

Irene Torres Rabanal

Modelització d'una Instal·lació solar fotovoltaica en Matlab

TREBALL DE FI DE GRAU

dirigit per Francisco González Molina

Grau d'Enginyeria Elèctrica



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2023-2024

1	Introducció.....	4
	Abast.....	4
2	Instal·lació Fotovoltaica	6
2.1	Panells Fotovoltaics	6
2.1.1	Models equivalents de cèl·lules fotovoltaïques.....	6
2.2	Seguidor del Punt de Màxima Potència.....	9
2.2.1	Algoritmes MPPT per a una Instal·lació Fotovoltaica	9
2.2.2	Implementació Física del MPPT	10
2.2.3	Convertidors DC-DC	10
2.3	Inversor.....	12
2.3.1	Models no Commutatats d'Inversor	13
2.4	Bateries	14
2.5	Proteccions Elèctriques.....	16
3	Modelització dels Components de la Instal·lació Fotovoltaica.....	17
3.1	Modelització del Panell Solar.....	17
3.1.1	Càlcul dels paràmetres del panell fotovoltaic.....	19
3.1.2	Resultats del model de panell fotovoltaic.....	20
3.2	Modelització del Seguidor de Punt de Màxima Potència.....	21
3.2.1	Resultats del model de MPPT	22
3.3	Modelització del Inversor.....	24
3.3.1	Model commutat de l'inversor	24
3.3.2	Model no commutat de l'inversor	25
3.3.3	Resultats dels models d'inversor	26
3.4	Modelització de les Bateries.....	28
3.4.1	Resultats del model de bateria	29
3.5	Modelització de les proteccions elèctriques	30
3.5.1	Fusibles.....	30
3.5.2	Protecció de sobretensions	31
3.5.3	Interruptor Diferencial.....	33
3.5.4	Interruptor Automàtic	34
3.5.5	Proteccions de connexió a la xarxa elèctrica	35
4	Modelatge de la Instal·lació Fotovoltaica	37
5	Estudi de les simulacions.....	42
5.1	Condicions nominals	42
5.2	Variacions en la irradiància	44
5.3	Funcionament amb la bateria Activada	46

5.4	Estudi de les pèrdues provocades pels conductors i proteccions elèctriques	47
6	Anàlisi de Faltes en la Instal·lació Fotovoltaica.....	48
6.1	Sobretensió en la xarxa elèctrica $V > 1,1U_n$	48
6.2	Sot de tensió total	50
6.3	Sot de Tensió Parcial	51
6.4	Circuit Obert a l'entrada de l'inversor.....	53
6.5	Variacions de freqüència en la xarxa elèctrica	54
6.6	Curtcircuit a l'entrada de l'inversor.....	55
7	Conclusions	56
	Bibliografia i Webgrafia.....	58
8	Annexos.....	59
8.1	Fitxa tècnica Mòduls Fotovoltaics.....	59
8.2	Fitxa tècnica Optimitzador	60
8.3	Fitxa tècnica Inversor	61
8.4	Fitxa tècnica Bateria	62
8.5	Codi Matlab d'inicialitzacions.....	63
8.6	Codi Matlab del MPPT.....	65

1 Introducció

Aquest treball de fi de grau consisteix en la modelització i simulació d'una instal·lació solar fotovoltaica mitjançant les eines de simulació de Matlab i Simulink. S'utilitza un model detallat per representar cada component del sistema, incloent-hi panells solars, seguidor del punt de màxima potència (MPPT o optimitzador), inversors, bateries emmagatzemadores i elements elèctrics de protecció, cablejat i xarxa elèctrica. Es comprovarà el funcionament de cada element de forma individual, fins assegurar que el seu comportament s'aproxima fidelment al descrit a la fitxa tècnica del component.

La instal·lació a partir de la qual es realitza el model és la descrita al Treball de Fi de Grau de Marc Ingles Campor "Instal·lació fotovoltaica d'autoconsum de 5,2 kWp", del curs 2022/2023 [1]. El seu projecte es basa en la descripció d'una instal·lació fotovoltaica d'autoconsum amb excedents acollits a compensació i amb emmagatzematge. Els sistemes d'autoconsum estan connectats a la xarxa elèctrica i permeten als usuaris generar energia per al seu propi consum, reduint així la seva dependència de la xarxa elèctrica. Les petites instal·lacions d'autoconsum son actualment les més habituals a Espanya.

Del seu projecte s'extreuen els models de panells fotovoltaics, optimitzador, inversor, bateria, elements elèctrics de protecció necessaris i cablejat elèctric. No obstant, modificant els paràmetres correctament, el model pot simular instal·lacions fotovoltaiques d'altres característiques.

La simulació es realitzarà per a diferents condicions de funcionament: condicions nominals, per diferents valors d'irradiància, amb bateries i optimitzadors activats i desactivats. També es comprova el comportament de la instal·lació davant possibles faltes al sistema: sobretensions i sots de tensió, curtcircuits i circuits oberts.

Abast

L'objecte d'aquest treball és el modelatge d'una instal·lació en la seva totalitat, no el disseny dels seus components. S'utilitzen models equivalents simplificats de cada element, però no dissenys reals. Per exemple, els mòduls fotovoltaics es simularan com un circuit basat en el model de 5 paràmetres, i els convertidors DC-DC i inversor i bateries es basen en fonts de tensió i corrent controlades. Aquests models permeten l'estudi dels valors mitjanats de cada component, però no anàlisi de petita senyal (arissaments en el voltatge i corrent provocat per les commutacions a alta freqüència).

No es calcula la instal·lació elèctrica: considerem els elements de protecció elèctrica i cablejat de [1].

Simulació en Matlab

Matlab és un entorn de programació i llenguatge d'alt nivell de la companyia MathWorks. Està dissenyat principalment per treballar amb càlculs matemàtics, anàlisi de dades, visualització i programació.

Simulink és una eina de l'entorn de Matlab que permet la simulació i disseny basat en diagrames de blocs. És realment útil per modelitzar i simular sistemes dinàmics i de control. Té una integració total al programa Matlab: els models de Simulink poden ser controlats i analitzats per scripts de Matlab.

Simulink permet la descàrrega de llibreries addicionals. Per aquest treball s'utilitzaran components de la llibreria Simscape Electrical, que inclou elements per l'anàlisi de sistemes físics elèctrics. També s'afegeixen elements de la llibreria Dashboard, amb l'objectiu de facilitar la interacció de l'usuari amb els paràmetres i resultats de la simulació.

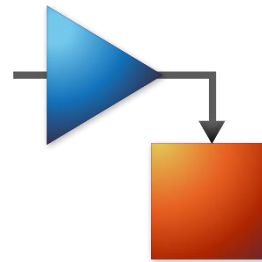


Figura 1-1: Logotips de Matlab i Simulink

2 Instal·lació Fotovoltaica

Una instal·lació solar fotovoltaica és un sistema elèctric generador de potència que converteix l'energia solar en electricitat. Aquestes es poden classificar en funció de la seva utilitat, i presentaran diferents característiques en funció de la potència a generar.

En funció del tipus de connexió a la xarxa:

- Connectades a la xarxa elèctrica: poden ser instal·lacions d'autoconsum, on la instal·lació genera energia pel seu propi consum i es troben connectades per obtenir energia addicional quan sigui necessari, o instal·lacions de venda a la xarxa, que generen electricitat amb finalitat econòmica.
- Aïllades de la xarxa elèctrica: aquestes instal·lacions generen i emmagatzemen la seva pròpia energia. Son especialment útils en àrees remotes on l'accés a la xarxa elèctrica no és possible.
- Sistemes híbrids: combinen l'energia solar amb altres fonts d'electricitat, com l'energia eòlica o generadors convencionals.

