generades per els diferents grups d'strings que conformen un mòdul, el dia 1 de gener a les 9h. En vermell es pot observar la corba V-I i P-V característica que genera l'*string* de transició. Com s'ha comentat, el rang de funcionament d'aquest *string* es troba a intensitats baixes (degut a una $N_p = 1$), la qual cosa es tradueix en potències baixes i, al seu torn, en una poca influència per part del grup de transició esmentat en la corba total del circuit.

7.4.1.1 Cas A. Eliminació de l'*string* de transició.

La primera proposta o cas de canvi de distribució de les zones ombrejades s'ha definit com a l'eliminació de l'*string* de transició. A la base de dades **GDATA.mat** s'ha substituït l'*string* de transició esmentat per a un *string* amb irradiació $G = 0 \text{ W/m}^2$ (equivalent a eliminar tota la fila corresponent a l'*string* del mòdul). El que es pretén analitzar, és el comportament de la planta si aquest *string* de transició no actua, evitant així el càlcul de iteracions potser innecessàries..



Gràfica 27 Efecte en la corba V-I per a l'eliminació de l'*string* de transició.

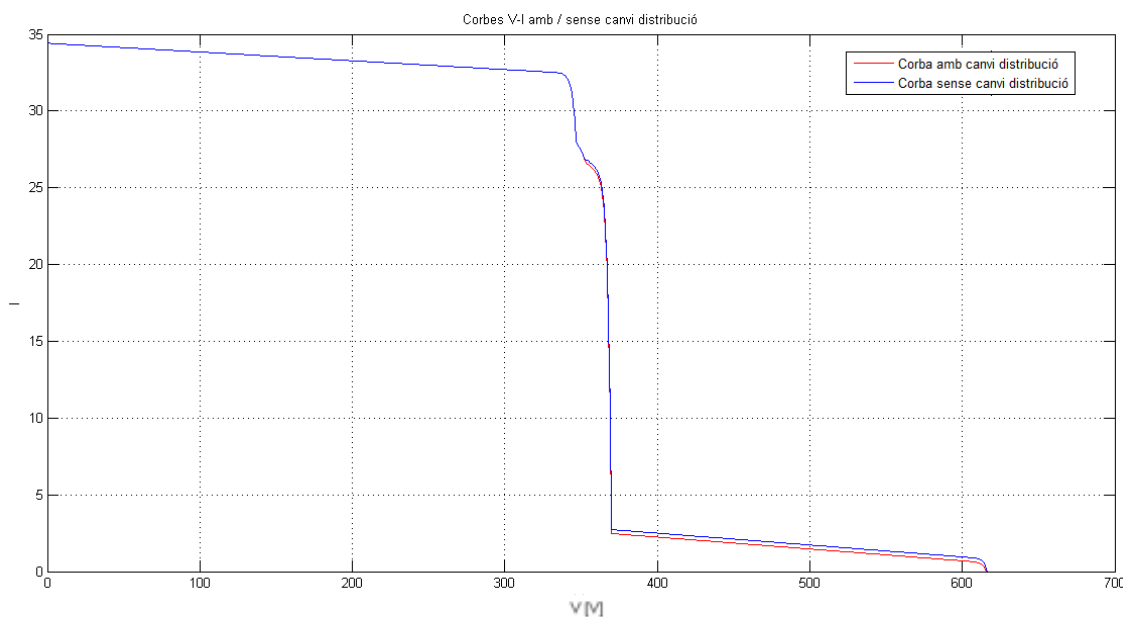
A la representació de les corbes totals generades amb i sense l'*string* de transició ja s'evidencia la poca influència sobre el punt de treball que té l'*string* estudiat sobre la corba total obtinguda. Es pot observar que la diferència recau principalment a la part de corba provinguda del conjunt d'*strings* assolellats. Més concretament, la corba total del *tracker* amb la distribució modificada (vermella), disposa d'intensitats més baixes a la primera zona de corba, doncs una cel·la en paral·lel s'ha eliminat. Pel que fa a la resta de la corba es manté més o menys invariant, ja que la influència de l'*string* de transició a zones amb voltatge alt és insignificant.

Finalment, cal esmentar que la influència de l'*string* de transició sobre la corba total depèn principalment dels valors de les irradiacions de transició, doncs per a irradiacions majors les intensitats arreu de la corba augmenten i, conseqüentment, s'augmenta la diferència entre distribucions, sobretot a la subcorba inicial.

7.4.1.2 Cas B. Definir les irradiacions de l'*string* de transició com a nul·les.

La segona proposat de canvi en la distribució de les zones ombrejades passa per a considerar les irradiacions de l'*string* de transicions com a nul·les. Es tracta de simular GDATA substituint els mòduls de transició de l'*string* per a una $G = 0 \text{ W/m}^2$. D'aquesta manera l'*string* de

transició estudiat passa a tenir dos tipus de irradiació: totalment ombrejada i totalment assolada. S'augmenta en una fila la zona totalment ombrejada.



Gràfica 28 Corba V-I amb / sense el canvi distribució proposat al cas B

En aquest cas, la corba generada per l'*string* de transició canvia. S'eliminen les dues corbes de l'*string* que naixen de les zones semi i ombrejades. La part de major potència de la corba de l'*string* es manté intacte, de manera que el canvi de distribució només afecta a zones de baixa potència allunyades del punt de funcionament. El motiu principal del canvi recau en que la subcorba generada per els mòduls amb irradiació de transició passen a no actuar, cosa que explica la reducció de intensitat en aquesta zona de la corba total del *tracker*.

7.4.2 Anàlisi de la fila de transició

La fila de transició es situa en la zona horitzontal de canvi entre la zona totalment assolada i la ombrejada. Dintre de la corba total del *tracker*, la fila analitzada representa una de les sub-corbes que conformen, a la vegada, la corba d'un *string* del mòdul. D'aquesta manera, amb la seva eliminació o simplificació s'evita el càlcul d'una corba per el conjunt total.

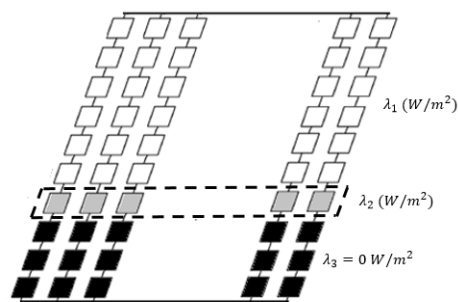
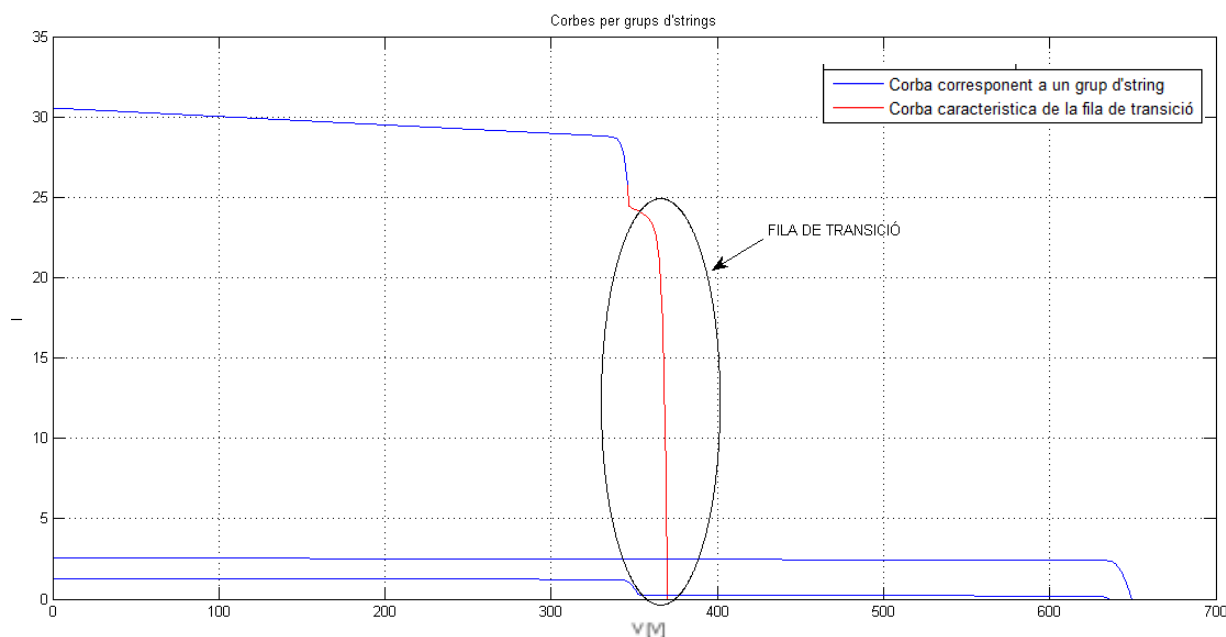
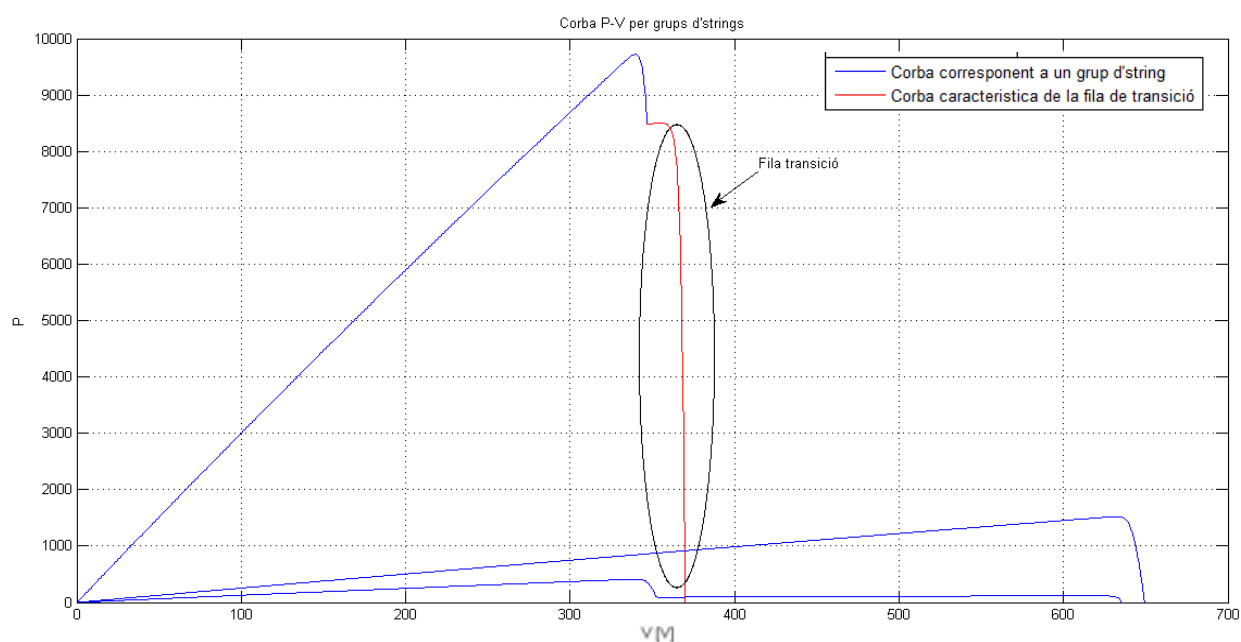


Figura 9 Distribució de zones ombrejades, amb la fila de transició assenyalada

A més, tal hi com observem a les figures posteriors, la fila de transició provoca fluctuacions de voltatge i intensitat dintre del conjunt l'*strings* en que es troba. No obstant, els canvis deguts a la corba analitzada no afecten, en la majoria d'ocasions, al punt de treball.



Gràfica 29 Corbes V-I per grups d'strings, amb fila de transició assenyalada.



Gràfica 30 Corbes P-V per grups d'strings, amb fila de transició assenyalada

En les gràfiques anteriors, es representa la corba que genera la fila de transició, analitzada dintre d'una de les corbes d'un dels conjunts d'strings. S'observa, com ja s'ha dit, que el punt de màxima potència no es veu afectat per la corba generada per la fila de transició, el que denota que modificacions en la fila de transició poden no afectar al punt de treball total de la planta.

7.4.2.1 Cas C. Canvi de valor de les irradiacions en la fila de transició

En el cas C, es simularà *GDATA.mat* eliminant les files de mòduls de transició, substituint-les per a valors d'irradiació igual a la irradiació de la zona assolellada o ombrejada, depenent de la diferència d'irradiació entre les 3 zones. Així, el grup d'*strings* on es troben les files de transició, passarà a tenir tant sols 2 tipus de irradiacions, doncs els mòduls tant sols es podran trobar totalment assolellats o ombrejats.

Es substituirà la fila de transició per a una fila amb radiació igual a la de la zona assolellada o ombrejada, depenent de si el valor de irradiació de la fila de transició es troba més proper a una o altra zona, fent servir els canvis exposats a continuació.

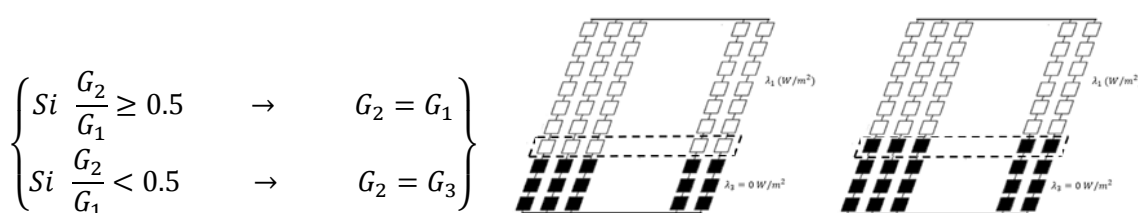
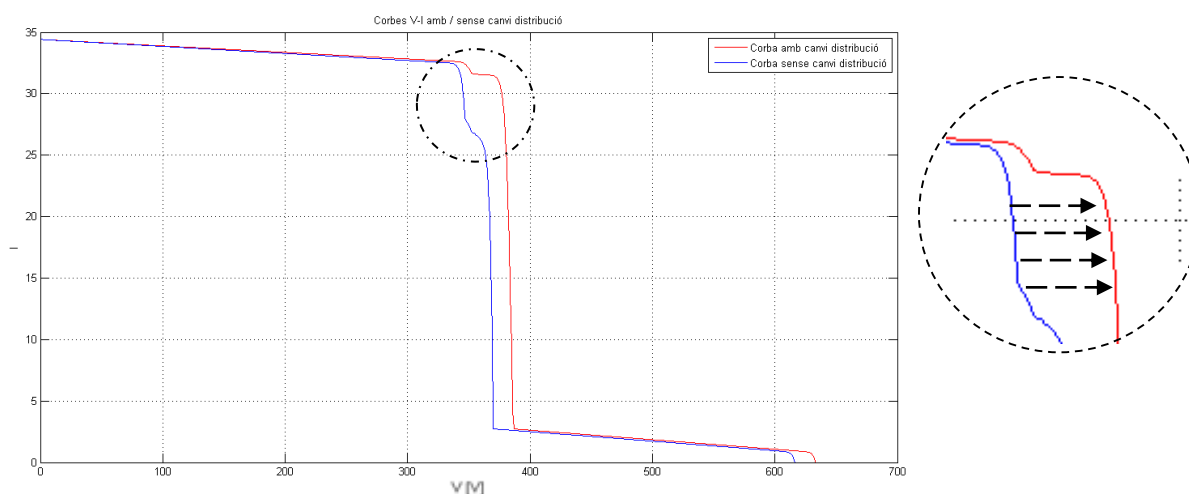


Figura 11 Canvi per a $\frac{G_2}{G_1} \geq 0.5$ Figura 10 Canvi per a $\frac{G_2}{G_1} < 0.5$

Amb aquest canvi s'aconsegueix modificar la corba del conjunt d'*strings* que s'analitza. Més concretament, si s'afegeix una fila ombrejada (d'irradiació nul·la), s'elimina la corba generada per la fila de transició (assenyalada al gràfic de la corba anterior); en canvi, si es substitueix per una fila d'irradiació màxima (assolellada), la corba que generen els mòduls assolellats augmenta en 1 el nombre de mòduls en sèrie, el que es tradueix a allargar la influència de la corba que generen els mòduls assolellats al llarg del eix del voltatge.



Gràfica 32 Efecte del canvi de distribució del cas C a les corbes V-I

A la figura anterior, es mostra la influència del canvi quan es substitueix la fila per a irradiacions iguals a la zona assolellada. S'observa que el punt de funcionament augmenta, ja que s'incrementa el voltatge al punt de màxima potència degut a l'augment de la N_s en una unitat. En determinades situacions, el punt de funcionament es pot trobar a la corba generada per la fila de transició, el que pot induir a errors elevats, doncs s'està modificant directament aquesta corba. No obstant, la majoria de punts de funcionament es troben a la corba formada per els mòduls assolellats (amb major irradiació), el que fa que, al llarg de la simulació, els errors siguin petits.

7.4.2.2 Cas D. Eliminació de la fila de transició

A continuació, es simula GDATA substituint la fila de transició per una fila amb $G = 0 \text{ W/m}^2$ a cada mòdul, independentment del valor de irradiació que tingui la fila de transició. D'aquesta manera, s'aconsegueix augmentar la zona totalment ombrejada en una fila.

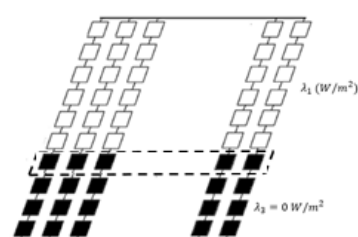
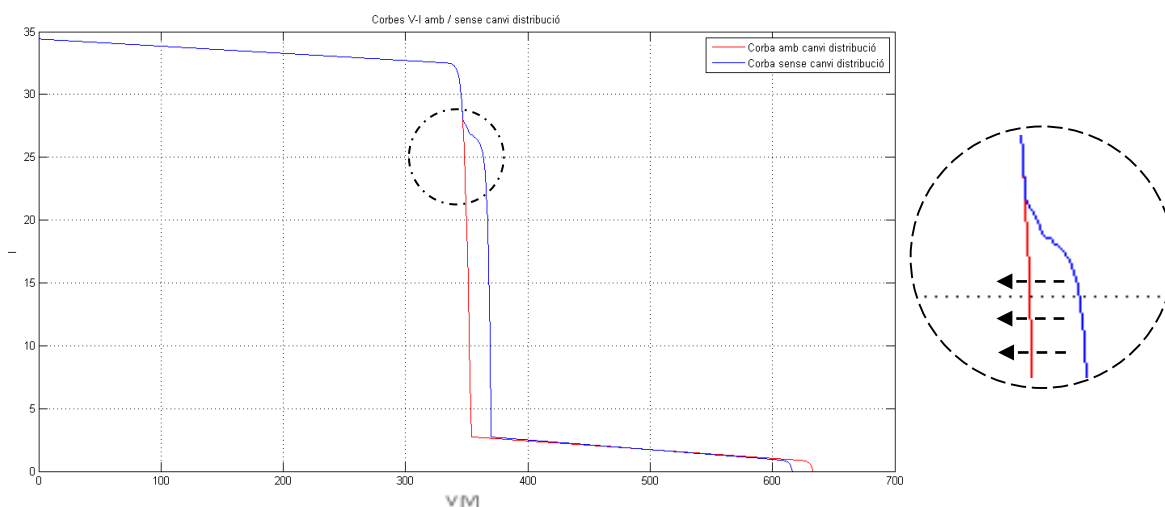


Figura 12 Distribució de zones ombrejades, amb fila de transició assenyjada.

Tal hi com es pot observar en la gràfica següent, la corba que genera la fila de transició desapareix. No obstant, el punt de funcionament només es veu afectat en situacions on la diferència entre la irradiació de la zona de transició i la assolellada és baixa. Generalment només a la última hora del dia.