Els elements fonamentals d'una instal·lació solar fotovoltaica son: panells fotovoltaics, inversor solar, estructures de suport (no considerades en aquest treball, ja que no son un element elèctric), cablejat i sistemes de mesura.

Per a instal·lacions generadores de gran potència s'inclouran transformadors de voltatge, però per la potència 5 kWp de la instal·lació a modelitzar aquest no és un element necessari. En els pròxims capítols s'explicarà cada element a modelitzar.

2.1 Panells Fotovoltaics

Els panells fotovoltaics son l'element essencial d'una instal·lació fotovoltaica. Consisteixen en un material semiconductor que converteix directament l'energia solar en energia elèctrica mitjançant l'efecte fotovoltaic.

Els panells estan formats per la unió de cèl·lules fotovoltaiques unides en sèrie i paral·lel. L'efecte fotovoltaic ocorre quan els fotons de la llum solar incideixen sobre el material semiconductor de la cèl·lula. Aquests exciten els electrons, generant un corrent elèctric. La unió de cèl·lules fotovoltaiques en sèrie i paral·lel forma un panell fotovoltaic.

2.1.1 Models equivalents de cèl·lules fotovoltaiques

Els models paramètrics de les cèl·lules fotovoltaiques s'utilitzen per descriure el comportament elèctric d'una cèl·lula solar. Aquests generalment estan basats en fonts de corrent emulant el corrent generat per l'energia solar, díodes per representar el comportament de la unió p-n de la cèl·lula, resistències per considerar les pèrdues elèctriques, i condensadors per modelitzar el comportament transitori dels panells en la connexió i desconnexió.

Per a la modelització de la cèl·lula fotovoltaica s'utilitzarà el model de 5 paràmetres.

- Corrent fotogenerat (I_{ph}): és el corrent generat per la cèl·lula degut a l'absorció de la llum solar.
- Corrent de saturació (I_0): es el corrent de saturació del material semiconductor.
- Factor d'idealitat (n): és un paràmetre de la qualitat de la unió p-n i de la recombinació d'electrons en la cèl·lula solar.
- Resistència en sèrie (R_s): és la resistència interna de la cèl·lula solar que provoca una caiguda de voltatge en circular corrent.
- Resistència shunt (R_{sh}): és la resistència interna de la cèl·lula solar que provoca disminucions en el corrent de sortida respecte el corrent generat.

Aquest model de 5 paràmetres permet analitzar de forma fidel el comportament físic de les cèl·lules fotovoltaïques, tenint en compte possibles defectes en les cèl·lules i variacions en la temperatura. No s'afegeixen condensadors al model perquè es suposarà que els panells es mantindran sempre connectats, per tant no s'analitzarà el comportament transitori durant la connexió i desconnexió.

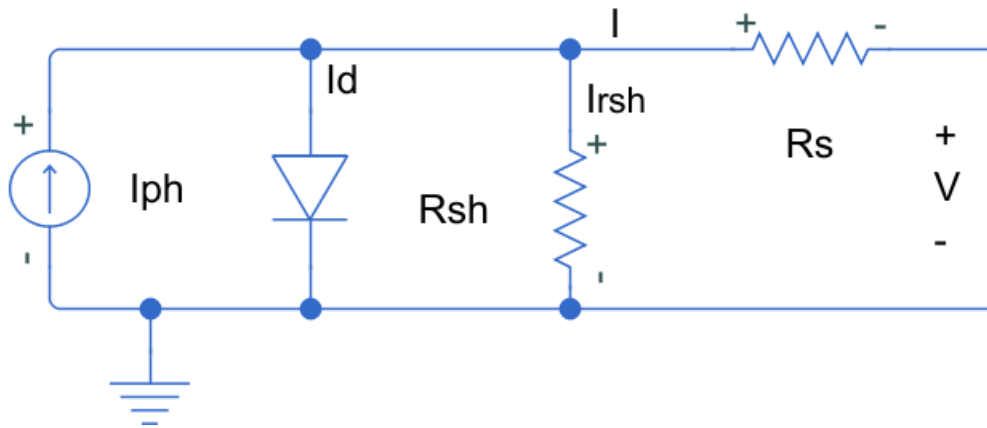


Figura 2-1: Model equivalent d'una cèl·lula fotovoltaica

El model es pot descriure amb les següents equacions:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2)$$

El corrent circulant pel díode, menyspreant l'efecte de la resistència R_{sh} es comporta tal com:

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V + R_s \cdot I}{n \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\frac{V_{oc}}{e^{n \cdot V_T}} - 1} \quad (4)$$

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (5)$$

On V_t és el potencial tèrmic del díode, K és la constant de Boltzmann ($K = 1,380649 \cdot 10^{-23} J/K$), T és la temperatura ambient, i q la càrrega d'un electró ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$).

El corrent fotogenerat I_{ph} depèn de les característiques del Datasheet (Corrent de Curtcircuit (I_{sc}) i coeficient de temperatura de Curtcircuit (K_{isc})) i de les condicions ambientals (temperatura ambient i irradiació G).

$$I_{ph} = I_{sc} \cdot K_{isc} \cdot (T - 298) \cdot \frac{G}{G_n} \quad (6)$$

2.2 Seguidor del Punt de Màxima Potència

Un seguidor del punt de màxima potència (en anglès Maximum Power Point Tracker) és una tècnica utilitzada en sistemes eòlics i fotovoltaics per maximitzar la generació de potència.

Els sistemes fotovoltaics varien la seva eficiència en funció de la quantitat de llum disponible, ombres, temperatura de les cel·les i característiques elèctriques de la càrrega. El seguidor de punt de màxima potència ajusta la càrrega en funció de les condicions per tal de maximitzar la potència generada.

Els sistemes MPPT generalment estan constituïts per convertidors de potència, que permeten variar i regular corrent i voltatge.

2.2.1 Algoritmes MPPT per a una Instal·lació Fotovoltaica

Els algoritmes MPPT es poden classificar en 4 grans famílies: tècniques clàssiques de control, tècniques intel·ligents de control, tècniques d'optimització i tècniques híbrides. Es presenten alguns dels algoritmes clàssics de control.

- Algoritme de Pertorbació i Observació

Aquest algoritme consisteix en pertorbar periòdicament la tensió de funcionament per garantir el funcionament a màxima potència. Per cada pertorbació s'analitza l'efecte que ha tingut el nou voltatge en la potència. Si la potència augmenta, l'algoritme modifica el voltatge en la mateixa direcció. Si disminueix, canvia la direcció.

Es pot implementar com el següent arbre de decisions [6].

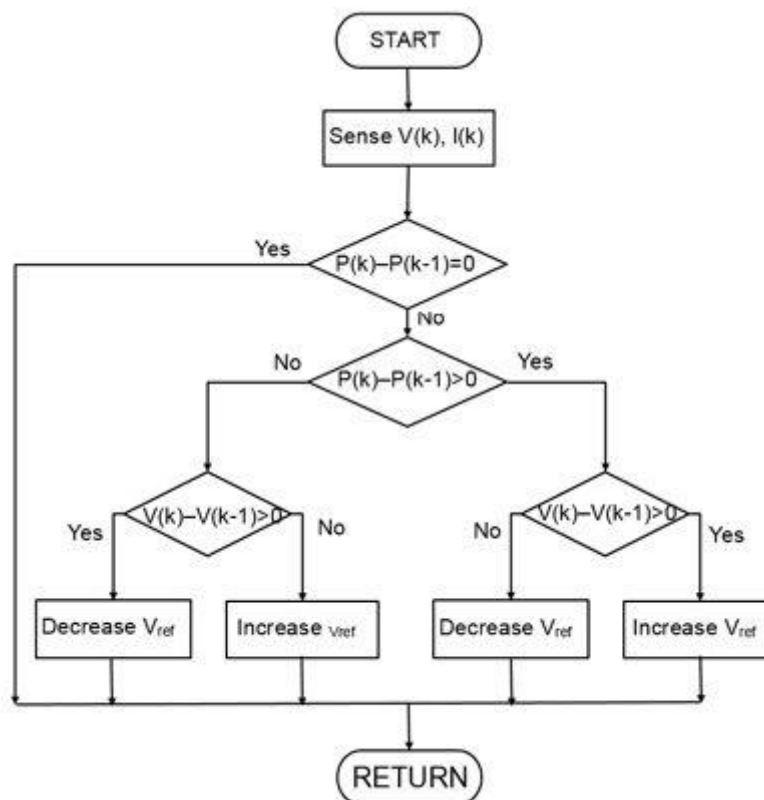


Figura 2-2: Esquema de l'algoritme a seguir per un MPPT tipus P&O

El seu avantatge és la seva simplicitat, però a canvi introdueix oscil·lacions al voltant del punt de màxima potència, i necessita un temps per trobar el punt de funcionament.

Els algoritmes P&O convencionals treballen a partir de dos paràmetres predefinitos; la dimensió i freqüència de la pertorbació.

- **Algoritme de Conductància Incremental (IncCond)**

Aquest mètode calcula el punt de màxima potència com la derivada de la potència respecte a la tensió. Es calculen els canvis incrementals en tensió i corrent per predir el MPPT. El mètode és més precís que el P&O, però més complexe d'implementar.

- **Tensió de circuit obert (OCV), Corrent de curtcircuit (SCC)**

L'algoritme de tensió constant assumeix que el punt de màxima potència ocorre a una tensió específica. El seu funcionament es basa en desconnectar periòdicament el panell fotovoltaic del MPPT, per mesurar el voltatge de circuit obert. Es fixa el voltatge de funcionament en funció del voltatge mesurat i k, que acostuma a prendre valors entre 0,72 i 0,8.

$$V_{mpp} = K \times V_{oc} \quad (7)$$

Es pot implementar el mateix procediment amb mesures de curtcircuit. En aquest cas k varia entre 0,78 i 0,92.

Aquest algoritmes no tenen en compte les modificacions en el punt de funcionament provocades per canvis en la irradiància i temperatura.

2.2.2 Implementació Física del MPPT

La implementació del seguidor del punt de màxima potència en una instal·lació fotovoltaica consta de 3 elements:

- Un convertidor DC-DC, que es connecta entre els panells solars i l'inversor. En funció del model es connectarà un convertidor per cada panell, per strings, o un únic convertidor a l'entrada de l'inversor. La finalitat d'aquest és ajustar la sortida dels panells fotovoltaics a la tensió i corrent òptims.
- Controlador MPPT: generalment basat en un processador de senyals digitals (PSD) o en un microcontrolador, és el hardware programat amb l'algoritme MPPT. Aquest calcularà el punt de funcionament en funció dels senyals mesurats, i envia el resultat al convertidor DC-DC.
- Sensors de tensió i corrent: els sensors mesuren periòdicament la tensió i corrent dels panells, que el controlador MPPT processarà.

2.2.3 Convertidors DC-DC

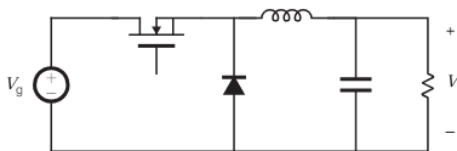
Els convertidors de potència DC-DC es poden trobar en una gran varietat d'aplicacions, des de petits dispositius electrònics a sistemes de gran potència. La idea general dels convertidors de potència és generar un voltatge de sortida V regulat, a partir d'un voltatge V_g no regulat. La magnitud i polaritat de V i V_g acostumen a diferir.

El seu funcionament es basa en que el voltatge de sortida depèn del cicle de treball D d'un component commutador. Generalment el component commutador consisteix en un MOSFET de potència i un díode, tot i que també es pot fer ús d'altres semiconductors com IGBT, BJT o trístors. Com el voltatge de sortida varia en funció del cicle de treball, es pot realitzar un laç de control per assegurar que el voltatge de sortida segueix un voltatge de referència definit. La comparació entre el valor sensat de voltatge de sortida i el voltatge de referència passa per un PWM ("pulse width-modulator"), que produeix una ona de voltatge quadrada que controlarà les commutacions.

Idealment, un convertidor de potència treballarà amb un rendiment del 100%, és a dir, la potència d'entrada equival a la potència de sortida. En la pràctica, els valors típics de rendiment varien entre el 70% i el 95 %.

Existeixen una gran varietat de tipologies de convertidors dc-dc, en funció de la seva capacitat d'augmentar, disminuir o canviar la polaritat del voltatge de sortida. Els convertidors de potència bàsics són el convertidor Buck, Boost i Buck-Boost.

Buck converter



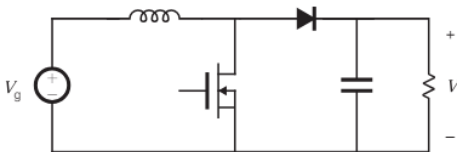
- El convertidor Buck redueix el voltatge de sortida amb una relació de:

$$V = Vg \times D \quad (8)$$

- El convertidor Buck augmenta el voltatge de sortida amb una relació de:

$$Vo = Vg / (1 - D) \quad (9)$$

Boost converter



- El convertidor Buck-Boost inverteix la polaritat del voltatge, i pot augmentar o disminuir la magnitud del voltatge de sortida. Segueix la següent relació:

$$Vo = Vg \times D / (1 - D) \quad (10)$$

Buck-boost converter

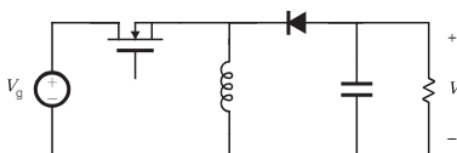


Figura 2-3: Circuits dels convertidors DC-DC Buck, Boost i Buck-Boost [8]

2.3 Inversor

Un inversor fotovoltaic és un aparell electrònic que converteix el corrent continu (en el cas d'una instal·lació fotovoltaica, el generat pels panells) en corrent altern. El corrent altern generat haurà de tenir uns valors de voltatge i freqüència predeterminats, per tal de que sigui compatible amb la xarxa elèctrica.

Es poden classificar segons diferents criteris: el nombre de fases, etapes i configuració del sistema. Primer de tot s'escollirà un inversor monofàsic o trifàsic segons la xarxa a la que es connecti. Respecte a les etapes de l'inversor, existeixen inversors d'una etapa, on es converteix directament de corrent continu a altern; de dues etapes, que integren una etapa intermitja de conversió CC-CC per adaptar la tensió; de múltiples etapes, i altres tipologies avançades.