Aquest fet es deu a que quan les irradiacions són baixes, les irradiacions entre les zones de transició i la zona assolellada tenen valors més propers entre elles, cosa que implica que a punts del dia com la hora 11 de funcionament (quan marxa el sol), la diferència entre la zona de transició i la assolellada sigui petita. Depenent d'aquesta diferència, si es suprimeix la fila de transició, pot canviar el punt de funcionament d'una corba a altra.

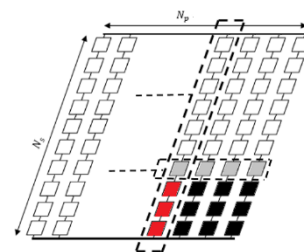


Gràfica 33 Efecte del canvi de distribució del cas D en la corba V-I

Es veu clarament com la modificació en la distribució de irradiacions no afecta el punt de funcionament (en la majoria dels casos). La corba resultant es simplifica degut a la eliminació de la corba que genera la fila de transició. Finalment, com a detall no significatiu per al càlcul total de potència, cal observar que el voltatge al punt de curtcircuit ($I=0$) augmenta.

7.4.3 Anàlisi de la fila i l'*string* de transició conjuntament

Després d'haver analitzat el comportament de les corbes característiques del *tracker* al canviar per separat la seva distribució de irradiacions tant a files com a *strings*, es pot determinar que es poden realitzar canvis de distribucions sense que el punt de funcionament es vegi directament afectat.

Figura 13 Distribució de les zones ombrejades, assenyalant la fila i l'*string* de transició.

No obstant, els canvis que es poden realitzar només modificant un dels dos elements de transició, tant sols estalvien el càlcul de una de les corbes dintre del conjunt total, el que redueix el temps de còmput però no de manera significativa.

D'aquesta manera, a aquest apartat s'analitzarà la reacció de les corbes característiques del *tracker* quan es realitzen modificacions als dos elements de transició a l'hora, amb l'objectiu de estalviar el nombre màxim de corbes a calcular per part de l'eina de disseny.

7.4.3.1 Cas A+D. Canvidistribucio111.m

Es simula GDATA eliminant l'*string* de transició per complet i substituint la fila de transició per a una fila amb $G = 0 \text{ W/m}^2$ a cada mòdul. D'aquesta manera, com es pot veure a la figura, s'augmenta la zona totalment ombrejada en una fila, eliminant les zones de transició. Amb el canvi següent es pretén reduir el nombre de corbes que naixen per l'efecte de *shading*.

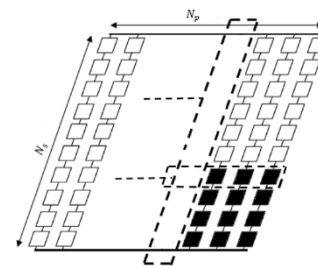
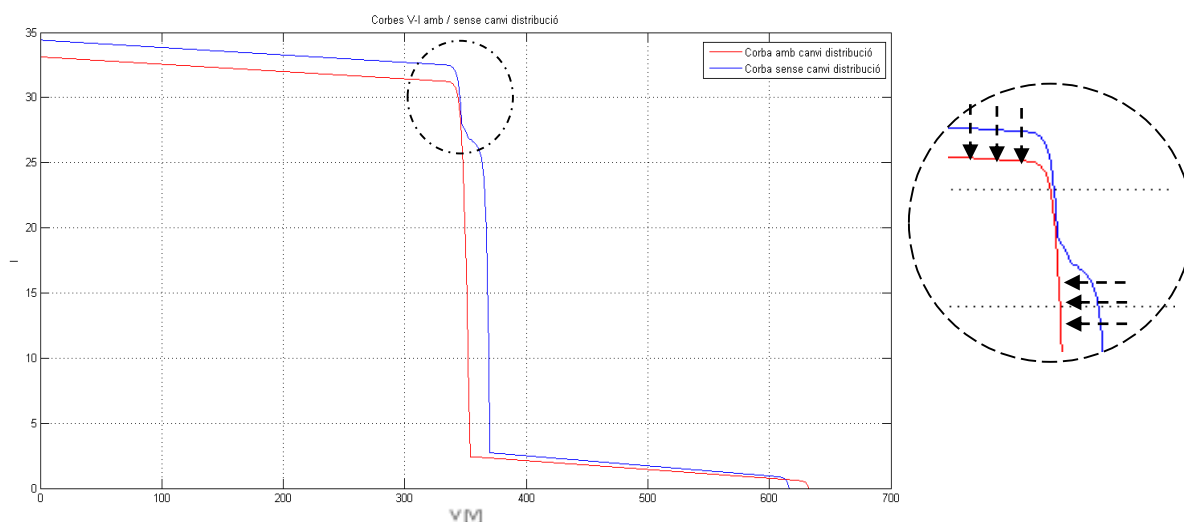


Figura 14 Distribució de les zones ombrejades, eliminant l'*string* de transició.

Com es pot observar en el gràfic següent, l'efecte que tenen les modificacions al punt de funcionament és semblant al cas A: l'eliminació per complet de l'*string*, fa reduir la N_p associada als mòduls assolellats, el que es tradueix a una reducció de la intensitat a la corba generada per aquest conjunt de mòduls. A més, l'eliminació de la fila, fa que la corba generada no disposi de la subcorba generada per aquesta.



Gràfica 34 Efecte dels canvis de distribució A+D en les corbes V-I

Com a resultat, es genera una corba més simple, es redueixen les iteracions per efecte de *shading* i l'error al punt de funcionament es manté semblant al cas A en la majoria de situacions de treball, excepte en els casos en que el punt de màxima potència pugui estar a la corba generada per la fila de distribució, situació explicada al cas D.

7.4.3.2 CAS B+D Canvidistribucio1111.m

En aquest cas, es simularà GDATA substituint les λ 's de transició per a una $G = 0 \text{ W/m}^2$ tant a la fila com a l'*string* de transició. Tal hi com es veu a la figura, d'aquesta manera s'aconsegueix augmentar la zona totalment ombrejada en una fila i una columna.

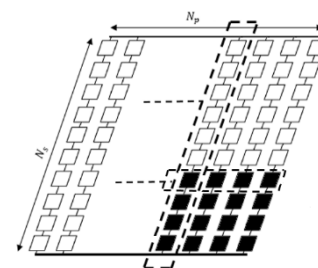
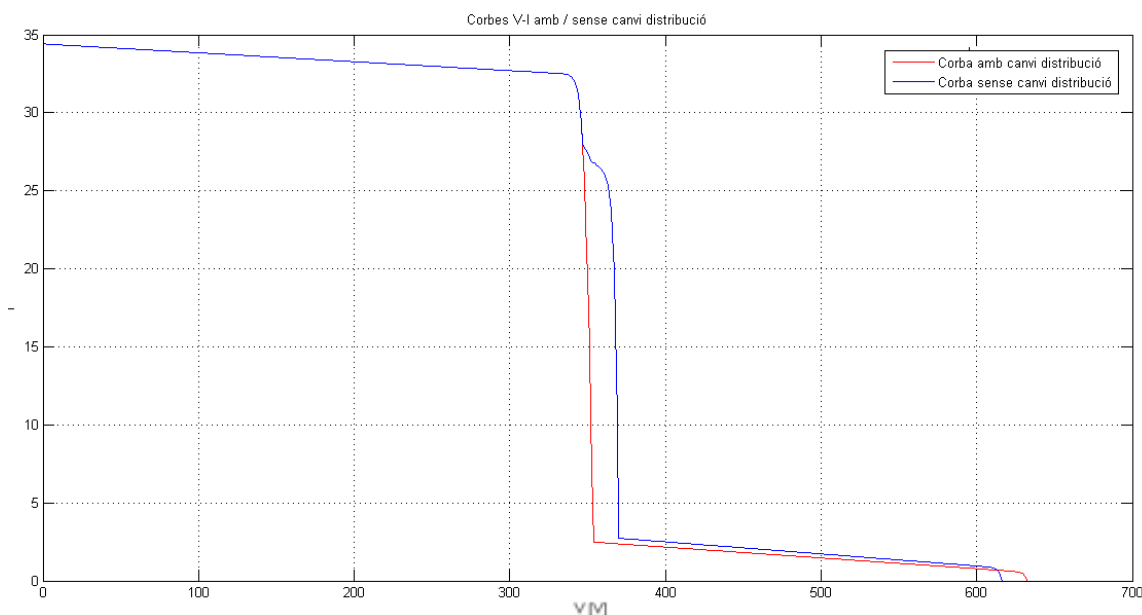


Figura 15 Distribució de les zones ombrejades, aplicant els canvis del cas B+D

Per una banda, com s'observa en el gràfic següent, la principal variació de la corba ve donada a causa de substitució de la fila de transició per a mòduls totalment ombrejats. D'altra banda, el fet que el cas B (substitució de l'*string* de transició) només faci variar la corba a zones de baixa potència, fa que l'error creat per el cas B+D s'assembli pràcticament al cas D.



Gràfica 35 Efecte dels canvis de distribució B+D en les corbes V-I

La diferència principal entre corbes que genera el canvi de distribució ve donat a causa de la eliminació de la fila de transició del mòdul. A gairebé totes les hores del dia els punts de treball coincideixen, doncs la corba de major potència es manté invariant (excepte casos límit exposats al cas D).

7.4.4 Simulació model distribucions

Després d'haver realitzat modificacions en la distribució de les zones ombrejades a dintre del *tracker* i haver analitzat l'efecte dels canvis a les corbes característiques del circuit fotovoltaic, s'analitzaran els resultats obtinguts a la simulació de les diferents distribucions dissenyades amb el fi de fer una comparativa entre els diferents models, així com analitzar l'error comès i el temps de còmput emprat per l'eina de disseny.

A la taula de continuació, es pot observar l'energia total calculada durant les diferents simulacions, així com l'error comès tant per a les variables del circuit (V,I,P), com per l'energia total generada. A més, s'hi inclou el temps de còmput emprat per l'eina a l'hora de fer el càlcul de la simulació.

	CAS A	CAS B	CAS C	CAS D	CAS A+D	CAS B+D
ERROR I (%)	3,27%	0,08%	1,022%	0,221%	3,487%	0,289%
ERROR V (%)	0,007%	8,833e-004 %	4,242%	0.639 %	0,639%	0,640%
ERROR P (%)	3,269%	0.0785 %	2,938%	0,224%	3,417%	0,303%
ERROR ENERGIA (%)	3,329%	0,0029%	2,636%	0,0008%	3,288%	0,0039%
ENERGIA GENERADA (Wh)	14439349	14940957,7	15332722	14940726,24	14439450,82	14941073,96
TEMPS COMPUT (min)	25.416	22.7817	24.779	24.327	23.212	19.417

Taula 1 Comparació entre els diferents canvis de distribució.

S'observa que com a regla general els errors obtinguts entre el model one-diode i els models amb les distribucions dissenyades són baixos arreu de totes les simulacions.

Per una banda, tal hi com s'havia previst, el errors entre el cas D i el cas B+D són gairebé insignificants. Això és així ja que en poques situacions determinades, el punt de funcionament es troba sobre la corba que es modifica. D'altra banda, en els models del cas A i el cas A+D és allà on es generen els errors màxims, degut a l'eliminació però complet de l'*string* de transició, el que afecta al punt de funcionament de manera directe sempre que es genera efecte de *shading*.

Per a la simulació de l'apartat posterior, s'escollirà com a una proposta de model a simular el cas B+D, ja que, tot hi no experimentar els errors més petits, es tracta de la distribució que disposa de la relació entre error comès i temps de còmput emprat més òptima.

8 Simulació planta PV d'aproximadament 1MW

Una vegada haver dissenyat diferents tipus de models que redueixen el temps de càlcul per a l'eina de disseny, es realitzarà una simulació a una any d'una planta fotovoltaica completa. L'objectiu de la simulació és el de analitzar el comportament dels diferents models dissenyats des de que es genera l'energia fins que s'arriba al punt de connexió a xarxa. A més, es podrà comprovar com respon cada model proposat quan es tenen en compte un conjunt de pèrdues energètiques, com poden ser el cablejat, la eficiència de l'inversor... (ja exposades en capítols anteriors).

Es realitzarà la simulació d'una planta PV de 3x3 *trackers*, formats cada un d'ells per 20x27 mòduls fotovoltaics, que a l'hora es troben formats per 1x54 PV *cells*.

8.1 Descripció de la planta fotovoltaica simulada

8.1.1 Esquema del tracker solar

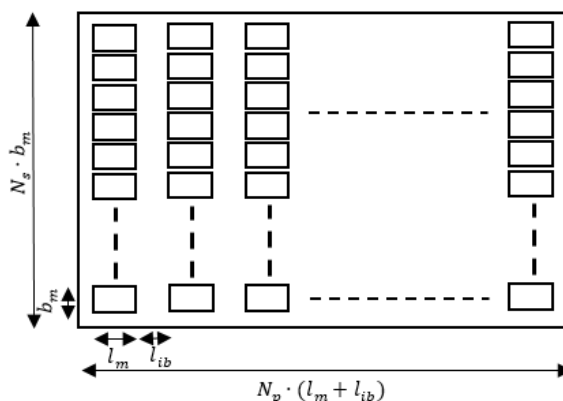


Figura 15 Esquema acotat del tracker solar.

La superfície de cada mòdul és de $b_m \cdot l_m$, on el gruix b_m és 1m, mentre que la longitud del mòdul l_m és de 1,6m. En les separacions horitzontals entre mòduls existeix una *inactive band* l_{ib} de 1,4m, espai de separació entre mòduls que no genera energia.

La longitud total del *tracker* és calculada com $N_p \cdot (l_m + l_{ib})$, per el que si definim una $N_p = 27$ mòduls, la longitud del conjunt de mòduls és de 81m. D'altra banda, el gruix es troba definit com $N_s \cdot b_m$ (no existeix banda inactiva en la direcció vertical del *tracker*), per el que si $N_s = 20$ mòduls, es defineix un gruix total del *tracker* de 20m.

D'altra banda, els tipus de cel·les que disposaran els mòduls seran policristal·lines i cada un d'ells disposarà a la vegada de 54 cel·les fotovoltaiques.

8.1.2 Esquema de la planta fotovoltaica

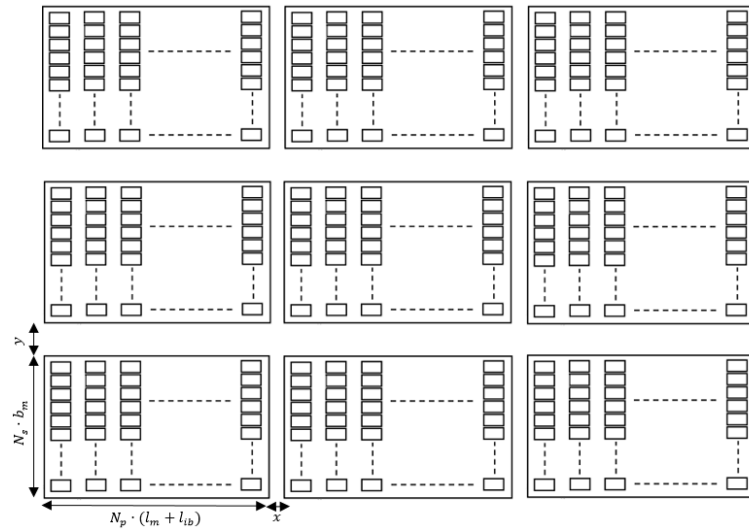


Figura 16 Esquema de la planta fotovoltaica simulada.

Els diferents *trackers* de la planta es troben disposats en files de 3 tal hi com s'observa a l'esquema anterior de la estació. La separació horitzontal x entre *trackers* és de 1m, mentre que la cota y corresponent a la distància vertical entre *trackers* és de 3 metres.

8.2 Consideracions inicials de la simulació

Es realitza la simulació amb les matrius de irradiació que conté *GDATA.mat*. Aquesta variable d'entrada conté per a cada dia de un any natural, 4 tipus diferents de matrius amb diferents tipus de distribucions de irradiació, depenent de la posició de cada *tracker* dintre de la planta.

El conjunt de matrius tipus 4, corresponen a mòduls totalment assolellats, posicionats, per tant, a la primera fila de la planta fotovoltaica. La resta de tipus (1,2 i 3) corresponen a matrius de irradiació on es contempla de diferent manera la part associada a l'efecte de *shading* dintre del *tracker*. Per a la simulació, es considera la primera la fila de la planta com a tipus 4, els *trackers* laterals de la instal·lació són de tipus 1, mentre que els *tracker* disposats a posicions interiors e la planta són de tipus 2, tal hi com a s'observa a la figura següent.

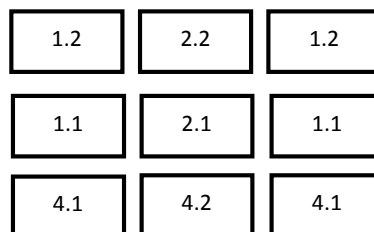


Figura 17 Distribucions dels tipus *GDATA* a la planta.

D'altra banda, el conjunt de pèrdues energètiques que es tindran en compte a l'hora de fer la simulació són:

1. Pèrdues per temperatura: ja es tenen en compte implícitament quan es calculen les corbes característiques dels *trackers*.
2. Pèrdues per *shading*. L'efecte *shading* es té en compte en el càlcul de les corbes.
3. Pèrdues de potència degudes al cablejat que connecta el *tracker* amb l'inversor.
4. Rendiment de l'inversor i transformador.
5. Pèrdues per saturació, causades per el rang de funcionament de l'inversor.
6. Pèrdues degudes a l'efecte de *soiling*.

8.2.1 Tipus d'inversor utilitzat

Per a la simulació de la planta, s'utilitzarà un inversor central que s'ajusti a la potència generada, així com al rang de voltatge i intensitats al qual treballen els diferents *trackers* de l'estació. L'utilitzat serà el model PVS800-57-0250kW-A de la marca ABB, les prestacions del qual es presenten en la taula següent [14].

PVS800-57-0250KW-A	
ENTRADA (DC)	
MÀXIMA POTÈNCIA D'ENTRADA	300 kWp
RANG VOLTATGE DC , MPP	450 – 825 V
MÀXIM VOLTATGE DC	1000 V
MÀXIMA INTENSITAT DC	600 A
NOMBRE D'ENTRADES DC PROTEGIDES	2 , 4 , 8 (+/-)
SORTIDA (AC)	
POTÈNCIA NOMINAL	250 kW
MÀXIMA POTÈNCIA DE SORTIDA	250 kW
POTÈNCIA A $\cos\phi = 0.95$	240 kW
INTENSITAT AC NOMINAL	485 A
VOLTATGE NOMINAL DE SORTIDA	300 V
FREQÜÈNCIA DE SORTIDA	50 / 60 Hz
DISTORSIÓ HARMÒNICA	< 3%
TIPUS DE DISTRIBUCIÓ DE TREBALL	TN i IT
EFICIÈNCIA	
MÀXIMA	98.0%
EURO-ETA	97.6%
ENERGIA CONSUMIDA	
EN OPERACIÓ	310 W
EN <i>STANDBY</i>	60 W
VOLTATGE EXTERN AUXILIAR	230 V, 50 Hz
DIMENSIONS I PES	
GROSSOR / ALÇADA / LLARGÀRIA, (mm)	1830 / 2130 / 646
PES APROXIMAT	1100



Taula 2 Prestacions de l'inversor fotovoltaic

Com ja s'ha esmentat a capítols anteriors, prestacions de l'inversor com el rang de funcionament, la màxima potència d'entrada o el rendiment del dispositiu són factors importants a tenir en compte a l'hora d'escollir l'inversor adequat.