Finalment, segons la configuració del sistema, es poden categoritzar en:

- Inversors integrats al panell, en el rang de potència entre 50-400 W, per petites instal·lacions fotovoltaïques de teulada connectades en un sol string.
- Inversors d'un string, en el rang de potència entre 0,4-2 kW per instal·lacions de teulada mitjanes connectades en un sol string.
- Inversors multistring, en el rang entre 1,5-6 kW per instal·lacions de teulada mitjana-gran configurats entre 1 i 2 strings.
- Inversors de petites centrals generadores, generalment menors de 6kW i trifàsics. Es poden trobar en instal·lacions de teulada de grans dimensions, o en centrals generadores de potències al voltant dels 100 kW, dividint la potència en inversors de 6,8,10 i 15 Kw.
- Inversors de centrals generadores, generalment en el rang de 100-1000 kW, de tipologia trifàsica. Es troben en grans centrals elèctriques de la magnitud de MW, distribuïdes en inversors de 100, 250, 500 i 1000 kW.

Les tipologies més comuns d'inversors fotovoltaics, sense ús de transformadors, es classifiquen en dues grans famílies: inversors "H-Bridge" i inversors "NPC".

- Els inversors "H-Bridge" son la configuració de circuit CC-AC més utilitzada en aplicacions de petita potència. Consisteix en 4 interruptors (generalment MOSFETS) disposats en forma de H. En alternar els estats de commutació dels 4 interruptors es modula el corrent de sortida, produint corrent altern.
- Els inversors "Neutral Point Clamped" (NPC") son una configuració avançada d'inversors multinivell, basada en múltiples interruptors i díodes de clamping que divideixen el voltatge d'entrada en varis nivells. Aquesta configuració ofereix nivells

de voltatge més alts, amb menor distorsió harmònica i millor qualitat en l'ona de sortida, però requereixen de major complexitat.

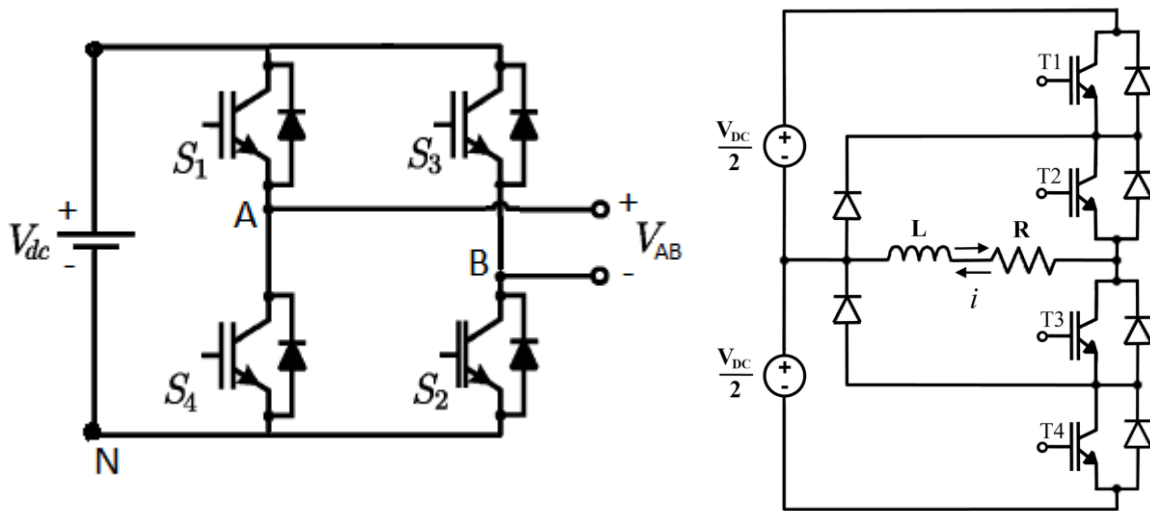


Figura 2-4: Circuits d'inversors monofàsics de tipologia H-Bridge (esquerra) i NPC (dreta).

Les majors complexitats en el disseny d'un inversor es troben en el filtre de sortida per a la connexió a la xarxa, la sincronització amb la xarxa i les pèrdues provocades per les commutacions.

2.3.1 Models no Commutatats d'Inversor

Els models no commutatats d'un convertidor de potència es basen en analitzar el comportament dels circuits a baixes freqüències, sense tenir en compte l'efecte de les commutacions i dels règims estacionaris.

Partint de la premissa que un inversor ideal no té pèrdues en la conversió de corrent continu a corrent altern, es pot modelitzar com una font de corrent a l'entrada DC i una font de tensió a la sortida AC, on la potència consumida per la primera equival a la potència generada per la segona. Aquest és el model emprat quan l'entrada de potència prové d'una font de tensió regulada (Voltage Source Inverter o VSI), i l'objectiu del circuit és regular la tensió de sortida alterna.

Per als casos on la potència d'entrada prové d'una font de corrent, una solució alternativa és el modelatge d'un "Current Source Inverter". Per aquest model es preveu que la entrada és una font de corrent regulada i la tensió de sortida té un valor fixe, en el cas d'un inversor connectat a la xarxa elèctrica, el voltatge quedarà definit per aquesta. L'objectiu és regular el corrent de sortida altern.

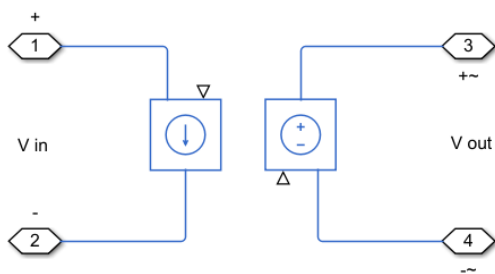


Figura 2-5: Model no commutatat d'un invwesor VSI

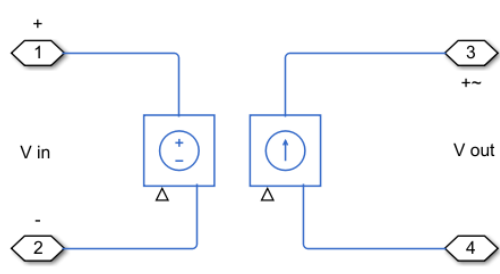


Figura 2-6: Model no commutatat d'un inversor CSI

2.4 Bateries

Una bateria és un dispositiu electroquímic que permet l'emmagatzematge d'energia en forma de productes químics, i allibera energia en forma de corrent elèctric durant la seva descàrrega.

En el context d'una instal·lació fotovoltaica, una bateria és un component que permet emmagatzemar l'energia elèctrica generada pels panells solars en moments d'excedent, per utilitzar-se posteriorment quan la producció solar és baixa o bé en moments d'alta demanda. La seva integració en una instal·lació fotovoltaica ens permet optimitzar l'autoconsum de l'energia elèctrica generada i reduir la dependència de la xarxa elèctrica. A continuació es mostra un diagrama de l'algorisme habitual del funcionament de les bateries per aquest tipus d'instal·lació [9].

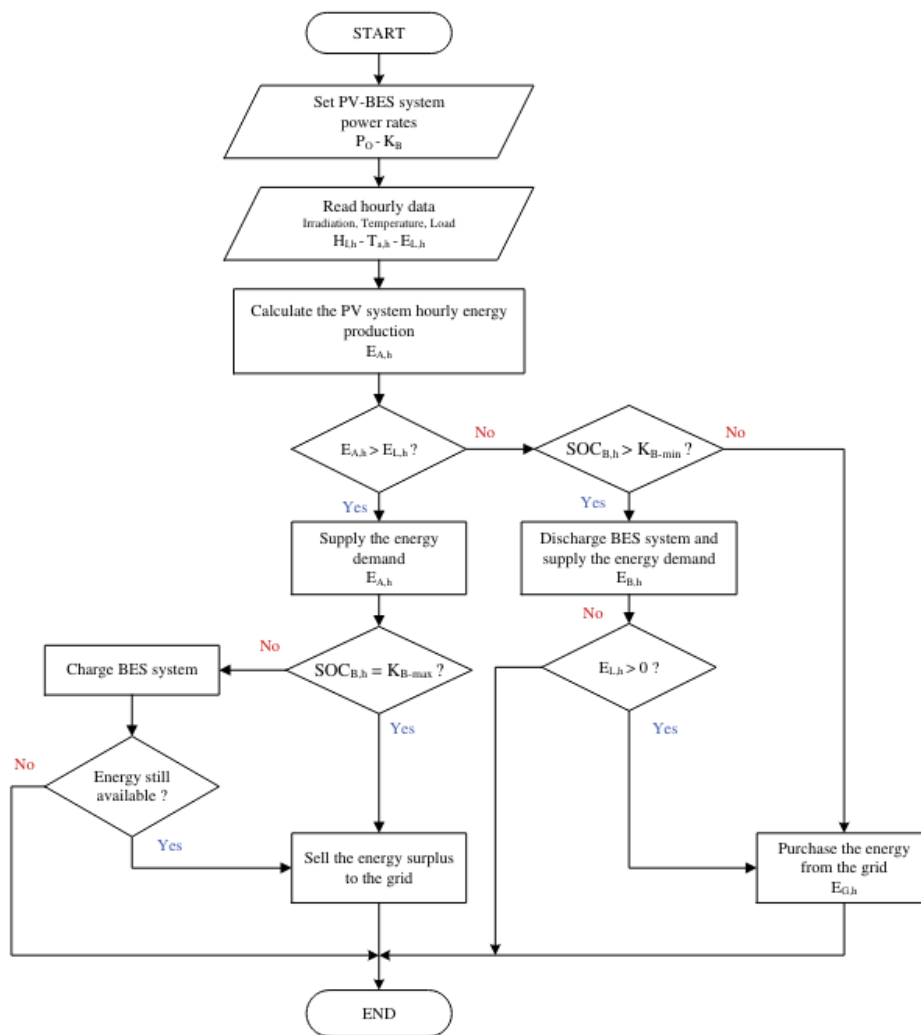


Figura 2-5: Diagrama de flux del funcionament d'una bateria en un sistema de generació d'energia elèctrica

Segons l'aplicació del model i els paràmetres a estudiar existeixen diferents models equivalents per l'estudi de bateries. El model elèctric més comú es el model Thevenin. Aquest consisteix en una font de tensió (V_{oc}) en sèrie amb la resistència interna de la bateria (R_o). Per modelitzar el comportament dinàmic de la bateria en els cicles de càrrega i descàrrega s'afegeix una branca RC en sèrie. [13]

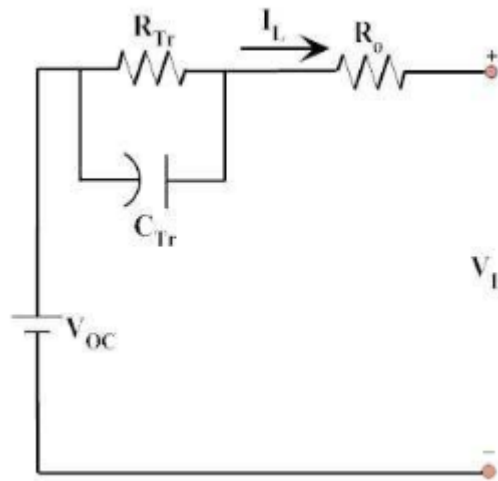


Figura 2-6: Model equivalent Thevenin d'una bateria

2.5 Proteccions Elèctriques

Les proteccions elèctriques son dispositius i sistemes dissenyats per detectar condicions no desitjades en una instal·lació elèctrica. La seva funció és detectar falles: sobrecàrregues, curtcircuits i valors fora dels límits establerts. Aquestes actuen per prevenir interrupcions de servei i garantir la seguretat de persones i equips. Aquestes son les proteccions incloses en el model de la instal·lació.

- Fusibles

Son dispositius dissenyats per protegir els circuits i dispositius en cas de sobrecàrrega o curtcircuit. Quan el corrent que passa pel fusible supera el seu valor nominal, el filament metàl·lic es fon interrompent així el flux de corrent.

- Protecció de sobretensions

Els dispositius de protecció de sobretensions detecten valors anormalment superiors de voltatge i desvien l'excés d'energia elèctrica. Les sobretensions poden ser causades per diversos factors, incloent-hi llamps, fluctuacions en la xarxa elèctrica o la connexió i desconexió de dispositius de potències elevades. Existeixen diversos tipus en funció del tipus de sobretensió (transitòria o permanent), aplicació i tecnologia del dispositiu.

- Interruptor diferencial

La finalitat d'un interruptor diferencial és desconnectar el circuit elèctric quan es detecta una fuga de corrent (provocada, per exemple, a causa d'un aïllament defectuós). El seu principi de funcionament es basa en la detecció de diferències entre els corrents d'entrada i sortida del circuit. Una diferència de corrents implica una fuga de corrent.

- Interruptor Automàtic

Un interruptor automàtic és un dispositiu dissenyat per desconnectar automàticament un circuit elèctric en cas de sobrecàrrega i curtcircuit. Aquests detecten corrents anormalment superiors als nominals i obren el circuit en superar els valors establerts.

- Proteccions d'interconnexió a la xarxa elèctrica

D'acord amb el REBT-40, la connexió d'instal·lacions generadores interconnectades haurà d'incloure sistemes de protecció de sobrecàrrega i curtcircuit, sobretensió i subtensió ($0.85 U_n < V < 1,1 U_n$) i límits de freqüència ($49 < f < 51$). Aquestes proteccions son necessàries per assegurar que les instal·lacions generadores interconnectades operen de forma segura i eficient. Són especialment importants en el cas de les instal·lacions de generació d'energia renovable, com ara la solar fotovoltaica i l'eòlica. Per al tipus d'instal·lació a estudiar, les proteccions s'inclouran a la sortida de l'inversor.

3 Modelització dels Components de la Instal·lació Fotovoltaica

Els models de cada component de la simulació estan dissenyats en l'entorn de Simulink, on es fa ús de les llibreries de components de Simulink i Simscape Electrical.

La definició de tots els paràmetres de la simulació es troba en un script de Matlab (inclòs als Annexos). Aquests paràmetres es poden modificar per analitzar el comportament del sistema per a diferents valors. La posta en marxa del programa Simulink i l'execució de la simulació també es controlen des d'un script de Matlab. (Els scripts es troben als annexes).

Per a la visualització dels resultats en les proves s'ha fet servir l'eina "Data Inspector" de Simulink, que permet fer gràfics amb les formes d'ona seleccionades i comparar-les amb dades de simulacions anteriors.

3.1 Modelització del Panell Solar

Per a la modelització del panell solar en l'entorn de Simulink es parteix del model de 5 paràmetres, compost amb una font de corrent controlada, un díode de model exponencial i dues resistències (R_{sh} , R_s).

Per adaptar les equacions d'una sola cèl·lula fotovoltaica al panell sencer es suposarà que el panell està format per N cèl·lules en sèrie. Es considera que el corrent de la cèl·lula és igual al corrent del panell, i es multiplica el potencial tèrmic del díode pel nombre de cèl·lules en paral·lel.