8.2.2 Dimensionament del cablejat

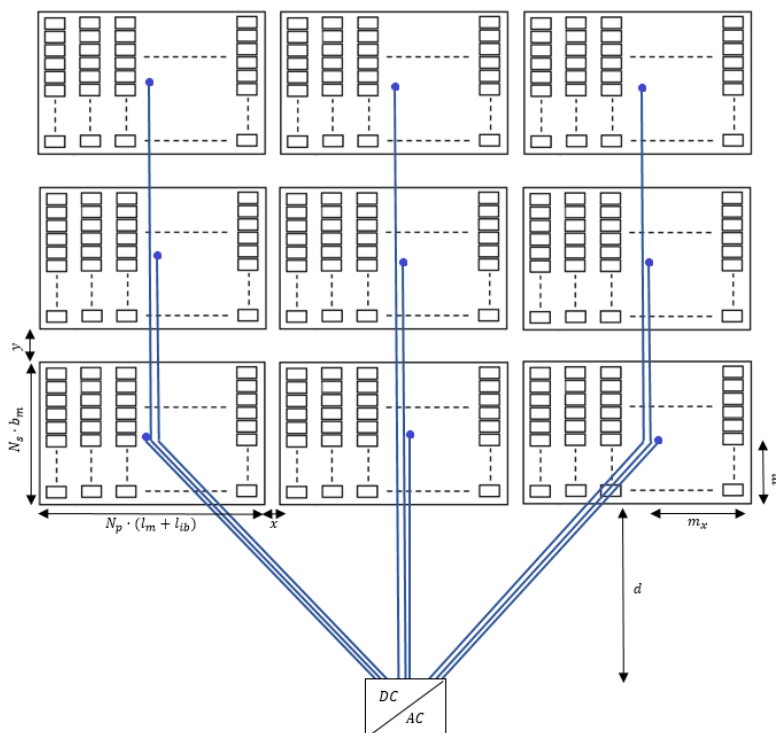


Figura 18 Distribució del cablejat per a la planta simulada.

La disposició del cablejat s'ha dissenyat de la manera que es veu a la figura, a mode de reduir el màxim possible la longitud dels connectors, tot tenint en compte la alineació dels cables entre *trackers*. S'ha considerat que el cablejat es troba connectat al punt mig de cada *tracker* i que la distància vertical entre l'inversor central i el conjunt de *trackers* (d) és de 10m.

Per a calcular la secció òptima del cablejat que connecta cada *tracker* amb l'inversor central, s'ha utilitzat l'script *seccio.m*, ja descrit anteriorment, el qual basa el seu funcionament en el disseny per els criteris de màxima intensitat i caiguda de potencial permesa.

A l'hora de fer la simulació, als diferents *trackers* la planta se'ls hi ha assignat les distribucions de *shadings* descrites anteriorment. Per aquest motiu, per al càlcul del cablejat s'ha dividit la planta per zones (zona 1, 2 i 4), cada una de les quals, al seu torn, es subdivideixen en dues subzones (1.1, 1.2, 2.1...) per tal de classificar les diferents *arrays* a través de la distància que els separa de l'inversor central.

8.3 Simulació de la planta amb el model one-diode

En aquest apartat es simula la planta usant el model one-diode, aproximat al real. Els resultats d'aquesta simulació es prendran com a referència per als càlcul posteriors de l'error amb els

altres models. A més, en aquesta simulació es detallaran els mètodes usats per al càlcul de les pèrdues energètiques a diferents punts de la planta.

En la simulació es té en compte l'efecte de *shading* en la seva totalitat (sense suprimir zones de transició entre irradiacions).

Consideracions de la simulació

1. Es considera una caiguda de potencial entre cablejat d'un 1%.
2. Es té en compte la saturació de la planta a causa del rang de l'inversor.
3. No es tenen en compte les pèrdues de cablejat dintre de cada *tracker* (*missmatch*).
4. Es simulen les hores de sol dels 365 dies corresponents a un any natural en les que la planta treballa.
5. L'eficiència de l'inversor és considerada de 0,976.
6. El rendiment del transformador s'ha definit de 0,99.
7. Les pèrdues de *soiling* s'han definit del 2%.

8.3.1 Pèrdues per l'efecte d'ombres

L'*script* utilitzat per a simular el funcionament de la planta en model one-diode ja té en compte implícitament l'efecte de *shading* sobre les corbes característiques del circuit.

Si la planta treballés sense ombres durant tot l'any es produiria un consum energètic de 3331,47 MWh. No obstant, sobretot als mesos corresponents al solstici d'hivern, les pèrdues degudes a aquest fenomen són significatives. Més concretament, només tenint en compte aquets tipus de pèrdues, la producció energètica anual de la planta disminueix fins a un 3025,44 MWh, el que representa gairebé un 10% de pèrdues d'aquesta naturalesa.

8.3.2 Pèrdues degudes al rang de l'inversor

El rang de l'inversor, definit per el model utilitzat (450-830 V en la simulació) fa treballar als valors de voltatge límit d'aquest rang als *trackers* que disposen d'un voltatge de funcionament fora dels límits de l'inversor. Aquest fenomen es tradueix a que no tots els dispositius fotovoltaics treballin al seu punt òptim de funcionament.

Aquest fet, en la simulació, genera unes pèrdues de 118,64 MWh, el que representa aproximadament un 4% de les pèrdues energètiques totals generades.

8.3.3 Pèrdues en el cablejat

Per a calcular les pèrdues que es generen al llarg del cablejat de la instal·lació, primerament s'han de dissenyar els connectors (secció i longitud) que uniran els diferents *trackers* amb

l'inversor. Inicialment es consideraran dos tipus diferents de materials per als conductors: el coure i l'alumini.

Primerament, sense tenir en compte la saturació del inversor, s'han trobat els punts de potència màxima de les 3 zones durant tota la simulació, doncs les dimensions dels conductors es dissenyaran en base a aquests valors.

	ZONA 1	ZONA 2	ZONA3
Màxim valor de P (W)	1.4466e+005	1.4466e+005	1.4466e+005
V corresponent (V)	603	603	603
I corresponent (A)	239.898	239.898	239.898

Taula 3 Valors de les variables del circuit al punt de potència màxima.

Després d'analitzar els punts de funcionament, s'observa que per a les 3 zones es genera un punt de potència màxima del mateix valor. Més concretament, el dia 126 de la simulació a les 12h no es generen ombres al llarg dels tres tipus de distribucions, fet que es tradueix en valors de I i V iguals al punt de treball estudiat. Així doncs, per al dimensionament dels conductors, l'únic paràmetre que variarà d'una zona a altra serà la longitud del cable.

Dimensionament amb conductors de Cu

Com a inputs de l'script, s'ha definit una conductivitat del material de 46,82 m/Ω·mm², la temperatura de treball ambient s'ha fixat en 50°C, la temperatura de la instal·lació és de 40°C i la temperatura que suporta al conductor en condicions de funcionament és de 90°C. La longitud que existeix entre el *tracker* i el inversor central varia en funció del *tracker* en que ens trobem.

Per una banda, la zona 4 és la corresponent a la primera línia de *trackers*. Dintre d'ella existeixen dues longituds diferents de conductors, corresponents als *trackers* laterals (per una banda) i al *tracker* central (per l'altra).

Als dispositius laterals de la zona 4, existeix una distància *tracker*-inversor de 84,4 m. Si es simula l'script de càlcul de secció amb les variables d'entrada esmentades i la longitud establerta, es troba que la distribució òptima és la instal·lació d'un sol cable de Cu de 120 mm² de secció.

La resistència que disposa el cable que uneix els *trackers* laterals de la zona 4 amb el inversor és de:

$$R_{4,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{4,1}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{84,40}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 1,4952 \cdot 10^{-2} \Omega$$

La longitud que separa el *tracker* central i el inversor és de 20m. Per a aquesta longitud, la secció òptima calculada també és de 120 mm², el que defineix una resistència del conductor de:

$$R_{4,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{4,2}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{20}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 3,5433 \cdot 10^{-3} \Omega$$

D'altra banda, la zona 1 és la corresponent a les columnes laterals de la planta, on s'estableixen dues longituds *tracker*-inversor diferents, depenent de si es tracta dels *trackers* laterals de la segona o tercera fila. Per a ambdues longituds, 107,4m i 130,4m respectivament, es troba una secció òptima de 120mm². Les resistències que representen els conductors són de:

$$R_{1,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{1,1}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{107,4}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 1,90277 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$R_{1,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{1,2}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{130,4}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 2,31025 \cdot 10^{-2} \Omega$$

Finalment, la zona 2 és la corresponent als *tracker* centrals de la segona i tercera fila de la planta. La secció per a les longituds de 43m (*tracker* central de la segona fila) i 66m (central de la última filal) és de 120mm², per la qual s'estableixen unes resistències de:

$$R_{2,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{2,1}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{43}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 7,61817 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{2,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{2,2}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{66}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 1,1693 \cdot 10^{-2} \Omega$$

Una vegada és tenen les resistències dels conductors, s'obté la potència total perduda en el cablejat fent el sumatori de les potències que es generen a cada zona de la planta.

$$\sum_{i=1,2,4} \sum_{j=1,2} P_{i,j} = R_{i,j} * I_{f_{unc}}^2$$

On la intensitat $I_{f_{unc}}$ és el corrent que es genera a cada *tracker* quan aquest treballa al punt de potència màxima, durant cada hora de treball per als 365 dies de la simulació. A la taula següent es pot observar la energia perduda (en Wh), per a cada mes i *tracker* de una zona de planta determinada.

MES / TRACKER	4.1 (x2)	4.2	1.1 (x2)	1.2(x2)	2.1	2.2	TOTAL
Gener	74164,569	17575,396	94314,764	114512,179	37726,287	57905,438	679190,144
Febrer	94013,835	22279,242	119750,503	145394,958	47914,747	73543,533	862056,112
Març	144527,361	34249,853	184082,386	223503,452	73685,195	113098,156	1325259,602
Abril	183327,604	43444,670	233300,439	283261,502	93406,959	143368,759	1679999,478
Maig	191095,118	45285,402	243185,281	295263,174	97364,573	149443,233	1751180,354
Juny	189611,770	44933,881	241297,590	292971,236	96608,795	148283,201	1737587,067
Juliol	165255,826	39162,050	210302,517	255338,598	84199,236	129235,980	1514391,149
Agost	149168,780	35349,768	189830,342	230482,326	76002,750	116655,333	1366970,747
Setembre	140391,074	33269,642	178694,281	216961,488	71538,428	109803,120	1286704,875
Octubre	103879,164	24617,111	132310,092	160644,170	52942,958	81261,249	952488,169
Novembre	76697,944	18175,751	97292,219	118127,253	38921,757	59740,344	701072,683
Desembre	62457,556	14801,087	79292,787	96273,261	31705,328	48663,970	571217,593
TOTAL	1574590,601	373143,852	2003653,199	2432733,596	802017,012	1231002,317	14428117,973

Taula 4 Pèrdues del cablejat de coure mes a mes.

Dimensionament amb conductors de Al

Per a determinar quin conductor representa menys pèrdues energètiques per a la planta, s'ha realitzat el mateix anàlisi però canviant la conductivitat tèrmica a un valor de 29,7 m/Ω·mm², corresponent a la conductivitat de l'alumini. Les condicions de temperatura ambient, de la instal·lació i de funcionament de la placa romanen iguals que en el cas anterior. A mode resum, a la taula següent es poden observar les resistències obtingudes a cada zona amb el nou material.

ZONA	SUBZONA	LONGITUD	SECCIÓ	RESISTÈNCIA
ZONA 4	ZONA 4.1	84.4 m	185 mm ²	$R_{4,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{4,1}}{S} = 3,7181 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{84,40}{1,85 \cdot 10^{-4}} = 1,6963 \cdot 10^{-2} \Omega$
	ZONA 4.2	20 m	185 mm ²	$R_{4,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{4,2}}{S} = 3,7181 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{20}{1,85 \cdot 10^{-4}} = 4,01957 \cdot 10^{-3} \Omega$
ZONA 1	ZONA 1.1	107.4 m	185 mm ²	$R_{1,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{1,1}}{S} = 3,7181 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{107,4}{1,85 \cdot 10^{-4}} = 2,1585 \cdot 10^{-2} \Omega$
	ZONA 1.2	130,4 m	185 mm ²	$R_{2,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{2,1}}{S} = 3,7181 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{130,4}{1,85 \cdot 10^{-4}} = 2,6207 \cdot 10^{-2} \Omega$
ZONA 2	ZONA 2.1	43 m	185 mm ²	$R_{1,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{1,2}}{S} = 3,7181 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{43}{1,85 \cdot 10^{-4}} = 8,64207 \cdot 10^{-3} \Omega$
	ZONA 2.2	66 m	185 mm ²	$R_{2,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{2,1}}{S} = 3,7181 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{66}{1,85 \cdot 10^{-4}} = 1,32646 \cdot 10^{-2} \Omega$

Taula 5 Resistències dels conductors de coure calculades.

Amb les resistències trobades per a cada zona, s'ha calculat la potència perduda per cablejat tal hi com s'ha explicat anteriorment. Usant els mateixos valors de intensitat que en el cas anterior, doncs l'únic que canvia és la resistència del material del cable utilitzat. A la taula de continuació s'observa la energia total perduda (en Wh) per a cada pauta del procés fotovoltaic.

MES / TRACKER	4.1 (x2)	4.2	1.1 (x2)	1.2(x2)	2.1	2.2	TOTAL
Gener	84139,485	19937,779	106990,386	129900,257	42796,789	65688,230	770483,053
Febrer	106658,419	25273,889	135844,612	164933,044	54354,602	83428,166	977928,808
Març	163965,866	38853,521	208822,509	253537,710	83588,659	128299,137	1503393,486
Abril	207984,628	49284,252	264655,320	321326,012	105961,075	162638,265	1905815,510
Maig	216796,849	51372,405	275868,655	334940,461	110450,601	169529,181	1986564,117
Juny	215113,995	50973,634	273727,264	332340,533	109593,244	168213,235	1971143,698
Juliol	187482,248	44425,987	238566,547	289650,845	95515,812	146605,968	1717947,046
Agost	169231,542	40101,281	215342,972	261454,402	86217,699	132334,417	1550711,227
Setembre	159273,260	37741,556	202710,258	246116,642	81153,361	124561,230	1459656,467
Octubre	117850,606	27926,001	150092,172	182231,437	60058,616	92183,183	1080516,230
Novembre	87013,592	20618,831	110368,002	134001,122	44152,932	67769,757	795306,951
Desembre	70857,913	16790,564	89949,500	109210,403	35966,598	55204,661	647997,458
TOTAL	1786368,403	423299,702	2272938,196	2759642,868	909809,989	1396455,430	16367464,053

Taula 6 Pèrdues en el cablejat d'alumini mes a mes.

Després d'analitzar les pèrdues a dos materials diferents, s'observa que l'alumini presenta un 13,44% més de pèrdues que el coure. La diferència significativa entre materials ve donada a causa de que el coure presenta una resistivitat tèrmica menor que l'alumini, el que origina resistències de cablejat menor. És per aquest motiu que, tot hi que l'alumini presenti un cost menor, el material elegit per al disseny del cablejat serà el coure, doncs a llarg termini, la diferència de pèrdues entre materials és més significativa que la diferència de costos inicials de cada material.

8.3.4 Pèrdues degudes a l'eficiència de l'inversor

Com s'ha vist a les prestacions del dispositiu inversor utilitzat per a simular la planta, es disposa d'un rendiment del 97,6%, cosa que fa generar unes pèrdues d'aproximadament 69,2 MWh al llarg de l'any.

8.3.5 Pèrdues degudes a l'eficiència del transformador

De la mateixa manera que a l'inversor, el rendiment del transformador es tradueix en un rati fixe i inevitable de pèrdues energètiques per a la instal·lació. Més concretament, l'eficiència del dispositiu s'ha definit amb un valor del 99%, el que produeix 27,66 MWh d'energia perduda al llarg de l'any.

8.3.6 Pèrdues degudes a la brutícia acumulada (*soiling*)

Les pèrdues energètiques degudes a la brutícia (general i localitzada) que es diposita sobre les cel·les fotovoltaïques s'ha definit per a la simulació com el 2% de l'energia total generada per a la planta. D'aquesta manera, es calcula que la quantitat d'energia perduda durant tot l'any deguda a aquest fenomen representa un valor de 56,46 MWh.

8.3.7 Resultat de la simulació

<i>Esglaó del procés</i>	<i>Energia de sortida (MWh)</i>	<i>Energia perduda (MWh)</i>	<i>Energia perduda (%)</i>	<i>Performace Ratio parcial (%)</i>	<i>Performace Ratio total (%)</i>
<i>1.Global sense shadows (entrada)</i>	3331,472265	-	-	100	100
<i>2.Global amb efecte de shading</i>	3025,444847	-306,0274185	-9,185951259	90,81404874	90,81404874
<i>3.Amb rang de l'inversor</i>	2906,803877	-118,64097	-3,921438862	96,07856114	86,89260988
<i>4.Amb pèrdues per cablejat</i>	2892,375759	-14,42811797	-0,496356775	99,50364323	86,3962531
<i>5..Eficiència de l'inversor</i>	2822,95874	-69,41701821	-2,4	97,6	83,9962531
<i>6.Amb pèrdues de soiling</i>	2766,499566	-56,45917481	-2	98	81,9962531
<i>7.Eficiència del transformador</i>	2738,83457	-27,66499566	-1	99	80,9962531
Total del sistema	2738,83457	-592,6376951	-17,78906285	-	80,9962531

Taula 7 Resultats de la simulació a un any del model one-diode..

8.4 Simulació de la planta amb el model ideal corregit

Per a simular la planta amb el model ideal corregit, s'han pres les mateixes consideracions per a la simulació que a l'anterior model. Amb els mateixos procediments per a calcular les pèrdues energètiques al llarg de l'any.

8.4.1 Pèrdues per l'efecte d'ombres

Si la planta en model ideal treballés sense ombres durant tot l'any es produiria un consum energètic de 3361,35 MWh. Tot hi així, les pèrdues de *shading* no es poden menysprear, doncs representen el 9% de l'energia total generada.

8.4.2 Pèrdues degudes al rang de l'inversor

La fixació per part de l'inversor de límits de funcionament, genera unes pèrdues en el model ideal de 85,1 MWh, el que representa el 2,7% de les pèrdues energètiques totals generades durant l'any simulat.

8.4.3 Pèrdues per cablejat

Havent vist que el coure és la millor opció per al disseny del cablejat, per al cas ideal només s'analitzarà la potència perduda per aquest tipus de material. Així doncs, com en el cas anterior, primerament es dissenyarà

Sense tenir en compte la saturació del inversor, s'han trobat els punts de potència màxima de les 3 zones durant tota la simulació. Els valors màxims, tal hi com passava al model one-diode, coincideixen entre zones, doncs es produeix a una hora on no es produeix ombra i, per tant, les corbes entre les diferents zones són les mateixes.

	ZONA 1	ZONA 2	ZONA3
Màxim valor de P (W)	1.4750e+005	1.4750e+005	1.4750e+005
V corresponent (V)	642	642	642
I corresponent (A)	229.7580	229.7580	229.7580

Taula 8 Valors de les variables del circuit al punt de potència màxima.

Seguidament, es calculen les seccions del cablejat associades a cada zona. A la taula de continuació, s'observa que les seccions òptimes coincideixen amb el model one-diode, el que es tradueix en resistències de conductor iguals per a cada zona.

ZONA	SUBZONA	LONGITUD	SECCIÓ	RESISTÈNCIA
ZONA 4	ZONA 4.1	84.4 m	120 mm ²	$R_{4,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{4,1}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{84,40}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 1,4952 \cdot 10^{-2} \Omega$
	ZONA 4.2	20 m	120 mm ²	$R_{4,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{4,2}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{20}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 3,5433 \cdot 10^{-3} \Omega$
ZONA 1	ZONA 1.1	107.4 m	120 mm ²	$R_{1,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{1,1}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{107,4}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 1,90277 \cdot 10^{-2} \Omega$
	ZONA 1.2	130,4 m	120 mm ²	$R_{2,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{1,2}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{130,4}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 2,31025 \cdot 10^{-2} \Omega$
ZONA 2	ZONA 2.1	43 m	120 mm ²	$R_{2,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{2,1}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{43}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 7,61817 \cdot 10^{-3} \Omega$
	ZONA 2.2	66 m	120 mm ²	$R_{2,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{2,2}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{66}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 1,1693 \cdot 10^{-2} \Omega$

Taula 9 Resistències dels conductors de coure calculades

A l'hora de calcular les pèrdues energètiques a causa dels conductors, s'ha utilitzat la equació esmentada anteriorment, ara calculant les intensitats dels punts de funcionament utilitzant el model ideal corregit. A la taula següent es poden observar les pèrdues (en Wh) per zona i mes de simulació.