La font de corrent controlada proporciona el valor del corrent de curtcircuit en funció de la irradiància definida. Per a la configuració del díode es té en compte el seu corrent de saturació, nombre de díodes en sèrie, idealitat del díode i temperatura inicial.

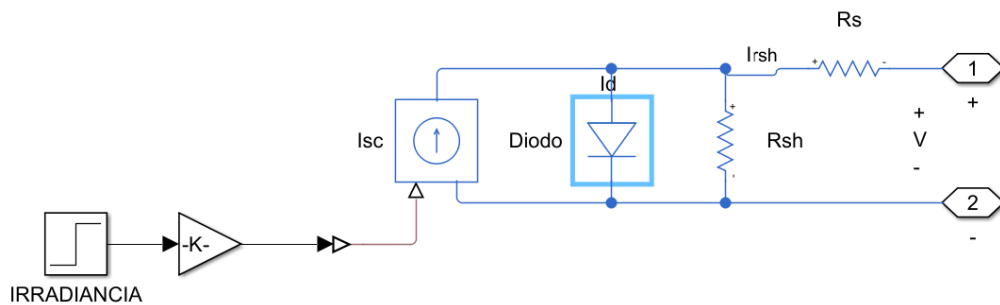


Figura 3-1: Model de la cèl·lula fotovoltaica a Simulink

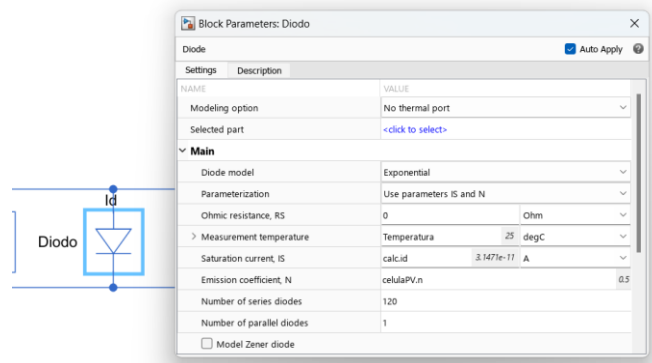


Figura 3-2: Configuració del díode pel model equivalent del panell

Per a la realització d'un model equivalent del panell solar es parteix de les següents dades (extretes del Datasheet):

Potència Màxima	400 W
Tensió en màxima potència (Vmpp)	34,2 V
Corrent en màxima potència (Impp)	11,7 A
Tensió en circuit obert (Voc)	41,2 V
Corrent de curtcircuit (Isc)	12,28 A
Irradiància nominal	1000 W/m ²
Nombre de cèl·lules	120
Coefficient de Temperatura Voc	-0,25%/K
Coefficient de Temperatura Isc	-0,04%/K

Taula 3-1: Valors del Panell Fotovoltaic extrets del Datasheet

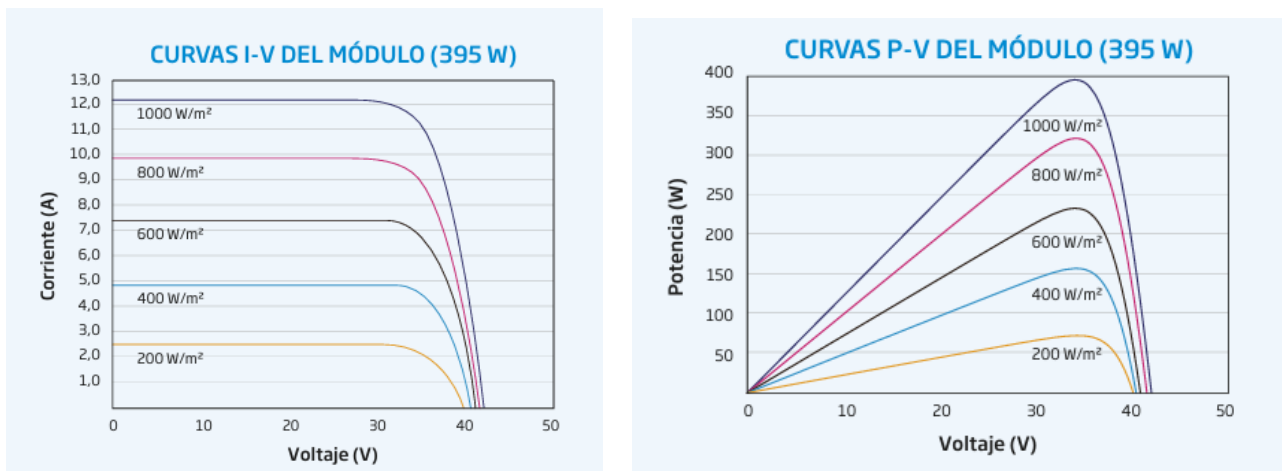


Figura 3-3: Gràfiques V-I P-V extretes del Datasheet

Serà necessari trobar el factor d'idealitat del díode n , la resistència en sèrie R_s i resistència paral·lel R_{sh} que approximi el comportament de la simulació a les gràfiques del Datasheet.

3.1.1 Càlcul dels paràmetres del panell fotovoltaic

S'executa la simulació del panell fotovoltaic en l'entorn Matlab-Simulink per diferents valors de n , R_s i R_{sh} , fins que el comportament del panell sigui el desitjat.

Idealitat del díode n

Es simula el comportament del model equivalent per $n = \{0,5 \ 0,75 \ 1 \ 1,25 \ 1,5\}$. Per tal d'obtenir una potència màxima de 400 W, se selecciona un valor de $n=0,5$. No obstant, aquest resultat no es podria considerar en la realitat, ja que el factor d'idealitat comprèn valors entre $1 < n < 1,5$.

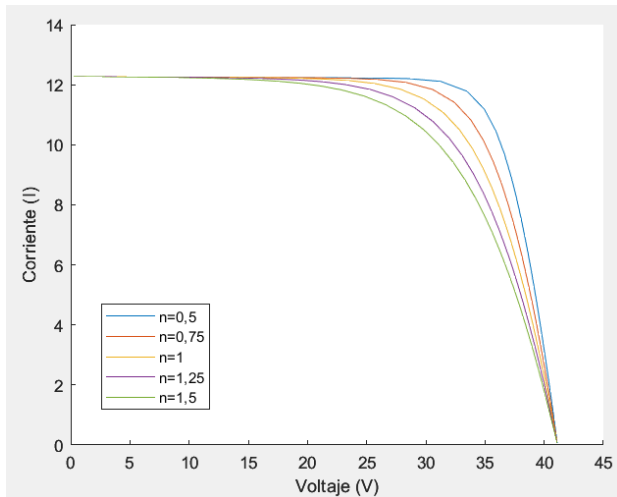


Figura 3-4: Gràfica V-I en funció del factor d'idealitat n

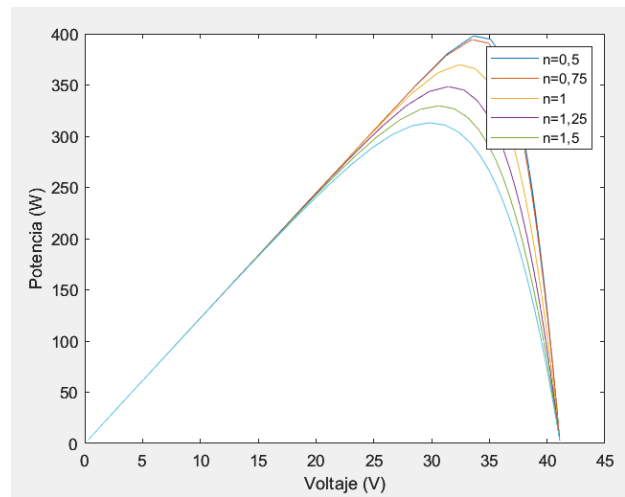


Figura 3-5: Gràfica P-V en funció del factor d'idealitat n

Resistència en sèrie R_s

Simulacions per a resistències en sèrie $R_s = \{1 \ 0,5 \ 0,1 \ 0,05 \ 0,01\}$. Després d'una sèrie d'iteracions se selecciona una Resistència en sèrie $R_s = 0,2 \ \Omega$. A menor resistència menors pèrdues, i el panell obté més potència al seu punt màxim.

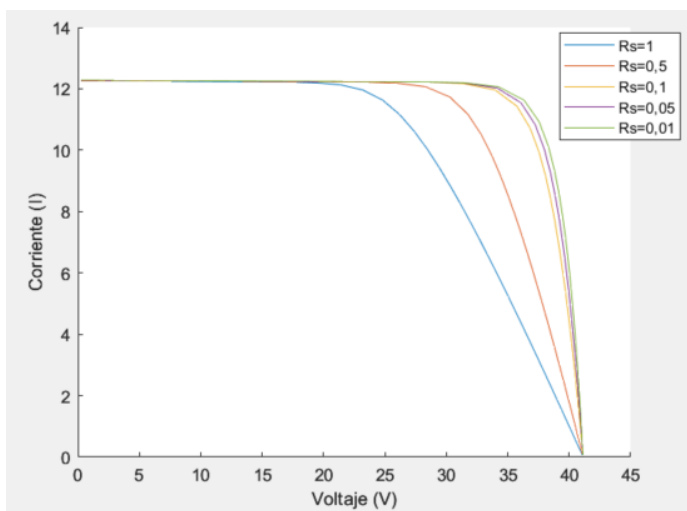


Figura 3-6: Gràfica V-I en funció de R_s

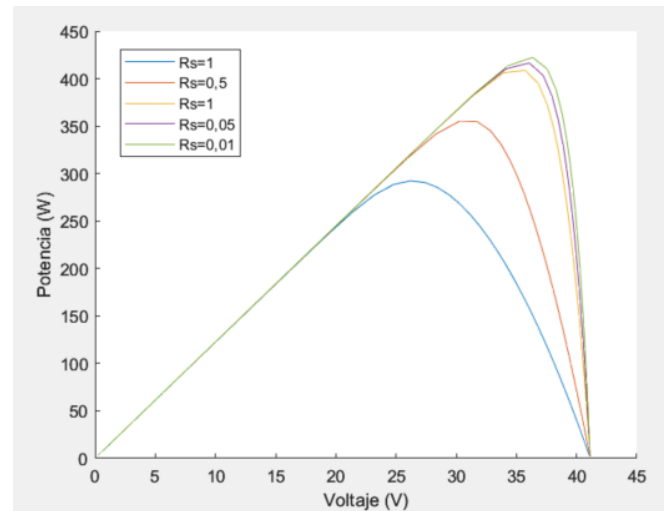


Figura 3-7: Gràfica P-V en funció de R_s

Resistència en paral·lel Rsh

Simulacions per a resistències en paral·lel $R_{sh} = \{ 10 \ 50 \ 100 \ 500 \ 1000 \}$. Per aquest cas el funcionament del panell és més ideal per a resistències més elevades. Es considerarà una resistència R_{sh} de $500 \ \Omega$.

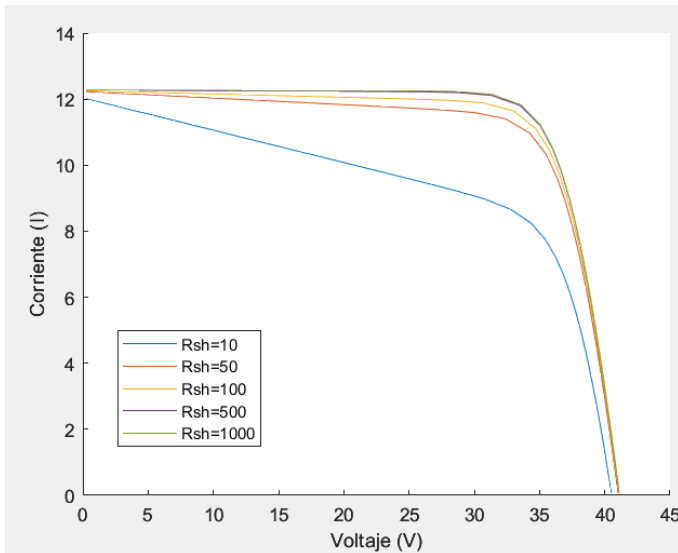


Figura 3-8: Gràfica V-I en funció de Rsh

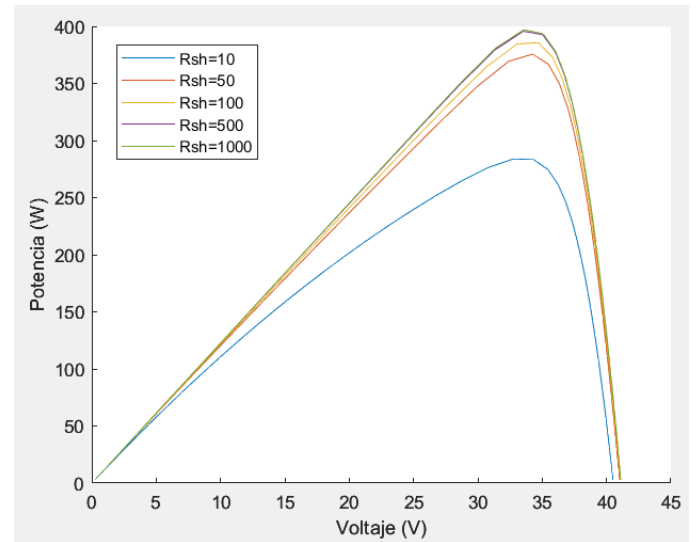


Figura 3-9: Gràfica P-V en funció de Rsh

3.1.2 Resultats del model de panell fotovoltaic

Per als valors de $R_{sh} = 500 \ \Omega$, $R_s = 0,2 \ \Omega$ i idealitat $n = 0,5$ el comportament del panell és l'esperat.

L'última comprovació és observar les variacions en el comportament en funció de la irradiància incident. Els valors de voltatge, corrent i potència son els esperats.