MES / TRACKER	4.1 (x2)	4.2	1.1 (x2)	1.2 (x2)	2.1	2.2	TOTAL
Gener	86700,7745	20544,7051	110179,66	117925,67	38880,4044	67697,7558	756735,0736
Febrer	109559,749	25961,3914	139410,3	149211,325	49217,0327	85695,6791	957236,8532
Març	167934,036	39793,8226	213763,747	228792,077	75430,3272	131337,725	1467541,595
Abril	212379,985	50325,7806	270248,304	289247,692	95380,9368	166075,314	1855533,994
Maig	221422,573	52468,5216	281754,774	301563,108	99442,0093	173146,369	1934537,811
Juny	219693,388	52058,7721	279554,429	299208,07	98665,4234	171794,194	1919430,164
Juliol	191765,677	45440,993	244017,105	261172,349	86122,9459	149955,492	1675429,694
Agost	173255,347	41054,766	220463,165	235962,486	77809,8619	135480,922	1513707,547
Setembre	163184,65	38668,4033	207654,2	222253,007	73291,7733	127614,119	1425758,01
Octubre	121043,55	28682,6045	153977,552	164802,705	54348,0063	94629,6243	1057307,848
Novembre	89604,1516	21232,6923	113498,285	121477,606	40069,3372	69767,901	780230,0145
Desembre	73154,2755	17334,7127	92754,3701	99275,3224	32729,5188	56987,9611	637420,1287
TOTAL	1829698,16	433567,165	2327275,89	2490891,42	821387,577	1430183,06	15980868,7

Taula 10 Pèrdues en el cablejat per al model ideal, mes a mes.

Usant el model ideal, les pèrdues totals per cablejat són un 10,76% majors que en el model one-diode, fet que s'explica tenint en compte que en el punt de funcionament del model ideal, inclús del corregit, sempre es disposa d'una intensitat major que en el model one-diode. No obstant, tot hi haver-hi una diferència percentual elevada entre pèrdues de cablejat, el percentatge que representa a l'hora de calcular el total de la energia generada en la simulació és petit.

8.4.4 Pèrdues degudes a l'eficiència de l'inversor

Com s'ha vist a les prestacions del dispositiu inversor utilitzat per a simular la planta, es disposa d'un rendiment del 97,6%, cosa que fa generar unes pèrdues de 70,86 MWh al llarg de l'any.

8.4.5 Pèrdues degudes a l'eficiència del transformador

El rendiment del es defineix amb el mateix valor que en la simulació anterior, el que produeix 28,23 MWh d'energia perduda al llarg de l'any.

8.4.6 Pèrdues degudes a la brutícia acumulada (*soiling*)

Es calcula que la quantitat d'energia perduda durant tot l'any deguda a aquest fenomen representa un valor de 57,63 MWh, considerant el mateix percentatge per a aquestes pèrdues que a l'anterior model.

8.4.7 Resultat de la simulació

<i>Esglaó del procés</i>	<i>Energia de sortida (MWh)</i>	<i>Energia perduda (MWh)</i>	<i>Energia perduda (%)</i>	<i>Performace Ratio parcial (%)</i>	<i>Performace Ratio total (%)</i>
<i>1.Global sense shadows (entrada)</i>	3361,356133	-	-	100	100
<i>2.Global amb efecte de shading</i>	3053,393637	-307,9624957	-9,161852644	90,83814736	90,83814736
<i>3.Amb rang de de l'inversor</i>	2968,314024	-85,07961331	-2,786395186	97,21360481	88,05175217
<i>4.Amb pèrdues per cablejat</i>	2952,333155	-15,98086873	-0,538382011	99,46161799	87,51337016
<i>6.Eficiència de l'inversor</i>	2881,47716	-70,85599573	-2,4	97,6	85,11337016
<i>7.Amb pèrdues de soiling</i>	2823,847616	-57,62954319	-2	98	83,11337016
<i>8.Eficiència del transformador</i>	2795,60914	-28,23847616	-1	99	82,11337016
Total del sistema	2795,60914	-565,7469929	-16,83091498	-	82,11337016

Taula 11 Resultats de la simulació a un any del model ideal.

8.5 Simulació de la planta amb model mitjana

La realització d'una corba mitjana equivalent per a cada situació del *tracker*, es tradueix en un canvi total de les corbes V-I i P-V respecte el model real, on només el punt de treball és d'una valor aproximat. Per aquest motiu, no té sentit trobar les corbes totals de la planta, però el punt de funcionament total de les corbes resultants, es pot aproximar al valor de treball real.

Consideracions de la simulació

1. La saturació de la planta causada quan el punt de funcionament de la planta es troba fora de rang, fa que s'hagi d'avaluar la corba característica a un dels valors límits de voltatge del rang del inversor (inferior o superior). El fet de només tenir un punt i no tenir les corbes característiques suposa un problema quan el sistema es troba saturat, doncs es impossible avaluar el model a un altre punt que no sigui el de treball. Aquest motiu obliga a considerar que el sistema mai saturarà, independentment del rang establert per l'inversor.
2. Es simulen les hores sol dels 365 dies corresponents a un any natural en les que la planta treballa.
3. No es tenen en compte les pèrdues de cablejat dintre de cada *tracker*.

4. Els ratis de pèrdues constants referents a l'eficiència del transformador, l'inversor i l'efecte de *soiling* són iguals que a les simulacions anteriors.

8.5.1 Pèrdues per l'efecte d'ombres

Per a avaluar el percentatge que representen les pèrdues per l'efecte de *shading* amb el model mitjana, s'ha considerat el valor d'energia obtinguda sense tenir l'efecte d'ombratge per al model one-diode, doncs el model mitjana ja porta implícitament les pèrdues d'aquest tipus.

D'aquesta manera, considerant que sense l'efecte d'ombratge es genera una energia de 3331,47 MWh, s'observa que es redueix fins a un valor de 3018,875544 MWh la producció energètica anual, el que representa unes pèrdues d'aproximadament un 9%.

8.5.2 Pèrdues degudes al rang de l'inversor

Com s'ha esmentat a les consideracions inicials de la simulació, les pèrdues degudes a aquest fenomen no s'han tingut en compte, doncs el fet de no tenir la corba real de funcionament de la planta no permet avaluar els punts límit del rang.

8.5.3 Pèrdues en el cablejat

Per al model de la mitjana dissenyat, només es tenen els valors de la intensitat i el voltatge de treball del *tracker* quan la cel·la es troba totalment assolada (sense efecte de *shading*). Aquest fet suposa un problema a l'hora de dissenyar el cablejat i calcular les pèrdues i caigudes de tensió que s'hi originen.

Per a solucionar el problema del dimensionament del cablejat i el càlcul de les seves pèrdues generades, es dissenyen dos models mitjana, ambdós basats en el mateix principi però amb diferències a l'hora de calcular les pèrdues associades al cablejat.

Model mitjana2

Per una banda, i definint així el model *mitjana2*, les caigudes de tensió al cablejat són calculades usant la simplificació $\nabla V \cong \nabla P$. Així doncs, si s'accepta una caiguda de tensió de un 1% al llarg del cablejat es pot acceptar que es perdrà un 1% de la potència generada.

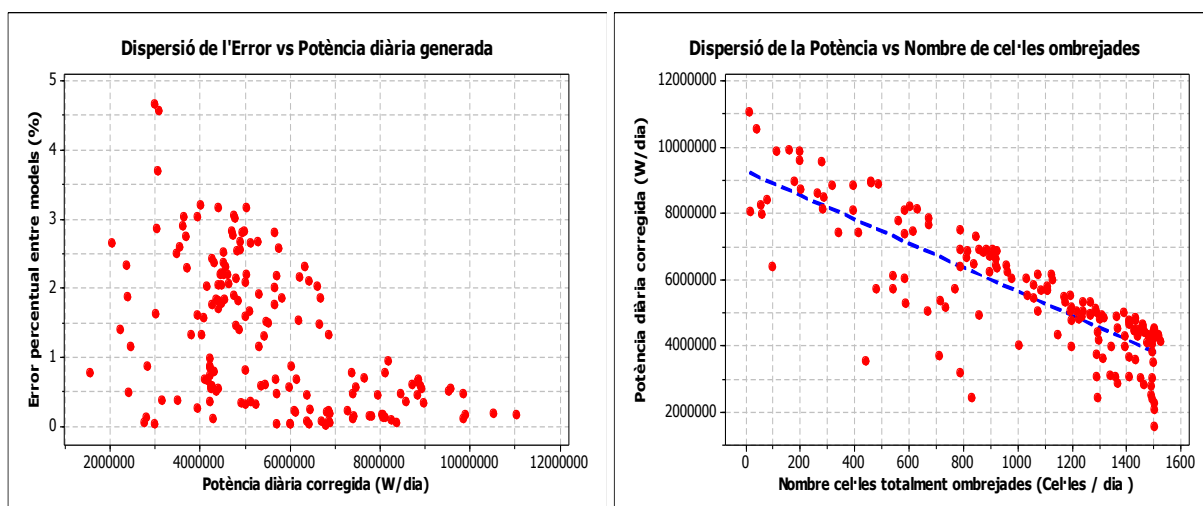
A la simulació, si s'accepta aquesta simplificació, les pèrdues anuals derivades dels connectors de la instal·lació corresponen a un valor de 30,2 MWh.

Model mitjana1

D'altra banda, i anunciant el segon model *mitjana1* proposat, a l'hora de calcular el factor corrector del model, es va observar que l'error de potència als punts de treball entre models, disminuïa al reduir-se el nombre de cel·les ombrejades (disminueix l'efecte de *shading*). Aquest

fet, unit a que l'error comès és major conforme disminueix la potència de treball, tal hi com es veu a la gràfica de dispersió següent, es tradueix en que generalment, a les hores amb menor nombre de cel·les ombrejades per *tracker* es generen els punts de màxima potència de la simulació.

La relació trobada permet acceptar que els punts de màxima potència durant l'any es troben a situacions on el percentatge de zona ombrejada del *tracker* és baix, les corbes entre models són semblants i, per tant, els valors màxims de V i I al punt de màxima potència s'aproximen entre ambdós models. Així doncs, a l'hora de dissenyar la secció del cablejat emprat, es tendra en compte per a les 3 zones de *trackers* els valors de V i I de màxima potència emprant el model mitjana.



Gràfica 36 Relació entre l'error i la potència calculada amb el nombre de cel·les ombrejades.

	ZONA 1	ZONA 2	ZONA3
Màxim valor de P (W)	1.4466e+005	1.4466e+005	1.4466e+005
V corresponent (V)	603	603	603
I corresponent (A)	239.898	239.898	239.898

Taula 12 Valors de les variables del circuit al punt de màxima potència.

Els valors de al punt de màxima potència de la simulació, coincideix amb el model one-diode ja que es troba a una hora sense efecte de *shading*. Així doncs, la secció i resistència associada a cada cable de la planta són iguals

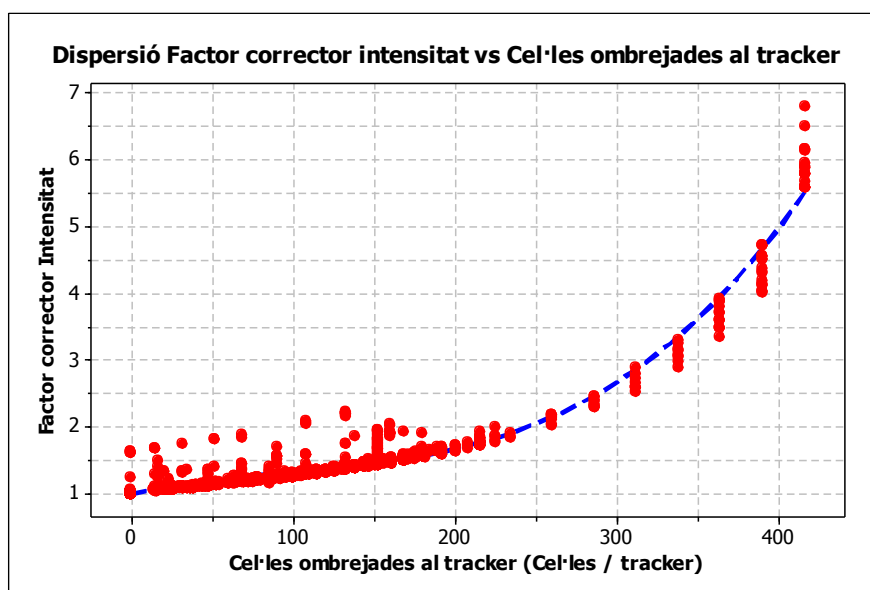
ZONA	SUBZONA	LONGITUD	SECCIÓ	RESISTÈNCIA
ZONA 4	ZONA 4.1	84.4 m	120 mm ²	$R_{4,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{4,1}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{84,40}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 1,4952^{-2} \Omega$
	ZONA 4.2	20 m	120 mm ²	$R_{4,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{4,2}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{20}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 3,5433^{-3} \Omega$
ZONA 1	ZONA 1.1	107.4 m	120 mm ²	$R_{1,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{1,1}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{107,4}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 1,90277^{-2} \Omega$
	ZONA 1.2	130,4 m	120 mm ²	$R_{2,1} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{2,1}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{130,4}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 2,31025^{-2} \Omega$
ZONA 2	ZONA 2.1	43 m	120 mm ²	$R_{1,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{1,2}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{43}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 7,61817^{-3} \Omega$
	ZONA 2.2	66 m	120 mm ²	$R_{2,2} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{2,2}}{S} = 2,126 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{66}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 1,1693^{-2} \Omega$

Taula 13 Resistències dels conductors de coure dissenyats.

Per a calcular la potència perduda per cablejat s'utilitzarà l'equació esmentada anteriorment, on la intensitat de funcionament que surt a cada hora per al *tracker* haurà de ser corregida, doncs la corba per el model de la mitjana canvia sempre hi quan hi hagi efecte d'ombres.

$$\sum_{i=1,2,4} \sum_{j=1,2} P_{i,j} = R_{i,j} * (F_{corr,in} \cdot I_{func})^2$$

El factor de correcció s'ha trobat tenint en compte la relació existent entre l'error creat entre models (proporcional al factor corrector dissenyat) i el nombre de cel·les ombrejades a cada *tracker* a una hora determinada del dia.



Gràfica 37 Relació entre el factor corrector de la intensitats i el nombre de cel·les ombrejades.

Més concretament, l'error comès és de aproximadament un 0,25%, valor que es considera baix si es té en compte que les pèrdues totals per cablejat dintre del total de la producció energètica de la planta representa al voltant d'un 0,5%.

8.5.4 Pèrdues de ratis constants

Les pèrdues degudes a les eficiències de l'inversor i el transformador, i les causades per l'efecte de *soiling* s'han representat a la simulació amb els mateixos ratis que a les simulacions anteriors (0.976 , 0.99 i 0.98, respectivament).

La quantitat d'energia perduda per a tot l'any simulat, en ambdós models mitjana proposats, es troba al voltant dels 70 MWh (degut a l'inversor), 58 MWh (transformador) i 28MWh (causat per l'efecte *soiling*).

8.5.5 Resultats de la simulació

Model Mitjana 1 – tenint en compte el cablejat

A continuació, després d'haver calculat les pèrdues per cablejat i haver fet les correccions adients, cal fer el balanç energètic de la planta al llarg de l'any, a mode de poder comparar la producció energètica anual entre models.

<i>Esglaó del procés</i>	<i>Energia de sortida (MWh)</i>	<i>Energia perduda (MWh)</i>	<i>Energia perduda (%)</i>	<i>Performace Ratio parcial (%)</i>	<i>Performace Ratio acumulat (%)</i>
1.Global sense shadows (entrada)	3331,472265	-	-	100	100
2.Global mitjana corregit	3018,875544	-312,596721	-9,38314043	90,61685957	90,61685957
3.Amb pèrdues per cablejat	3004,525499	-14,35004531	-0,475344051	99,52465595	90,14151552
4.Eficiència de l'inversor	2932,416887	-72,10861197	-2,4	97,6	87,74151552
5.Amb pèrdues de soiling	2873,768549	-58,64833773	-2	98	85,74151552
6.Eficiència del transformador	2845,030863	-28,73768549	-1	99	84,74151552
Total del sistema	2845,030863	-486,4414015	-14,6013943	-	84,74151552

Taula 15 Resultats de la simulació a un any per al model mitjana

Al balanç energètic anual amb el model de la mitjana, no s'ha tingut en consideració les pèrdues causades per la saturació del *tracker* degut al rang del inversor. Tot hi així, l'error causat deguda a la saturació, com ja s'ha comprovat amb la simulació dels models anteriors, és

baixa. Si es compara la producció energètica anual entre el model dissenyat i el model one-diode, s'observa un error percentual del voltant de 2,8%.

Model Mitjana2 – amb la idealització en les pèrdues de cablejat

<i>Esglaó del procés</i>	<i>Energia de sortida (MWh)</i>	<i>Energia perduda (MWh)</i>	<i>Energia perduda (%)</i>	<i>Performace Ratio parcial (%)</i>	<i>Performace Ratio acumulat(%)</i>
1.Global sense shadows (entrada)	3331,472265	-	-	100	100
2.Global mitjana corregit	3018,875544	-312,596721	-9,38314043	90,61685957	90,61685957
3.Amb pèrdues per cablejat	2988,686789	-30,18875544	-1	99	89,61685957
4.Eficiència de l'inversor	2916,958306	-71,72848293	-2,4	97,6	87,21685957
5.Amb pèrdues de soiling	2858,61914	-58,33916611	-2	98	85,21685957
6.Eficiència del transformador	2830,032948	-28,5861914	-1	99	84,21685957
Total del sistema	2830,032948	-501,4393169	-15,05158311	-	84,21685957

Taula 16 Resultats de la simulació a un any per al model mitjana2

8.6 Simulació de la planta amb el model distribució

A aquest apartat es simularà la planta descrita anteriorment fent ús d'un dels models de canvi de distribucions de les zones amb efecte *shading*. Més concretament, es simularà la planta per el cas A+D, doncs, com ja es va observar, es tracta del model de canvi de distribució que millor s'ajusta al model one-diode i, a més, el que redueix el major nombre d'iteracions a realitzar per a l'eina de disseny. Per a realitzar la simulació, s'han realitzat les mateixes consideracions que en el model one-diode, utilitzant iguals procediments per al càlcul de pèrdues.

8.6.1 Pèrdues per l'efecte d'ombres

El fet de canviar les distribucions d'ombres dintre del *tracker* fa que les pèrdues representatives degut a l'efecte *shading* puguin variar del model one-diode, tot hi així, vist que l'error que genera el model es relativament baix, la variació entre quantitats de pèrdues calculades no experimenta gran variació.

Degut a aquest fenomen, es calcula que a la planta es perden anualment 305,98MWh, el que representa un 9% de la energia total produïda.

8.6.2 Pèrdues degudes al rang de l'inversor

Les pèrdues degudes als límits de funcionament que imposa l'inversor representen el 4% de l'energia anual produïda, corresponent a una despesa anual de 124,7MWh.

8.6.3 Pèrdues en el cablejat

Per al dimensionament del cablejat s'ha utilitzat el mateix *script* usat per al disseny de conductors dels altres models. S'observa que es necessita una secció de 120mm, igual que al model one-diode, per a tots els conductors dels diferents *trackers* de la instal·lació. Així doncs, les resistències dels conductors que s'instal·len es corresponen amb les mateixes que el model one-diode.

A continuació, s'exposa la energia (en Wh) perduda als cables que connecten els diferents dispositius fotovoltaics amb l'inversor.

MES / TRACKER	4.1 (x2)	4.2	1.1 (x2)	1.2 (x2)	2.1	2.2	TOTAL
Gener	74164,5688	17575,3957	94314,5158	114512,059	37726,2722	57905,4156	679189,3704
Febrer	94013,8349	22279,2416	119749,652	145394,154	47914,7148	73543,4835	862052,7212
Març	144527,361	34249,8528	184081,922	223503,24	73685,1405	113098,073	1325258,111
Abril	183327,604	43444,6696	233300,071	283261,502	93406,9593	143368,759	1679998,742
Maig	191095,118	45285,4022	243184,897	295263,174	97364,5732	149443,233	1751179,587
Juny	189611,77	44933,8807	241297,209	292971,236	96608,7946	148283,201	1737586,306
Juliol	165255,826	39162,0498	210302,186	255338,598	84199,236	129235,98	1514390,486
Agost	149168,78	35349,7684	189830,042	230482,326	76002,7504	116655,333	1366970,148
Septembre	140391,074	33269,6422	178693,999	216961,488	71538,4277	109803,12	1286704,312
Octubre	103879,164	24617,1108	132308,009	160641,895	52942,7772	81260,9713	952478,9955
Novembre	76697,9439	18175,7507	97291,1107	118126,094	38921,5961	59740,0981	701067,7425
Desembre	62457,556	14801,0874	79292,091	96272,5675	31705,2272	48663,8158	571214,5594
TOTAL	1574590,6	373143,852	2003645,7	2432728,33	802016,469	1231001,48	14428091,1

Taula 17 Pèrdues al cablejat dissenyat, mes a mes.

8.6.4 Pèrdues de ratis constants

Les pèrdues degudes a les eficiències de l'inversor i el transformador, i les causades per l'efecte de *soiling* s'han representat a la simulació amb els mateixos ratis que a les simulacions anteriors (0.976 , 0.99 i 0.98, respectivament).

La quantitat d'energia perduda per a tot l'any simulat es troba al votant dels 69,3 MWh (degut a l'inversor), 6,38 MWh (transformador) i 27,6MWh (causat per l'efecte *soiling*).

8.6.5 Resultats de la simulació

<i>Esglaó del procés</i>	<i>Energia de sortida (MWh)</i>	<i>Energia perduda (MWh)</i>	<i>Energia perduda (%)</i>	<i>Performace Ratio parcial (%)</i>	<i>Performace Ratio total (%)</i>
<i>1.Global sense shadows (entrada)</i>	3331,472265	-	-	100	100
<i>2.Global amb efecte de shading</i>	3025,487597	-305,984668	-9,18466803	90,81533197	90,81533197
<i>3.Amb rang de funcionament de l'inversor</i>	2900,726802	-124,7607947	-4,123659102	95,8763409	86,69167287
<i>4.Amb pèrdues per cablejat</i>	2886,298711	-14,42809108	-0,497395724	99,50260428	86,19427714
<i>6.Eficiència de l'inversor</i>	2817,027542	-69,27116907	-2,4	97,6	83,79427714
<i>7.Amb pèrdues de soiling</i>	2760,686991	-56,34055084	-2	98	81,79427714
<i>8.Eficiència del transformador</i>	2733,080121	-27,60686991	-1	99	80,79427714
Total del sistema	2733,080121	-598,3921436	-17,96179275	-	80,79427714

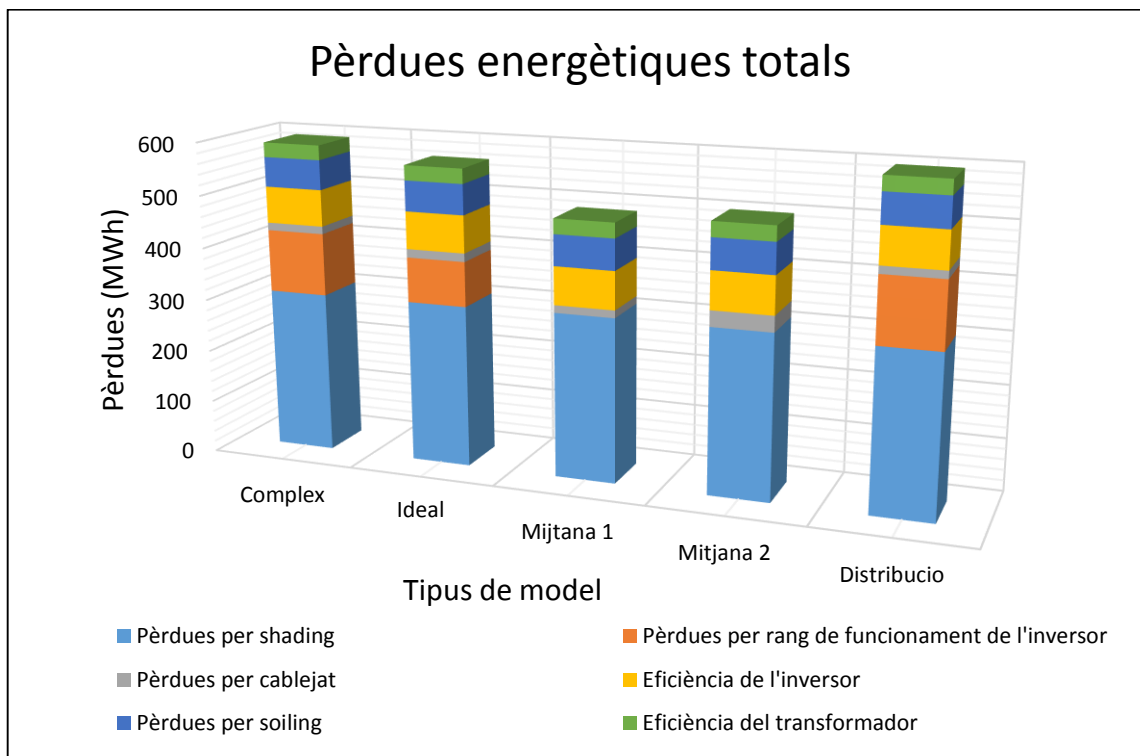
Taula 18 Resultats de la simulació a un any per el model distribució

8.7 Anàlisi de resultats de la simulació

Després d'haver realitzat la simulació a un any dels diferents models dissenyats, es realitza una comparativa entre ells i el model one-diode de referència, a mode d'avaluar la validesa de les simplificacions i correccions realitzades.

Anàlisi de les pèrdues energètiques calculades

Com s'ha vist anteriorment, hi ha models en que no es poden calcular totes les despeses energètiques, o bé s'han de realitzar correccions determinades. Aquest fet fa que s'hagi de recórrer a idealitzacions que poden fer variar la quantitat de pèrdues totals calculades a cada model.



Gràfica 38 Distribució de les pèrdues energètiques als diferents models dissenyats.

Com s'observa en el diagrama de blocs anterior, les distribucions de pèrdues entre el model one-diode, l'ideal i el de distribució són semblants, doncs els tres models permeten calcular les pèrdues energètiques sense necessitat de realitzar idealitzacions. En canvi, pel que fa als models mitjanes, el fet de no tenir la corba real de funcionament ha obligat a obviar les pèrdues degudes a la saturació a causa del rang de l'inversor.

Al model one-diode les pèrdues degudes a la saturació de l'inversor representen la segona font de despeses energètiques (el 4% de l'energia total generada), per la qual cosa no tenir en compte les despeses d'aquest tipus fa augmentar l'error de l'energia obtinguda al llarg de l'any considerablement. No obstant, haver focalitzat una part de l'error comès amb el model mitjana pot ser útil, doncs permet aplicar correccions posteriors.

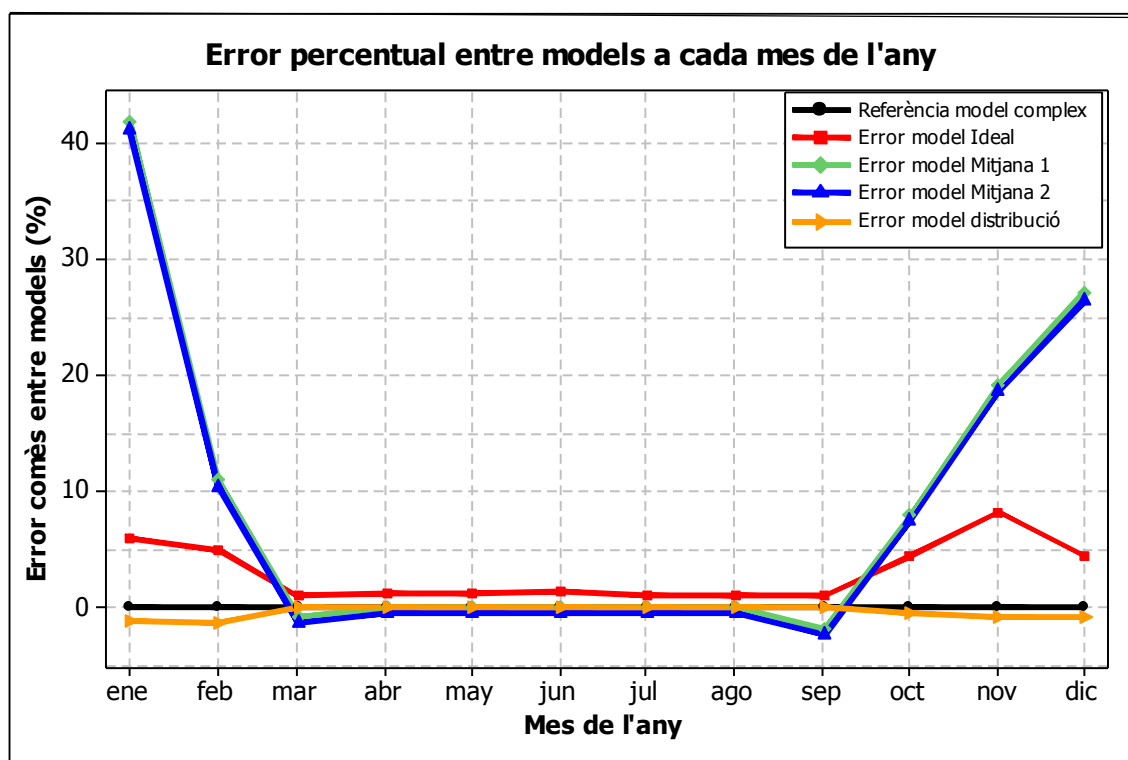
Finalment, pel que fa als altres tipus de pèrdues, exceptuant les pèrdues amb ratis constants (eficiència de l'inversor, *soiling* i transformador), es mantenen més o menys al mateix rang de valors entre els diferents models.

Anàlisi de l'energia anual generada

El fet d'haver realitzat algunes simplificacions als models a l'hora d'obtenir l'energia generada per la planta, fa que la diferència entre les pèrdues energètiques entre models no sempre afecti negativament a l'error entre energies totals calculades.

Com exemple, es pot fer referència a l'efecte que té la idealització de les pèrdues per cablejat al model mitjana 2. El fet de considerar la simplificació $\Delta V \cong \Delta P$ per al seu càlcul, fa que es cometi un error positiu de gairebé el 50% respecte a les pèrdues per cablejat del model de referència. No obstant, el fet que l'energia anual calculada amb el model mitjana sigui major al de referència, fa que un augment de les pèrdues (en aquest cas de cablejat) redueixi l'error total generat entre models.

A mode d'avaluar l'error obtingut entre energies generades al llarg de l'any s'ha analitzat el comportament de cada model a cada mes.



Gràfica 39 Error comès entre models a cada mes de l'any.

Al gràfic es pot observar una disposició mes o menys simètrica dels errors generats al llarg de l'any. Als mesos centrals on es generen menys ombres i es treballa a major potència l'error es minimitza mentre que als mesos on l'efecte de *shading* es veu incrementat l'error progressa en augment. Aquest fenomen indica una dependència entre la quantitat d'ombra generada a la planta i els models dissenyats.

Per als models mitjana és on aquest fet té més repercussió. Com s'ha vist a capítols anteriors, el fet de tenir diferents tipus de corbes fa que a mesura que augmenta el nombre de *trackers* ombrejats, la diferència entre models s'incrementi considerablement.

La resta de models no es veuen tan influenciats per l'efecte d'ombreat, fet que demostra la fluctuació més o menys constant de la recta de l'error al llarg de l'any.

Malgrat que el fet analitzat restringeixi la validesa dels models a plantes on l'efecte de *shading* sigui reduït, si s'accepta que les plantes fotovoltaïques es troben dissenyades per a evitar principalment aquests tipus de pèrdues, l'error anual comès s'aproximarà als calculats en la simulació.

	<i>One-diode (Ref)</i>	<i>Ideal</i>	<i>Mitjana 1</i>	<i>Mitjana 2</i>	<i>Distribució</i>
Energia obtinguda (MWh)	2738,83457	2795,60914	2845,030863	2830,032948	2733,08012
Performance ratio (%)	80,9962531	82,1133702	84,74151552	84,21685957	80,7942771
Error comès (%)	-	2,07294632	3,877426359	3,329824269	-0,2101057
Temps de còmput (s)	7.4006h	4.217h	2.5350 h	2.4350 h	5.4006h

Taula 19 Resum dels resultats obtinguts als diferents models proposats.

Anàlisi del temps de còmput vs error comès

Analitzant els resultats de temps obtinguts, s'observa que per a tots els models dissenyats s'ha aconseguit reduir el temps emprat per l'eina de disseny.

Pel que fa als models mitjana, tot hi tenir els errors entre models més elevats, són les propostes que permeten reduir al màxim el temps de còmput: gairebé en un 70%. Concretament, el model mitjana2 és el disseny que menys tarda a l'hora de calcular les diferents iteracions.

D'altra banda, el fet de només modificar les matrius de irradiació en el model distribució fa que l'eina només s'eviti de calcular iteracions en situacions puntuals d'ombra, cosa que es tradueix en la menor disminució de temps entre models.

Finalment, pel que fa en el model ideal, s'observa que el cost que suposa per a l'eina haver de calcular una funció implícita o explícita és realment significatiu, reduint en gairebé el 50% el temps de càlcul emprat.

9 Costos de la instal·lació fotovoltaica

El cost del cicle de vida de la planta fotovoltaica és un bon indicador per analitzar els diferents costos associats a la instal·lació en tots els seus anys de funcionament. Per a calcular-ho s'han considerat diversos paràmetres com el cost en els dispositius, el cost de desmantellament, el cost de manteniment anual, el cost d'instal·lació... Tots ells recollits a l'equació següent:

$$LCC(\text{€}) = IC + CC + \frac{DC}{(1 + DR)^t} + \sum_{any=1}^t \frac{Cap(any) \cdot LI + M \cdot (1 + I)^{any}}{(1 + DR)^{any}}$$

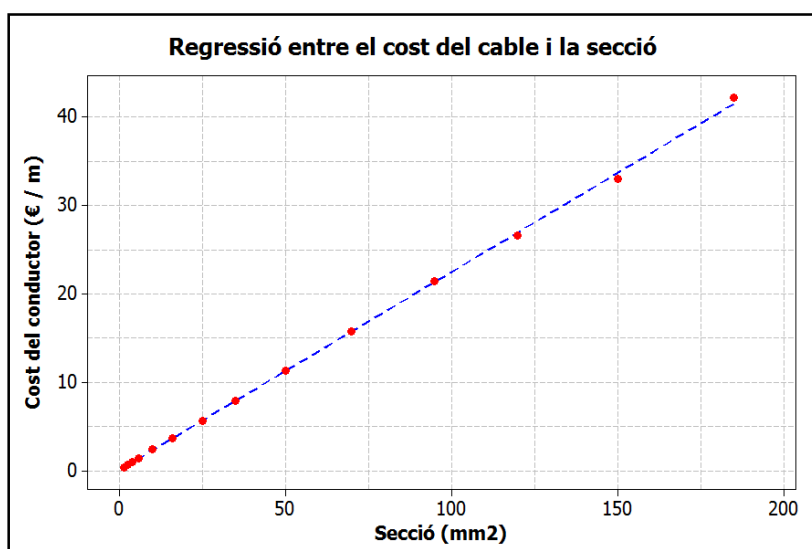
On CC és el cost dels diferents elements de la instal·lació, IC fa referència al cost associat a la instal·lació dels diferents dispositius presents a l'estació, DC és el cost de desmantellament una vegada finalitzada la vida útil de la planta (d'uns 25 anys), LI es defineix com l'interès bancari del préstec demanat, M fa referència al cost de manteniment anual de la planta, I indica el rati de inflació amb el pas dels anys, i DR és considerat com a un rati de descompte anual.

9.1 Càlcul del cost dels components de la instal·lació (CC)

Per a calcular els diferents ratis de costos dels dispositius instal·lats en la planta fotovoltaica simulada s'han emprat diferents anàlisis de viabilitat i costos d'aquests tipus d'instal·lacions.

Càlcul del cost del cablejat de la instal·lació

A mode de calcular el rati de cost dels conductors instal·lats en l'estació fotovoltaica dissenyada s'ha realitzat una regressió amb diferents preus de conductors de Cu (tipus XLPE) establerts per l'empresa *PolyCab* [15].



Gràfica 40 Regressió entre el cost del cable i la seva secció.

$$Cost(\text{€/m}) = 0,0754 + 0,2242 \cdot Secció (mm^2)$$

En la dispersió, s'observa la relació proporcional que s'estableix entre la secció del cable i el seu cost (en €/m). El rati de cost calculat per el cablejat de secció 185 mm² instal·lat en l'estació fotovoltaica és de 42,2143 €/m. En el cas de la instal·lació dissenyada, el rati es manté constant al llarg de tots el conductors instal·lats, doncs la secció es manté invariant arreu de l'estació.

Per a calcular-ne el cost total derivat, s'ha realitzat el producte de les diferents longituds que separen l'inversor dels *trackers* fotovoltaics per el rati de cost calculat.

$$C_{cables} = \sum_{i=1}^N N_{cables,i} \cdot Cost_i \cdot long_i$$

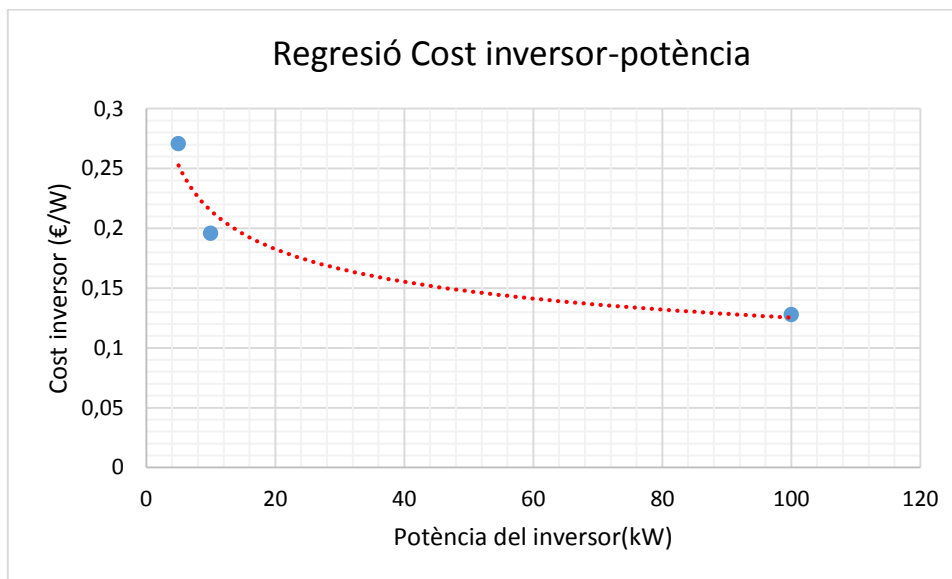
On $N_{cables,i}$ fa referència al nombre de cables que separen el *tracker* i de l'inversor central (en el nostre cas sempre serà d'una unitat), $Cost_i$ és el rati de cost calculat anteriorment, $long_i$ es defineix com la longitud del conductor que separa el *tracker* i de l'inversor.

D'aquest mode, el cost total (en €) per a la instal·lació fotovoltaica és de:

$$C_{cables} = (1 \cdot 42,2143 \cdot 20 + 2 \cdot 42,2143 \cdot 84,4 + 2 \cdot 42,2143 \cdot 107,4 + 1 \cdot 42,2143 \cdot 43 + 2 \cdot 42,2143 \cdot 130,4 + 1 \cdot 42,2143 \cdot 66) = 32648,54\text{€}$$

Càlcul del cost dels inversor

Per a calcular el cost de l'inversor s'han emprat diferents valors de costos d'aquest tipus de dispositiu presentats a la revista *PHOTON International* [16]. Els preus obtinguts es relacionaven el preu de l'inversor (en €/m) amb la potencia nominal del dispositiu instal·lat, de manera que, a mode de trobar la tendència que segueix el rati de cost dels inversors (en €/W) en el mercat, s'ha realitzat un ajust de regressió, relacionant ambdues variables.



Gràfica 41 Regressió entre el cost de l'inversor i la seva potència nominal.

$$K_{inv}(\text{€/W}) = 0,3681 \cdot Pot(kW)^{-0,234}$$

Obtinguda una relació potencial del rati de l'inversor (en €/m) en funció de la potència nominal d'aquest, es pot trobar el cost de l'inversor instal·lat en l'estació dissenyada. D'aquesta manera, per a una potència nominal de l'inversor de $P_{inv} = 250 \text{ kW}$, el rati de cost obtingut és de $K_{inv} = 0,1011 \text{ €/W}$. Finalment, per a obtenir el cost total de l'inversor implantat es calcula:

$$Cost_{inv}(\text{€}) = N_{inv} \cdot K_{inv} \cdot P_{inv} = 1 \cdot 0,1011 \cdot 250000 = 25280,63 \text{ €}$$

On N_{inv} fa referència al nombre d'inversors de la planta dissenyada, K_{inv} és el rati de cost (en €/W) trobat anteriorment, i P_{inv} és la potència nominal de l'inversor (establerta per el fabricant).

Càlcul del cost dels mòduls fotovoltaics

Igual que en el cas anterior, el rati (en €/W) del mòdul fotovoltaic s'ha obtingut de la revista PHOTON International. Així doncs, es considera un $K_{pv} = 0,604 \text{ €/W}$, valor a través del qual es calcula un cost total per als mòduls de:

$$C_{pv_mod} = N_{mod} \cdot K_{pv} \cdot P_{nom_mod} = 4860 \cdot 0,604 \cdot 200,143 = 587507,77 \text{ €}$$

On N_{mod} fa referència al nombre de mòduls que disposa la planta (en el nostre cas 9 trackers de 20x27 mòduls fotovoltaics cada un), K_{pv} és el rati de cost (en €/W) trobat a la revista consultada, i P_{nom_mod} és la potència nominal dels mòduls fotovoltaics (establerta per el fabricant).

Càlcul del cost del transformador

Per a calcular el cost que representa el transformador de la instal·lació, s'ha utilitzat com a referència l'estructura de costos d'un estudi de disseny d'una planta fotovoltaica d'1MW a la Índia [17].

A l'estudi, per a una potencia nominal de la planta de 1MW, es considera un cost per al transformador de 40866€ . A partir d'aquests valors, es troba un rati de cost per el transformador de $K_{trafo}(\text{€/kW}) = 40,866\text{€/kW}$.

Per el nostre cas, el cost total del dispositiu transformador, és calculat com:

$$Cost_{trafo}(\text{€}) = N_{trafo} \cdot K_{trafo} \cdot P_{nom} = 39807,15\text{€}$$

On N_{trafo} fa referència al nombre de transformadors utilitzats en la planta, K_{trafo} és el rati de cost (en €/kW) trobat anteriorment, i P_{nom} és la potencia nominal de la planta dissenyada.

Càlcul del cost SCADA

El sistema de software i comunicació d'informació que disposa la planta també representa un cost significatiu en la construcció d'una instal·lació fotovoltaica. De la mateixa manera que al càlcul del transformador, s'ha pres com a referència el mateix estudi realitzat a una planta de la Índia. Així doncs, per a l'estació d'1MW de potència nominal s'estableix un

cost de 13700€, a través del qual es càlcul que es rati per a aquest tipus de costos és de $K_{scada}(\text{€/kW}) = 13,7\text{€/kW}$.

$$Cost_{scada}(\text{€}) = K_{scada} \cdot P_{nom} = 13325,92\text{€}$$

On K_{scada} és el rati de cost (en €/kW) trobat anteriorment, i P_{nom} és la potencia nominal de la planta dissenyada.

Altres costos

En la instal·lació existeixen altres tipus de dispositius dedicats a realitzar tasques concretes dintre de l'estació, com poden ser els elements de protecció de la instal·lació, l'encapsulat d'unió del cablejat abans de arribar a l'inversor (*junction box*), les estructures de suport dels mòduls fotovoltaics...

El cost d'aquets dispositius secundaris però també presents a l'estació fotovoltaica s'ha considerat com un rati de cost de 1,25€ per a cada Watt generat a la planta.

$$Cost_{altres}(\text{€}) = K_{altres} \cdot P_{nom} = 1,25 \cdot 20 \cdot 27 \cdot 9 \cdot 200,73 = 1219434,75 \text{ €}$$

Cost total dels components

Després d'haver calculat els diferents costos associats als diferents components dels dispositius de la planta, es troba el cost conjunt que representen els diferents elements instal·lats.

$$CC = C_{cables} + C_{pv_{mod}} + Cost_{inv} + Cost_{trafo} + Cost_{scada} + Cost_{altres} = 1918004,76\text{€}$$

9.2 Cost d'instal·lació dels components de la planta (IC)

Al càlcul del cost per components de la planta anterior, no s'han tingut en compte els costos associats per a la seva instal·lació. Quest tipus de despesa econòmica es considera el 10% del cost dels dispositius:

$$IC = 10\% \cdot CC = 0,1 \cdot 1918004,76 = 191800,48\text{€}$$

9.3 Cost de desmantellament (DC)

Quan acaba la vida útil de la planta, definida de 25 anys, la instal·lació fotovoltaica s'ha de desmantellar. Prenent de referència l'estudi de costos de la planta fotovoltaica d'una instal·lació a la Índia, el cost de desmantellament de la instal·lació s'ha considerat el 15% del cost total dels dispositius de la instal·lació.

$$DC = 15\% \cdot CC = 0,15 \cdot 1918004,76 = 287700,71\text{€}$$

9.4 Cost associat al interès bancari anual (CP)

De forma general, les grans inversions requereixen un préstec sota interessos a una entitat bancària. El cost anual que representa aquests tipus d'interessos s'ha calculat com el percentatge d'interès (definit com a un 5%) de la suma dels costos inicials per a implantar l'estació fotovoltaica (components i instal·lació).

$$CP = Cap(\text{any}) \cdot LI = \frac{CC + IC}{any} \cdot LI = \frac{2109805,20}{any} \cdot 5\%$$

9.5 Cost de manteniment anual de la instal·lació (M)

El cost de manteniment de la instal·lació es considera un 1% dels costos dels dispositius de la planta i la seva instal·lació:

$$M = 1\% \cdot (CC + IC) = 21098,05\text{€}$$

9.6 Càlcul del cost total de cycle de vida de la instal·lació (LCC)

A la introducció d'aquest capítol s'ha esmentat la impotència que té el cost del cycle de vida d'una planta. Per a calcular-la, i una vegada havent obtingut els diferents paràmetres de cost associats a l'equació, s'ha considerat un cycle de vida d'uns 25 anys, tal hi com s'observa al càlcul següent:

$$LCC(\text{€}) = IC + CC + \frac{DC}{(1+DR)^t} + \sum_{any=1}^t \frac{Cap(any) \cdot LI+M \cdot (1+I)^{any}}{(1+DR)^{any}} = 191800,48 +$$

$$1918004,76 + \frac{287700,71}{(1+0,05)^{25}} + \sum_{any=1}^{t=25} \left(\frac{\frac{2109805,20}{any} \cdot 0,05 + 21098,05 \cdot (1+0,03)^{any}}{(1+0,05)^{any}} \right) = 191800,48 +$$

$$1918004,76 + 84958,82 + 720322,12 = 2915086,18\text{€}$$

9.7 Càlcul del període de retorn de la inversió per a diferents models

Per al càlcul del cycle de treball de la planta dissenyada s'han utilitzat els valors nominals dels diferents dispositius instal·lats. Aquest fet es tradueix en que els valors calculats anteriorment coincidiran per a qualsevol dels models de simulació dissenyats, doncs no es depèn de l'energia total obtinguda.

A mode de calcular el període de retorn de la inversió que suposa la planta, primerament s'ha calculat el rati de cost per MW produït (LCOE) dels diferents models dissenyats. Aquest paràmetre és un bon indicador per a saber el que costa produir una certa quantitat d'energia i depèn directament de la potència total produïda i del cost la planta al llarg del seu període de funcionament.

$$LCOE_{complex} = \frac{LCC}{PEA} = \frac{2915086,18}{61561,93} = 47,35 \text{ €/MW}$$

$$LCOE_{ideal} = \frac{LCE}{PEA} = \frac{2915086,18}{62838,07} = 46,39 \text{ €/MW}$$

$$LCOE_{mitjana1} = \frac{LCE}{PEA} = \frac{2915086,18}{63948,94} = 45,58 \text{ €/MW}$$

$$LCOE_{mitjana2} = \frac{LCE}{PEA} = \frac{2915086,18}{63611,83} = 45,83 \text{ €/MW}$$

$$LCOE_{distribucio} = \frac{LCE}{PEA} = \frac{2915086,18}{61432,58} = 47,45 \text{ €/MW}$$

El fet de que l'energia anual obtinguda per als diferents models no disti molt del model one-diode, es tradueix en poques diferències en el cost per MW calculat.

Seguidament, i tal hi com s'observa a la taula de continuació, s'ha calculat el VAN respectiu de cada model. Per una banda, el fet que el cost de vida de la instal·lació (LCC) s'hagi calculat tenint en compte la inflació a cada any de la vida útil de la planta, fa que el valor calculat es pugui considerar com a la inversió inicial. D'altra banda, per a calcular els ingressos bruts que obté la planta per a un any de funcionament, s'ha considerat un preu de venda de l'energia produïda de 0,2€/kWh [18]. A més, s'ha tingut en compte la reducció de la producció anual de la planta amb el pas dels anys, definint un rati de degradació del -0,8%/any.[13] Finalment, es considera una tributació d'un total del 25, corresponent al 21% d'IVA i el 4% en concepte de l'impost sobre la electricitat [19].

ANY	0	1	2	3	4	5	6	7	8
One-diode									
Producció Trimestral		2738,835	2733,357	2727,890	2722,434	2716,990	2711,556	2706,132	2700,720
Inversió inicial (€)	-2915086,180								
Ingressos bruts (€)		547766,914	546671,380	545578,037	544486,881	543397,908	542311,112	541226,490	540144,037
Tributació (21+4) %		-136941,729	-136667,845	-136394,509	-136121,720	-135849,477	-135577,778	-135306,622	-135036,009
VAN	-2776272,552	404090,346	396670,983	389387,843	382238,427	375220,279	368330,989	361568,190	354929,561
VAN acumulat	-2776272,552	-2372182,206	-1975511,223	-1586123,380	-1203884,953	-828664,674	-460333,685	-98765,495	256164,066
Ideal									
Producció Trimestral		2795,609	2790,018	2784,438	2778,869	2773,311	2767,765	2762,229	2756,705
Inversió inicial (€)	-2915086,180								
Ingressos bruts (€)		559121,828	558003,584	556887,577	555773,802	554662,254	553552,930	552445,824	551340,932
Tributació (21+4) %		-139780,457	-139500,896	-139221,894	-138943,451	-138665,564	-138388,232	-138111,456	-137835,233
VAN	-2776272,552	412466,922	404893,759	397459,644	390162,025	382998,394	375966,292	369063,305	362287,060
VAN acumulat	-2776272,552	-2363805,630	-1958911,871	-1561452,227	-1171290,202	-788291,808	-412325,516	-43262,212	319024,849
Mitjana1									
Producció Trimestral		2845,031	2839,341	2833,662	2827,995	2822,339	2816,694	2811,061	2805,439
Inversió inicial (€)	-2915086,180								
Ingressos bruts (€)		569006,173	567868,160	566732,424	565598,959	564467,761	563338,826	562212,148	561087,724
Tributació (21+4) %		-142251,543	-141967,040	-141683,106	-141399,740	-141116,940	-140834,706	-140553,037	-140271,931
VAN	-2776272,552	419758,652	412051,608	404486,070	397059,441	389769,169	382612,751	375587,730	368691,693
VAN acumulat	-2776272,552	-2356513,900	-1944462,293	-1539976,223	-1142916,782	-753147,613	-370534,862	5052,869	373744,562
Mitjana2									
Producció Trimestral		2830,033	2824,373	2818,724	2813,087	2807,461	2801,846	2796,242	2790,649
Inversió inicial (€)	-2915086,180								
Ingressos bruts (€)		566006,590	564874,576	563744,827	562617,338	561492,103	560369,119	559248,380	558129,884
Tributació (21+4) %		-141501,647	-141218,644	-140936,207	-140654,334	-140373,026	-140092,280	-139812,095	-139532,471
VAN	-2776272,552	417545,845	409879,429	402353,774	394966,295	387714,455	380595,763	373607,775	366748,092
VAN acumulat	-2776272,552	-2358726,708	-1948847,278	-1546493,504	-1151527,209	-763812,754	-383216,991	-9609,216	357138,876
Distribució									
Producció Trimestral		2733,080	2727,614	2722,159	2716,714	2711,281	2705,858	2700,447	2695,046
Inversió inicial (€)	-2915086,180								
Ingressos bruts (€)		546616,024	545522,792	544431,746	543342,883	542256,197	541171,685	540089,341	539009,163
Tributació (21+4) %		-136654,006	-136380,698	-136107,937	-135835,721	-135564,049	-135292,921	-135022,335	-134752,291
VAN	-2776272,552	403241,329	395837,554	388569,717	381435,322	374431,919	367557,104	360808,514	354183,834
VAN acumulat	-2776272,552	-2373031,223	-1977193,669	-1588623,952	-1207188,630	-832756,711	-465199,607	-104391,092	249792,741

Taula 20 Càlcul del VAN per als diferents models simulats.

Analitzant el VAN acumulat obtingut per als models dissenyats, es comprova que per a tots ells la inversió comença a obtenir beneficis passat als 3 anys. Més concretament, els períodes de retorn per als diferents models són:

<i>MODEL</i>	<i>ONE-DIODE</i>	<i>IDEAL</i>	<i>MITJANA1</i>	<i>MITJANA2</i>	<i>DISTRIBUCIÓ</i>
<i>Payback</i> <i>(any i mes)</i>	7 anys i 2 mesos	7 anys i 2 mesos	6 anys i 11 mesos	7 anys i 1 mes	7 anys i 2 mesos

Taula 21 Període de retorn de la inversió per als diferents models simulats.

Analitzant el VAN calculat a 5 anys, s'observa que les diferències entre models són proporcionals a l'error comès en l'energia anual calculada. Finalment, s'observa que per als 5 models dissenyats, el *payback* de la inversió només varia en un mes, fet que indica que els errors d'energia entre models calculats anteriorment no són significatius a l'hora de calcular els diferents paràmetres de la inversió.

10 Scripts dissenyats per a l'eina

Durant les diverses simulacions i anàlisis realitzats durant els capítols anteriors, s'ha anat introduint els diferents scripts programats per a obtenir els resultats. Tots ells han estat dissenyats amb Matlab, una eina de càlcul matemàtic dotat d'un llenguatge de programació que permet executar conjunts d'accions mitjançant un conjunt de funcions implícites al programa.

A continuació, es presentaran i detallaran els *scripts* més importants que permeten obtenir els diferents resultats exposats amb anterioritat.

Script seccio.m

El programa dissenyat té per objectiu el càlcul de la secció i el material òptim del cablejat utilitzat per una planta amb unes prestacions determinades. Es basa en la programació dels criteris de màxima intensitat i voltatges admissibles, ja explicats anteriorment al calcular les pèrdues de potència als conductors de la instal·lació.

Com a *inputs* o variables d'entrada de l'*script* s'han definit les temperatures ambient, de la instal·lació i la del conductor, la longitud del cable a dissenyar, els valors I_{pmp} i V_{pmp} , les conductivitats de les dues opcions de material (Cu i Al) i la taula A.52.1-bis. (veure annex A)

El mode de funcionament de l'*script* es basa en realitzar un recorregut, una vegada calculats els diferents paràmetres que defineixen els criteris de corrent i voltatge, de la taula de seccions òptimes en funció de la intensitat que ha de passar per els conductors.

El resultat del programa o *output* és un *string* de paraules on s'indica el nombre de conductors (disposats en paral·lel) que es necessiten per a la longitud indicada, i el valor de la secció òptima, calculada com la secció mínima trobada entre ambdós criteris. (veure annex E.1)

Script marroc.m

Per a analitzar els efectes de la temperatura i irradiació en les corbes característiques de un mòdul fotovoltaic, s'ha dissenyat l'*script marroc.m*. Com a variables d'entrada s'han definit diferents paràmetres que caracteritzen el funcionament del mòdul fotovoltaic (temperatura de funcionament, potència nominal, voltatge en buit, factors correctors del voltatge i de la intensitat, nombre de cel·les per mòdul...).

El mètode de funcionament de l'*script* es basa en realitzar una lectura d'una base de dades, situada al mateix directori que el programa, on hi ha situats les dades (ordenades per a cada

hora de l'any) de irradiació i temperatura ambient de un lloc en concret, de manera que, per a un pas de voltatge determinat, es va avaluant la equació característica del model one-diode per als diferents valors de temperatura i irradiació.

El que s'obté és una matriu de vectors, corresponents als valors de la intensitat de sortida de la corba per a cada hora del dia. A més, per a trobar els punts de funcionament de la corba es calcula l'àrea màxima que es deixa en un punt determinat de la corba V-I. (veure annex E.2)

Script ShadowsData1.m

Per realitzar la simulació de la planta dissenyada en els apartats anteriors utilitzant el model one-diode, s'ha programat un *script* dedicat al càlcul de les corbes característiques dels diferents *trackers* de la planta.

Els *inputs* del programa defineixen les diferents característiques dels *trackers*: valor de voltatge en buit dels mòduls que el conformen, nombre de mòduls en sèrie i en paral·lel, intensitat de curtcircuit, temperatura de funcionament de la cel·la, temperatura ambient, valor de les resistències... A més, s'utilitza una matriu de irradiacions (*GDATA.mat*), ja explicada durant la simulació, que defineix la distribució de irradiacions i ombres en els diferents mòduls del *tracker* per a cada hora i dia de un any natural.

Igual que a l'*script* anterior, el mode de funcionament de l'*script* dissenyat es basa en el recorregut de la matriu de irradiacions per a cada hora de la simulació. A partir de una distribució de irradiacions concreta, s'obté els valors de les diferents irradiacions que conté la matriu, així com el nombre de cel·les assolellades i ombrejades que disposa el *tracker*. Seguidament, i per a un pas de voltatge determinat, es calculen, fent ús de l'equació del model one-diode, els valors de intensitat de la corba característica que defineixen cada un dels *strings* amb irradiació diferent a la matriu,

Una vegada obtinguts els diferents vectors de les intensitats de sortida dels diferents grups d'*strings* fotovoltaics, es van combinant entre ells a mode d'obtenir la corba total, tal hi com s'ha explicat a l'apartat 5.1. Així doncs, l'*script* dissenyat ja calcula implícitament l'efecte d'ombratge en els diferents dispositius fotovoltaics.

Finalment, com a *output* del programa s'obté una matriu de vectors que contenen les intensitats de sortida de la corba total del *tracker*, per a cada hora de funcionament de l'any simulat. (veure annex E.3)

Scripts ShadowsDataIdeal.m, , ShadowsDistribucio.m

Els scripts per a simular el model ideal i el de canvi de distribució usen la mateixa estructura que l'explicat anteriorment, fent ús de les mateixes variables d'entrada

D'una banda, per al model ideal, l'únic que canvia és l'equació característica del model, usada per a calcular els diferents corrents de sortida. D'altra banda, per a calcular les corbes característiques de la planta en el model distribució (en les 5 variants de canvis de distribució explicades) s'usa el mateix conjunt d'equacions que al model one-diode. El que canvia és la modificació prèvia de la matriu de irradiacions d'entrada (eliminació de la fila de transició, disminució de la zona ombrejada...).

Per a ambdós models, i tal hi com s'ha pogut comprovar, s'aconsegueix reduir el temps utilitzat per a l'eina de disseny a causa de la resolució d'una equació més senzilla (per el cas ideal) i a causa de la reducció del nombre d'iteracions a realitzar (en el cas del model distribució).

Script ShadowsMitjana.m

Per al disseny d'aquest *script* s'han utilitzat les mateixes variables d'entrada que per als programes destinats a realitzar la simulació de la planta. No obstant, el fet de no considerar l'efecte d'ombratge en el càlcul de les corbes característiques fa que l'estructura canviï.

El mode de funcionament del programa també es troba basat en el recorregut per dies i hores de la matriu de irradiacions *GDATA.mat*. Ara bé, a l'hora de calcular la corba de funcionament representativa del circuit fotovoltaic es pren una única irradiació, corresponent a la mitjana de irradiacions del *tarcker* a calcular.

Com a variable de sortida de l'*script* és manté la matriu de vectors que contenen les intensitats de sortida de la corba característica, per a cada dia i hora simulada. (*veure annex E.4*)

Script puntFuncionament.m

Una vegada obtinguts les matrius resultants per als diferents scripts de simulació, s'ha dissenyat el programa que calcula el punt de funcionament de cada corba característica de cada dia i hora simulada.

Com a variables d'entrada, l'*script* utilitza les matrius resultat de les simulacions dels diferents models, a més dels valors de voltatge que defineixen el rang de l'inversor de la planta (establerts per el fabricant).

Per a calcular els diferents punts de funcionament s'han anat recorrent els diferents punts de les corbes característiques de cada dia simulat per a cada model, guardant en una variable el valor de voltatge i intensitat que maximitza el producte d'ambdues variables.

Finalment, el programa defineix com a variables de sortida els punts de funcionament (per a les tres variables V,I i P) de les diferents corbes recorregudes. El resultat es dona en forma de matrius de llargària (hores simulats X dies simulats) a mode de facilitar la seva posterior manipulació i interpretació. (*veure annex E.5*)

Conclusions

Gràcies a la realització d'aquest projecte, es pot determinar que existeixen diverses vies de millora per a l'eina analitzada. Totes elles redueixen en més d'un 40% el temps de càlcul emprat per a l'eina, mantenint un error per als resultats que es troba dintre d'uns límits acceptables.

D'una banda, s'ha observat amb la implantació del model mitjana, que no sempre és necessari conèixer la totalitat de la corba característica de la planta, doncs es pot predir el seu funcionament realitzant una sèrie de consideracions. A més, gràcies a l'estudi del model de canvi de distribucions, es comprova la poca influència que tenen les zones de transició d'ombra sobre el posterior càlcul energètic i econòmic. Finalment, es pot concloure que la diferència entre el model real i l'ideal, en una situació de temperatura i irradiació determinades, es manté constant al llarg de diferents valors de potència (en la simulació realitzada, al llarg d'un 5% per al model ideal sense corregir).

D'altra banda, el fet d'haver aconseguit realitzar idealitzacions del model one-diode amb diferències relativament petites, es tradueix en uns impactes energètics i econòmics minúsculs. S'ha observat que el màxim error obtingut en la energia anual calculada ha estat del voltant d'un 3,8%. A més, s'ha confirmat que els beneficis anuals obtinguts amb els diferents models no disten molt entre si, fet que es tradueix en diferències inferiors a un mes pel que fa al període de retorn.

Per finalitzar, es pot concloure que en un procés de disseny no sempre prima aconseguir els resultats més exactes, sobretot si això implica un cost derivat, com és el cas de l'augment del temps de càlcul. D'aquest mode, les propostes d'optimització proposades per a la eina redueixen estretament la fidelitat dels resultats però, no obstant, aconsegueixen a arribar a valors acceptables per a paràmetres energètics i econòmics, tot emprant un temps molt menor.

Pressupost

El treball exposat es basa en l'anàlisi, programació i millora de una eina de disseny per a càlculs fotovoltaics, implementada amb el programa de càlcul matemàtic MATLAB. D'aquesta manera, el pressupost del projecte es separa en els costos associats per a la compra de la eina, juntament amb el software emprat i els costos de temps emprat per el seu disseny i implementació.

Pressupost del programari

La taula següent mostra el pressupost destinat a la compra del software necessari per a implementar la eina.

Concepte	Preu Unitari	Unitats	TOTAL
Sotware Matlab	2100 €	1	2100
TOTAL			2100 €

Gràfica 31 Pressupost del programari utilitzat per a l'eina de disseny.

Pressupost dels recursos humans

La taula de continuació detalla el pressupost destinat al temps emprat en les diferents fases del projecte, definint un cost de treball 40€/h.

Concepte	Preu (€/h)	Hores de treball	TOTAL
Anàlisi i disseny	40 € /h	100 h	4000 €
Programació	40 € /h	120h	4800 €
Avaluació dels resultats i conclusions	40 € /h	80h	3200 €
Redacció de la memòria	40 € /h	70h	2800 €
TOTAL		370 h	14800 €

Gràfica 32 Pressupost destinat a les hores de treball dedicades.

Pressupost total del projecte

A continuació s'exposa el total del pressupost contingut del projecte, tenint en compte la tributació corresponent per a un projecte d'enginyeria.

CONCEPTE	TOTAL
Cost de programari	2100
Cost de recursos humans	14800
TOTAL (sense IVA)	16900
IVA (21%)	3549
TOTAL (amb IVA)	20449 €

Gràfica 33 Pressupost total del projecte.

Bibliografia

- [1] “Energía Solar en España 2007. Estado Actual y Perspectivas”. IDAE 2007.
- [2] Green M.A.N, *Solar cells: operating principles, technology, and system application*, 1981.
- [3] N. R. Melchor, F. R. Quintela, R. C. Redondo, J. M. G. Arévalo, *Electrical security in photovoltaic plants connected to low voltage networks* - Universidad de Salamanca, 2002.
- [4] M.G Villalva, J.R Gazoli, *Comprehensive Approach to Modeling and simulation of photovoltaic arrays*, IEEE Transactions on power electronics, VOL. 24, NO. 5, May 2009.
- [5] H.Tian, F.Mancilla, E. Muljadi, *A detailed performance model for photovoltaic Systems*, Solar Energy Journal, July 2012.
- [6] A.Chouder, *Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis*, Energy Conversion and Management VO. 51 NO. 10, October 2010, Pages 1929 – 1937.
- [7] E.Díaz-Dorado, J.Cídrás, C.Carrillo, *Discrete I-V model for partially shaded PV-arrays*, Universitat de Vigo, 29 de Gener 2014.
- [8] H.Patel, V.Agarwal, *MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics*, IEEE Transactions on energy conversion, VOL. 23, NO. 1, March 2008.
- [9] L.Recio, *Optimal Cable sizing in PV systems: case study*, ECI publication No CU0167
- [10] *Grid-Connected PV systems. System design guidelines*, SEI-API Sustainable Energy, September 2012
- [11] Michael Gostein, J. Riley Caron, and Bodo Littmann., *Measuring Soiling Losses at Utility-Scale PV Power Plants*, Proceedings of the 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2014. Denver.
- [12] Michael Gostein, Bodo Littmann, J. Riley Caron, and Lawrence Dunn , *Comparing PV Power Plant Soiling Measurements Extracted from PV Module Irradiance and Power Measurements*, Proceedings of the 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2013, Tampa.

- [13] *Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Solar Energy Journal, June 2012.
- [14] ABB Company, *ABB solar inverters for photovoltaic systems. Helping you get more energy out of every day*, 2012.
- [15] Polycab wires pvt. Ltd, *LIST PRICE NO 06*, 2013-14 effective 15th Nov 2013
- [16] *PHOTON International: The solar power magazine* , 9/2014.
- [17] Amrit Mandal , *Design & estimation of 1 MW utility Scale Solar PV Power Plant: Technical & Financial*.
- [18] Pablo Pintos, *Reconsiderando los costes economicos de la fotovoltaica*, Economincs for Energy, 28 May 2012.
- [19] Promein Abogados, *Tributación del productor solar fotovoltaico*, 2014.










Sumari d'annexos

Annex A: Documents per al disseny del cablejat	98
A.1 Taula A.52-1 bis.....	98
Annex B: Resultats simulació model ideal.....	99
B.1 Taula d'error de la potència entre model ideal i one-diode	99
B.2 Taula d'error de la potència entre model ideal corregit i one-diode	100
Annex C: Resultats simulació model mitjana.....	101
C.1 Taula d'error de la potència entre model complex i mitjana sense corregir	101
Annex D: Resultats simulació model distribució	102
D.1 Taula d'error de la energia entre model one-diode i distribució.....	102
Annex E: Scripts de l'eina de disseny	103
E.1 Script seccio.m	103
E.2 Script marroc.m	104
E.3 Script ShadowsData1.m	105
E.4 Script ShadowsMitjana.m	107
E.5 Script PuntDeFuncionament.m	108

Annex A: Documents per al disseny del cablejat

A.1 Taula A.52-1 bis

Tabla 52-B1 y A.52-1 bis. (UNE 20460-5-523:20004)

Instalación de referencia		Tabla y columna Intensidad admisible para los circuitos simples				Método de instalación	Número de conductores cargados y tipo de aislamiento												
		Aislamiento PVC		Aislamiento XLPE-EPR			AI	PVC3	PVC2	PVC2	XLPE3	XLPE2	XLPE3	XLPE2	XLPE3	XLPE2	XLPE3	XLPE2	XLPE3
		2	3	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	Conductores aislados en un conducto en una pared térmicamente aislante	A1	columna 4	columna 3	columna 7	columna 6													
	Cable multiconductor en un conducto en una pared térmicamente aislante	A2	columna 3	columna 2	columna 6	columna 5													
	Conductores aislados en un conducto sobre una pared de madera/map.	B1	columna 6	columna 5	columna 10	columna 8													
	Cable multiconductor en un conducto sobre una pared de madera/map.	B2	columna 5	columna 4	columna 8	columna 7													
	Cables unipolares; o multipolares sobre una pared de madera/map.	C	columna 8	columna 6	columna 11	columna 9													
	Cable multiconductor en conductos enterrados	D	columna 3	columna 4	columna 5	columna 6													
	Cable multiconductor al aire libre. Distancia al muro ≥ a 0,3 veces ϕ del cable	E	columna 9	columna 7	columna 12	columna 10													
	Cables unipolares en contacto al aire libre. Distancia al muro ≥ ϕ del cable	F	columna 10	columna 8	columna 13	columna 11													
	Cables unipolares espaciados al aire libre. Distancia entre ellos ≥ el ϕ del cable	G	—	Ver UNE 20460-5-523	—	Ver UNE 20460-5-523													
XLPE: Polietileno reticulado (90 °) • EPR: Etileno-propileno (90 °) • PVC: Policloruro de vinilo (70 °) www.tuveras.com							Cobre S (mm²) 1,5 11 11,5 13 13,5 15 16 16,5 19 20 21 24 - 2,5 15 16 17,5 18,5 21 22 23 26 26,5 29 33 - 4 20 21 23 24 27 30 31 34 36 38 45 - 6 25 27 30 32 36 37 40 44 46 49 57 - 10 34 37 40 44 50 52 54 60 65 68 78 - 16 45 49 54 59 66 70 73 81 87 91 105 - 25 59 64 70 77 84 88 95 103 110 118 123 140 35 - 77 86 96 104 110 119 127 137 144 154 174 50 - 94 103 117 125 133 145 156 167 175 188 210 70 - - 149 160 171 185 199 214 224 244 269 95 - - 180 194 207 224 241 259 271 296 327 120 - - 208 225 240 260 280 301 314 348 380 150 - - 236 260 278 299 322 343 363 404 438 185 - - 268 297 317 341 368 391 415 464 500 240 - - 315 350 374 401 435 468 490 562 590 Aluminio 2,5 11,5 12 13,5 14 16 17 18 20 20 22 25 4 15 16 18,5 19 22 24 24 26,5 27,5 29 35 6 20 21 24 25 28 30 31 33 36 38 45 - 10 27 28 32 34 38 42 42 46 50 53 61 - 16 36 38 42 46 51 56 57 63 68 70 83 - 25 46 50 54 61 64 71 72 78 84 88 94 105 35 - 61 67 75 78 88 89 97 104 109 117 130 50 - 73 80 90 98 106 108 118 127 133 145 160 70 - - 116 122 136 139 151 162 170 187 206 95 - - 140 148 167 169 183 197 207 230 251 120 - - 162 171 193 196,5 213 228 239 269 293 150 - - 187 197 223 227 246 264 277 312 338 185 - - 212 226 236 259 281 301 316 359 388 240 - - 248 265 300 306 332 355 372 429 461 Cu: ρ ₂₀ = 1/56 Al: ρ ₂₀ = 1/35 ρ ₂₀ = 1,2 ρ ₂₀ ρ ₂₀ = 1,28 ρ ₂₀ B: 5-1 ₁ C: 10-1 ₁ D: 20-1 ₁ K = I-1/S: Cu: 115 / 103 Al: 76 / 68 Cu: 143 Al: 94												

Annex B: Resultats simulació model ideal

B.1 Taula d'error de la potència entre model ideal i one-diode

DIA / HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Error P (%)
1	162,048	5,407	10,020	6,957	4,805	4,773	5,202	5,309	5,123	4,438	122,862	30,631
2	93,480	4,644	5,331	5,431	5,332	5,149	5,128	5,312	5,201	4,433	94,234	21,243
3	88,990	4,644	5,398	5,495	5,364	5,206	5,267	5,384	5,293	4,477	68,050	18,506
4	83,162	4,656	5,446	5,522	5,389	5,234	5,286	5,409	5,344	4,516	52,429	16,581
5	99,023	4,643	5,399	5,500	5,367	5,178	5,273	5,383	5,304	4,498	48,740	17,664
6	123,418	4,635	5,256	5,418	5,307	4,849	4,713	4,984	5,241	4,415	45,448	19,426
7	90,355	4,852	4,991	5,396	5,324	5,166	5,222	5,420	5,341	4,553	32,606	15,384
8	89,430	4,646	5,413	5,490	5,433	5,190	5,073	5,380	5,356	4,521	47,054	16,635
9	83,911	4,652	5,222	4,792	5,815	4,716	5,122	4,744	5,011	4,424	57,449	16,896
10	194,981	6,306	4,850	4,756	4,753	4,984	4,732	4,644	5,352	4,474	26,727	24,233
11	89,590	4,643	5,414	4,865	4,891	5,121	6,452	5,215	5,456	4,461	50,325	16,949
12	85,639	4,655	5,456	5,570	5,436	5,271	5,341	5,488	5,433	4,667	20,815	13,979
13	73,876	4,676	5,501	5,616	5,459	5,291	5,367	5,505	5,473	4,731	18,988	12,771
14	81,733	4,631	5,439	5,593	5,368	5,232	5,315	5,475	5,430	4,719	18,410	13,395
15	216,258	4,809	5,294	5,477	5,332	5,204	5,065	5,333	4,952	4,531	32,147	26,764
16	322,738	23,290	4,698	4,612	4,754	4,734	4,707	4,774	4,872	4,374	99,718	43,934
17	106,377	4,908	4,537	6,830	8,384	5,332	4,960	5,369	5,288	4,562	20,669	16,111
18	66,599	4,634	5,418	5,612	5,448	5,304	5,384	5,496	5,441	4,728	15,489	11,778
19	57,544	4,644	5,448	5,615	5,462	5,305	5,296	5,506	5,478	4,795	13,980	10,825
20	52,623	4,633	5,465	5,570	5,517	5,315	5,376	5,244	5,110	4,373	3602,012	336,476
21	21,008	11,480	4,682	5,274	5,426	5,490	5,601	5,553	4,915	12,145	0,000	7,416
22	43,502	4,698	4,536	5,728	5,546	5,370	5,422	5,568	5,560	4,931	11,717	9,325
23	47,545	4,676	5,499	5,495	5,503	5,381	5,417	5,455	5,479	4,876	12,342	9,788
24	67,365	4,675	5,527	5,693	5,528	5,383	5,439	5,566	5,555	4,968	10,411	11,465
25	77,554	4,633	5,694	4,910	4,997	5,336	5,423	5,536	5,529	4,953	9,813	12,216
26	35,795	4,742	5,654	5,789	5,630	5,463	5,522	5,661	5,681	5,143	8,611	8,517
27	30,212	4,777	5,731	5,836	5,668	5,494	5,555	5,700	5,732	5,234	7,696	7,967
28	29,909	4,765	5,702	5,830	5,656	5,487	5,549	5,691	5,717	5,199	8,204	7,973
29	30,920	4,747	5,649	5,807	5,656	5,498	5,543	5,686	5,681	5,133	8,008	8,030
30	34,244	4,728	5,602	5,798	5,656	5,505	5,557	5,690	5,640	5,046	8,579	8,368
31	27,379	4,783	5,702	5,846	5,683	5,535	5,579	5,712	5,676	5,178	7,570	7,695
Error P (%)	87,329	5,591	5,483	5,552	5,480	5,242	5,319	5,393	5,376	4,952	147,777	25,772

B.2 Taula d'error de la potència entre model ideal corregit i one-diode

DIA / HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Error P corr (%)
1	148,683	0,031	4,409	1,502	0,540	0,570	0,163	0,062	0,238	0,889	111,496	24,417
2	83,612	0,693	0,041	0,054	0,040	0,213	0,233	0,059	0,165	0,893	84,328	15,485
3	79,352	0,693	0,023	0,115	0,009	0,160	0,102	0,010	0,077	0,851	59,480	12,806
4	73,821	0,681	0,069	0,141	0,014	0,133	0,084	0,034	0,029	0,814	44,655	10,952
5	88,873	0,694	0,023	0,119	0,007	0,186	0,096	0,008	0,067	0,831	41,155	12,005
6	112,024	0,701	0,112	0,042	0,063	0,498	0,627	0,370	0,126	0,910	38,030	13,955
7	80,647	0,495	0,363	0,021	0,048	0,198	0,145	0,043	0,032	0,779	25,843	9,874
8	79,769	0,691	0,037	0,110	0,056	0,174	0,286	0,006	0,017	0,809	39,554	11,046
9	74,532	0,686	0,144	0,552	0,419	0,625	0,240	0,598	0,345	0,901	49,419	11,678
10	179,937	0,884	0,497	0,587	0,590	0,370	0,609	0,693	0,021	0,854	20,263	18,664
11	79,921	0,693	0,038	0,483	0,459	0,240	1,023	0,151	0,078	0,866	42,659	11,510
12	76,172	0,683	0,077	0,186	0,059	0,098	0,031	0,108	0,056	0,671	14,653	8,436
13	65,009	0,662	0,120	0,230	0,080	0,079	0,007	0,124	0,094	0,610	12,919	7,267
14	72,465	0,705	0,062	0,207	0,006	0,135	0,056	0,095	0,053	0,622	12,371	7,889
15	200,129	0,536	0,076	0,098	0,040	0,161	0,293	0,039	0,401	0,800	25,407	20,725
16	301,178	17,002	0,642	0,723	0,589	0,607	0,633	0,569	0,477	0,949	89,533	37,537
17	95,851	0,443	0,795	1,382	2,857	0,040	0,393	0,005	0,082	0,771	14,515	10,648
18	58,102	0,702	0,042	0,225	0,070	0,066	0,009	0,116	0,064	0,613	9,599	6,328
19	49,510	0,693	0,070	0,229	0,084	0,066	0,074	0,125	0,098	0,549	8,167	5,424
20	44,840	0,703	0,087	0,186	0,136	0,056	0,002	0,123	0,251	0,950	3413,209	314,595
21	14,837	5,795	0,657	0,095	0,049	0,110	0,216	0,169	0,436	6,425	0,000	2,617
22	36,183	0,641	0,795	0,336	0,163	0,004	0,046	0,184	0,176	0,420	6,019	4,088
23	40,020	0,663	0,118	0,114	0,122	0,006	0,041	0,077	0,100	0,473	6,613	4,395
24	58,830	0,664	0,145	0,303	0,146	0,008	0,062	0,182	0,172	0,385	4,780	5,971
25	68,499	0,704	0,304	0,441	0,358	0,036	0,046	0,154	0,147	0,399	4,213	6,845
26	28,869	0,600	0,266	0,394	0,243	0,085	0,141	0,272	0,291	0,220	3,072	3,132
27	23,571	0,566	0,339	0,438	0,279	0,114	0,171	0,309	0,340	0,133	2,203	2,588
28	23,283	0,578	0,311	0,432	0,267	0,107	0,166	0,301	0,325	0,167	2,686	2,602
29	24,243	0,595	0,261	0,411	0,268	0,117	0,161	0,296	0,292	0,229	2,500	2,670
30	27,397	0,613	0,216	0,402	0,268	0,124	0,173	0,300	0,252	0,311	3,041	3,009
31	20,883	0,561	0,311	0,448	0,293	0,153	0,195	0,321	0,287	0,186	2,084	2,338
Error P corr (%)	77,775	1,324	0,369	0,355	0,278	0,179	0,210	0,190	0,180	0,816	135,305	19,726

Annex C: Resultats simulació model mitjana

C.1 Taula d'error de la potència entre model one-diode i mitjana sense corregir

DIA / HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Error P (%)
1	0,000	4,746	10,327	11,175	4,713	0,000	2,701	9,071	19,739	31,281	19,368	10,284
2	0,000	5,158	15,208	15,957	8,566	0,000	2,658	11,701	19,825	31,647	19,250	11,815
3	0,000	5,172	13,980	14,357	15,098	0,000	2,737	11,748	18,391	31,896	12,925	11,482
4	0,000	5,189	14,019	14,380	12,582	0,000	2,747	11,762	18,432	32,036	9,903	11,005
5	0,000	6,048	13,980	12,708	9,994	0,000	2,741	11,747	18,400	31,905	7,601	10,466
6	0,000	6,018	18,977	12,632	7,338	0,000	5,562	11,781	18,347	31,434	4,862	10,632
7	0,000	5,740	18,768	12,611	7,366	0,000	5,913	12,112	16,915	31,363	5,524	10,574
8	0,000	5,968	20,469	11,040	13,307	0,000	5,847	10,709	16,927	31,282	6,128	11,061
9	0,000	6,848	20,330	10,187	5,905	0,000	5,174	9,409	14,154	30,586	12,442	10,458
10	0,000	5,347	19,838	13,388	7,292	0,000	4,373	9,751	16,924	31,105	10,317	10,758
11	0,000	6,840	21,851	15,025	5,657	0,000	3,465	7,347	18,599	30,991	6,395	10,561
12	0,000	6,850	21,881	17,527	6,582	0,000	4,756	9,391	18,587	31,615	11,441	11,694
13	0,000	6,876	21,710	17,564	11,757	0,000	3,707	9,396	18,607	31,739	11,473	12,075
14	0,000	7,673	21,650	17,546	17,399	0,000	3,684	8,004	18,585	30,183	11,977	12,427
15	0,000	6,650	22,977	17,401	15,355	0,000	3,575	7,899	16,808	35,622	6,183	12,043
16	0,000	4,541	20,843	14,866	11,121	0,000	1,999	6,496	15,172	34,952	20,460	11,859
17	0,000	8,347	23,464	12,113	3,850	0,000	2,306	8,273	17,099	35,683	9,326	10,951
18	0,000	8,562	24,593	14,549	11,498	0,000	2,515	10,722	15,838	35,907	13,912	12,554
19	0,000	8,576	26,132	14,550	15,052	0,000	2,468	10,728	15,863	36,011	15,282	13,151
20	0,000	8,500	25,598	14,460	15,026	0,000	5,461	10,579	14,192	32,702	29,840	14,214
21	0,000	16,714	11,264	13,073	0,000	0,000	10,766	14,537	33,941	18,069	0,000	10,760
22	0,000	8,571	24,291	13,123	11,531	0,000	5,475	9,490	14,541	33,956	18,294	12,661
23	0,000	8,559	25,710	12,958	9,693	0,000	5,430	9,416	15,706	33,215	17,370	12,551
24	0,000	8,472	25,737	14,885	9,718	0,000	4,317	8,159	15,745	31,864	18,716	12,510
25	0,000	8,381	21,063	13,163	12,583	0,000	4,310	8,139	15,729	31,850	17,763	12,089
26	0,000	8,509	25,731	14,870	13,064	0,000	4,328	6,927	14,498	30,248	18,633	12,437
27	0,000	8,477	25,715	13,577	11,517	0,000	3,216	6,944	14,515	30,331	19,330	12,147
28	0,000	8,382	24,258	13,516	9,873	0,000	3,213	6,940	13,256	28,923	17,184	11,413
29	0,000	8,376	24,148	12,179	8,233	0,000	3,211	6,938	13,238	28,871	17,338	11,139
30	0,000	8,374	22,125	12,176	8,233	0,000	2,094	9,231	11,944	27,475	16,894	10,777
31	0,000	8,263	20,749	12,146	11,378	0,000	2,101	9,236	11,971	26,304	16,409	10,778
Error P (%)	0,000	7,443	20,883	13,861	10,041	0,000	3,963	9,503	16,854	31,324	13,630	11,591

Annex D: Resultats simulació model distribució

D.1 Taula d'error de la energia entre model one-diode i distribució

DIA	ENERGIA CONSUMIDA	ENERGIA CONSUMIDA	ERROR (%)
1	308596,0422	308552,6567	0,0141
2	460796,1549	460747,8580	0,0105
3	476084,2368	476047,6787	0,0077
4	484150,5163	484134,4690	0,0033
5	476100,2416	476083,8309	0,0034
6	420715,0851	420683,0530	0,0076
7	458856,6033	458817,5658	0,0085
8	484681,5723	484650,1631	0,0065
9	309748,7656	309720,4908	0,0091
10	327297,0450	327252,3423	0,0137
11	324996,2866	324951,0861	0,0139
12	517332,8884	517332,8884	0,0000
13	524423,4860	524423,4860	0,0000
14	510538,9307	510539,5062	-0,0001
15	469415,8835	469355,4217	0,0129
16	258475,5704	258444,5483	0,0120
17	325184,0317	325184,6266	-0,0002
18	528192,5075	528193,0793	-0,0001
19	535585,5230	535586,2230	-0,0001
20	505319,2965	505318,2881	0,0002
21	427153,5074	427154,2074	-0,0002
22	538709,0629	538709,7587	-0,0001
23	549787,6558	549788,3558	-0,0001
24	565131,5906	565132,2864	-0,0001
25	471009,5120	471010,3579	-0,0002
26	605224,6501	605225,4821	-0,0001
27	616683,6317	616684,4637	-0,0001
28	613392,2902	613393,1223	-0,0001
29	609726,5680	609727,4000	-0,0001
30	609867,6668	609868,4988	-0,0001
31	627897,1611	627898,1464	-0,0002
TOTAL	14941073,9641	14940611,3413	0,0039

Annex E: Scripts de l'eina de disseny

E.1 Script seccio.m

```

clear all;
Tamb = 50;    %Temp ambient
Tinst= 40;    %Temp de la instalció, 40°C per a inst. a aire lliure i 25°C per a enterrades.
Tc = 90;      %Temp del conductor
Ipm = 50 ;    % corrent que passa per una cel·la a pot. màxima (taula de prestacions de la cel·la)
Upmp = 20;    % voltatge d'una placa a pot. màxima (taula de prestacions de la cel·la)
Np = 11;      %nombre de cel·les en paralel
Ns = 16;      %nombre de cel·les en serie
l = 130.4;    %longitud de la línia
cond = 46.82; %conductivitat del material
material = input('introduir material del cablejat: '); % escriure Cu o Al depenent del material
faccorr = sqrt((Tc - Tamb) / (Tc - Tinst));
Utot = Upmp * Ns;
ltot = Ipm * Np;
Utot=642;
ltot=229.758;
lcorr = 1.25 * ltot / (faccorr*faccorr); %disseny per a la màxima corrent

n=1;
if material == 'Cu'
    posiciolimit = 'M16';
    secciolimit = 'A16';
elseif material == 'Al'
    posiciolimit = 'M15';
    secciolimit = 'A15';
end

for c = 0:1:999999
    lcorr1=lcorr/n;
    if lcorr1 < xlsread('taula_seccions.xlsx', material ,posiciolimit)
        for t = 1:16
            posicio = strcat('M', num2str(t));
            intensitat = xlsread('taula_seccions.xlsx', material , posicio);
            if intensitat <= lcorr1
                seccion1 = xlsread('taula_seccions.xlsx', material , strcat('A', num2str(t+1)));
            end
        end
        break
    else
        n = n+1;
    end
end

p=1;
e= 0.01*Utot;    %disseny per al la màxima ddp
sec=l*ltot/(cond*e);
for v = 0:1:999999
    if sec/p < xlsread('taula_seccions.xlsx', material ,secciolimit)
        for j = 1:16
            if xlsread('taula_seccions.xlsx', material ,strcat('A', num2str(j)))<=sec/p
                seccion2 = xlsread('taula_seccions.xlsx', material ,strcat('A', num2str(j+1)));
            end
        end
        break
    else
        p=p+1;
    end
end

if seccion1 > seccion2
    resultat = strcat('Es necessita: ', num2str(n),' cables en paralel de secció ', num2str(seccion1),'mm')
elseif seccion1 < seccion2
    resultat = strcat('Es necessita: ',num2str(p),' cables en paralel de secció ', num2str(seccion2),'mm')
else
    a = min(p, n);
    resultat = strcat('Es necessita: ', num2str(a),' cables en paralel de secció ', num2str(seccion1),'mm')
end

```


E.2 Script marroc.m

```

clear all;
Isc = 8.21;           % corrent de curtcircuit a 25°C i 1kW/m^2
q = 1.60217646e-19;  % càrrega d'un electró, [C]
k = 1.3806503e-23;   % Constant de Boltzmann,[J/K]
Tref = 25+273;       %temperatura de referència de la cel·la
Ki = 0.0032;         % coeficient de corrent de curtcircuit
A = 1.3;             %constant d'idealitat
Rs = 0.5;            % resistència en sèrie
Rp= 415.405;         %resistència en paral·lel
Eg =1.12;            %energia de gap del semiconductor de la cel·la
Np =1;               %cel·les en paral·lel
Ns= 54;              %cel·les en sèrie
Voc = 32.9;          %voltatge en buit
u=1;
pas=0.1;
zlnn=[];
Kv=-0.123;
for t=14:1:758
    H = xlsread('Ozz_fixedtilt_2013.xlsx', 'Ozz_fixedtilt' , strcat('I', num2str(t)))/1000;
    if H == 0
        puntI(u) = 0;
        puntV(u) = 0;
    else
        Tc = xlsread('Ozz_fixedtilt_2013.xlsx', 'Ozz_fixedtilt' , strcat('D', num2str(t)))+273;
        Iph = H*(Isc + Ki*(Tc - Tref)); % relació del corrent del fotodetector amb la temperatura i la irradiació solar
        Is = Irs*(Tref / Tc)^3*exp(q*Eg*(1/Tref - 1/Tc)/(k*A)); % (5) Equació del diode
        clear V
        a=-1000;
        F = 'Np*Iph - Np*Is*(exp(q*(V + zln*Rs/Np) / (Ns*k*Tc*A)) - 1) - (Np*V/Ns + zln*Rs)/ Rp -zln'; % corba V - I
        F=subs(F);

        %Gràfica V - I sense simplificar (per a una cel·la)

        V = 0:pas:Voc;

        for V = sort(V,'descend');
            zlnn = subs(solve(F));
            if zlnn*V > a
                a=zlnn*V;
            elseif zlnn*V <= a
                puntI(u) = zlnn;
                puntV(u) = V+pas;
                break
            end
        end
    end
    u=u+1;
end
end

```

E.3 Script ShadowsData1.m

```

clear all;
Isc = 8.21; % corrent de curtcircuit a 25°C i 1kW/m^2
q = 1.60217646e-19; % càrrega d'un electró, [C]
k = 1.3806503e-23; % Constant de Boltzmann,[J/K]
Tc = 70+273 ; %temperatura de treball de la placa,[K]
Tref = 25+273 ; %temperatura de referència de la cel·la
Ki = 0.0032 ; % coeficient de corrent de curtcircuit
A = 1.3 ; %constant d'idealitat
Rs = 0.221 ; % resistència en sèrie
Rp= 415.405; %resistència en paralel
Eg =1.12 ; %energia de gap del semiconductor de la cel·la
Np =1 ; %cel·les en paralel
Ns= 54; %cel·les en serie
Voc = 32.9; %voltatge en buit
Kv=-0.123; %factor corrector del voltatge
pas=1;
diesSimulacio=365;
load GDATA
In=cell(diesSimulacio,24);
Vn=cell(diesSimulacio,24);

for dia=1:1:diesSimulacio
    for hora=1:1:24
        b=GDATA(:,1,hora,dia,1);
        j=1;
        i=1;
        for x=1:1:27
            if GDATA(:,x,hora,dia,1) == b
                matriu{dia}{hora}{i}{:,j} = GDATA(:,x,hora,dia,1);
                b=GDATA(:,x,hora,dia,1);
                j=j+1;
            else
                j=1;
                i=i+1;
                matriu{dia}{hora}{i}{:,j} = GDATA(:,x,hora,dia,1);
                b=GDATA(:,x,hora,dia,1);
                j=j+1;
            end
        end
    end
end
diaah=0;
for dia=1:1:diesSimulacio
    for hora=1:1:24
        if GDATA(:,1,hora,dia,1)==0

        else
            for k1=1:length(matriu{dia}{hora})
                H=matriu{dia}{hora}{k1};
                NpS = length(H(1,:));
                m=H(:,1);
                [valores_unicos, ind_unicos] = unique(m);
                c=0;
                ind_unicos=sort(ind_unicos);
                clear NsS1;
                for b=1:1:length(ind_unicos)
                    NsS1(b) = ind_unicos (b) - c;
                    c = ind_unicos(b);
                end
                %valores_unicos = sort(valores_unicos,'descend');
                NsS1 = fliplr(NsS1);
                for t=1:length(valores_unicos)

                    H=valores_unicos(t)/1000;
                    NsS = NsS1(t);
                    VocS = Voc*NsS;
                    IscA= Isc*NpS;
                    RsS = Rs*NsS/NpS;
                    RpS = Rp*NsS/NpS;
                    Iph = H*(IscA + Ki*(Tc - Tref));
                end
            end
        end
    end
end

```

PAG 1

E.4 Script ShadowsMitjana.m

```

clear all;

Isc = 8.21; % corrent de curtcircuit a 25°C i 1kW/m^2
q = 1.60217646e-19; % càrrega d'un electró, [C]
k = 1.3806503e-23; % Constant de Boltzmann,[J/K]
Tc = 70+273 ; %temperatura de treball de la placa,[K]
Tref = 25+273 ; %temperatura de referència de la cel-la
Ki = 0.0032 ; % coeficient de corrent de curtcircuit
A = 1.3 ; %constant d'idealitat
Rs = 0.221 ; % resistència en sèrie
Rp = 415.405; %resistència en paral·lel
Eg =1.12 ; %energia de gap del semiconductor de la cel-la
Np =1 ; %cel·les en paral·lel
Ns= 54; %cel·les en serie
Voc = 32.9; % voltatge en buit
Kv=-0.123; % coeficient del voltatge
pas=1;
diesSimulacio=365;
NsS =20;
NpS = 27;
VocS = Voc*NsS;
RsS = Rs*NsS/NpS;
RpS = Rp*NsS/NpS;
IscA= Isc*NpS;

load GDATA
i=1;
for dia=1:1:diesSimulacio
    for hora=1:1:24
        if GDATA(:, :, hora, dia, 1) == 0

        else
            H = sum(sum(GDATA(:, :, hora, dia, 1)))/(20*27);
            H=H/1000;
            Iph = H*(IscA + Ki*(Tc - Tref));
            Irs = IscA / (exp(q*VocS/(Ns*k*A*Tc)) - 1);
            Is = (IscA + Ki*(Tc-Tref))/(exp(q*(VocS+Kv*(Tc-Tref))/(Ns*A*k*Tc))-1);
            F = 'Np*Iph - Np*Is*(exp(q*(V + zln*RsS) / (Ns*k*Tc*A)) - 1) - (V + zln*RsS)/(Rp*NsS/NpS) -zln' ;
            L=subs(F);
            V = 0:pas:(VocS+VocS*0.1);
            punt = subs(solve(L));
            PuntI{mitjana{dia}{i}} = punt;
            PuntV{mitjana{dia}{i}} = V;
            clear V
            i=i+1;
        end
    end
    i=1;
    diaah=dia
end

```

E.5 Script PuntDeFuncionament.m

```

%load puntldefid;
%load provacaa;
%load puntldistribucio11111
puntldefinitiu1=puntldistribucio1;
puntldefinitiu2=puntldistribucio2;
puntldefinitiu4=puntldistribucio4;
%Puntlmitjana = Puntlmitjana(1:31);
%puntldef=provacaa;
for dia=1:1:length(puntldefinitiu1)
    for hora=1:1:length(puntldefinitiu1{dia})
        V1=1:1:length(puntldefinitiu1{dia}{hora});
        V2=1:1:length(puntldefinitiu2{dia}{hora});
        V4=1:1:length(puntldefinitiu4{dia}{hora});
        Vmitjana=1:1:length(Puntlmitjana{dia}{hora});
        P1 = puntldefinitiu1{dia}{hora}.*V1;
        P2 = puntldefinitiu2{dia}{hora}.*V2;
        P4 = puntldefinitiu4{dia}{hora}.*V4;
        Pmitjana = Puntlmitjana{dia}{hora}.*Vmitjana;
        posicio1=find(P1==max(P1));
        posicio2=find(P2==max(P2));
        posicio4=find(P4==max(P4));
        posiciomitjana=find(Pmitjana==max(Pmitjana));
        puntFuncionamentl1{dia}{hora} = puntldefinitiu1{dia}{hora}(posicio1);
        puntFuncionamentV1{dia}{hora} = V1(posicio1);
        puntFuncionamentl2{dia}{hora} = puntldefinitiu2{dia}{hora}(posicio2);
        puntFuncionamentV2{dia}{hora} = V2(posicio2);
        puntFuncionamentl4{dia}{hora} = puntldefinitiu4{dia}{hora}(posicio4);
        puntFuncionamentV4{dia}{hora} = V4(posicio4);
        puntFuncionamentlmitjana{dia}{hora} = Puntlmitjana{dia}{hora}(posiciomitjana);
        puntFuncionamentVmitjana{dia}{hora} = Vmitjana(posiciomitjana);
        puntFuncionamentPmitjana{dia}{hora}=Pmitjana(posiciomitjana);
        puntFuncionamentP1{dia}{hora}=P1(posicio1);
        puntFuncionamentP2{dia}{hora}=P2(posicio2);
        puntFuncionamentP4{dia}{hora}=P4(posicio4);
        Errorl{dia}{hora} = abs(puntFuncionamentl{dia}{hora}-
        puntFuncionamentlmitjana{dia}{hora})/puntFuncionamentl{dia}{hora}*100;
        ErrorV{dia}{hora} = abs(puntFuncionamentV{dia}{hora}-
        puntFuncionamentVmitjana{dia}{hora})/puntFuncionamentV{dia}{hora}*100;
        ErrorP{dia}{hora} = abs(puntFuncionamentP{dia}{hora}-
        puntFuncionamentPmitjana{dia}{hora})/puntFuncionamentP{dia}{hora}*100;
    end
end

```