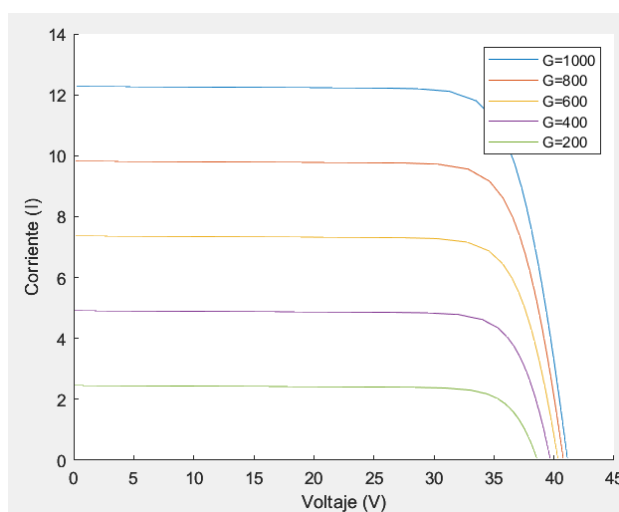


Figura 3-10: Gràfica V-I en funció de la irradiància

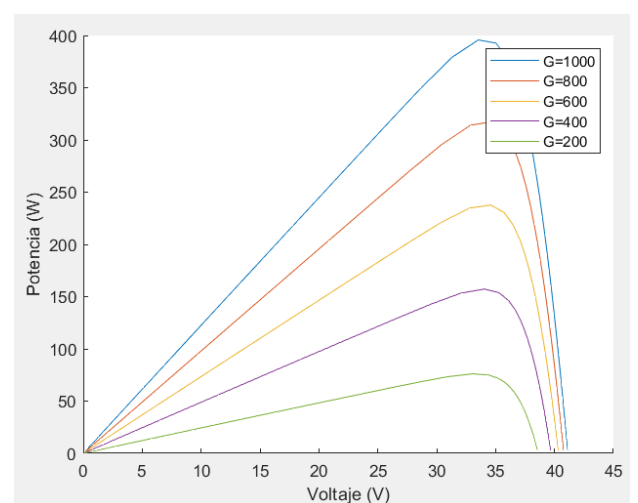


Figura 3-11: Gràfica PV en funció de la irradiància

La simulació es configura amb els següents valors:

Període de commutació	0,01 segons
Cicle de treball inicial	0,5
Cicle de treball mínim	0,9
Cicle de treball màxim	0,1
Variació de cicle de treball	0,01
Eficiència	98,2 %

Taula 3-2: Valors nominals considerats per al funcionament del MPPT

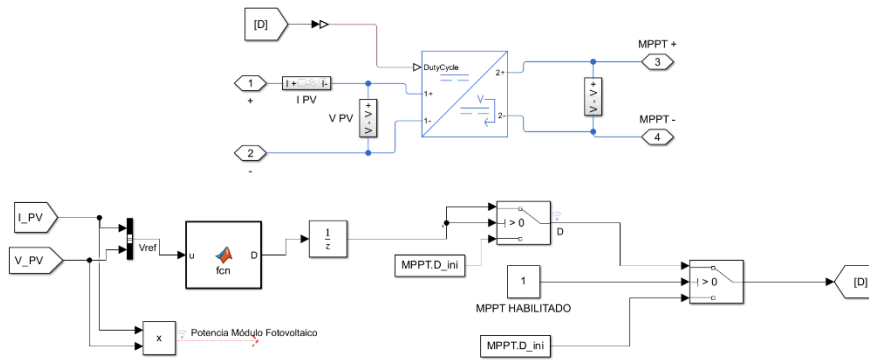


Figura 3-13: Model del MPPT a Simulink

3.2.1 Resultats del model de MPPT

S'observen els resultats obtinguts per a diferents càrregues a la sortida del convertidor CC-CC. Una de les condicions d'un MPPT és que aquest ha de buscar el punt de màxima potència independentment de la impedància a la sortida.

Es realitzen diverses simulacions amb varies càrregues per tal de comprovar que: el voltatge i corrent d'entrada tenen valors aproximats al punt de màxima potència (34,4 V i 11,77 A), i la potència és constant per a totes les càrregues.

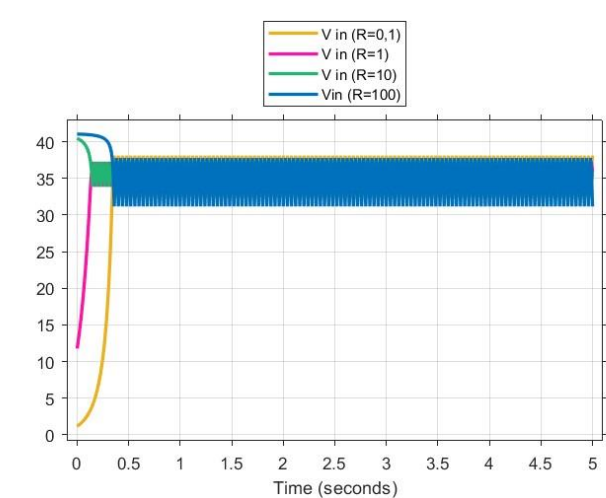
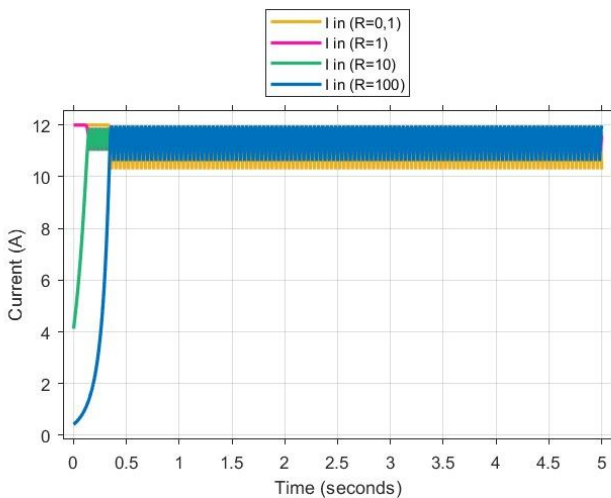


Figura 3-14: Corrent del panell fotovoltaic per diferents càrregues Figura 3-15: Voltatge del panell fotovoltaic per diferents càrregues

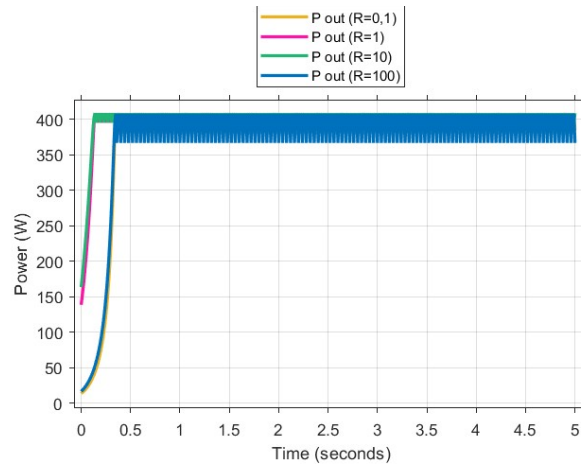


Figura 3-16: Potència del panell fotovoltaic per diferents càrregues

També es comprova com les variacions en la potència d'entrada provinents de la irradiació influeixen en la potència de sortida del MPPT. S'observa que les potències en règim permanent corresponen a les potències màximes per a cada valor de irradiància.

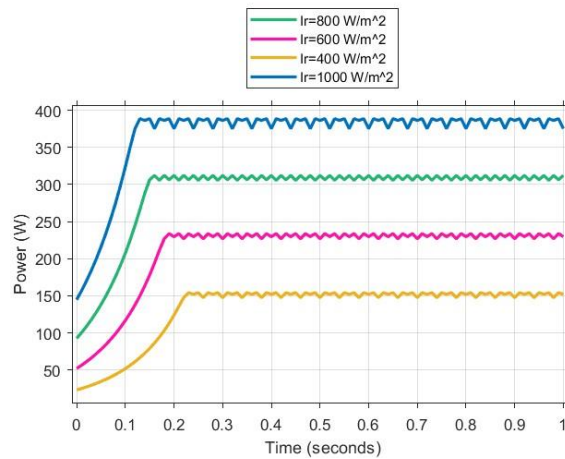


Figura 3-17: Potència del panell fotovoltaic per diferents irradiàncies

3.3 Modelització del Inversor

Es vol modelitzar un inversor monofàsic, d'una sola etapa CC-AC de connexió a la xarxa, tot i que després s'implementarà una bateria en paral·lel. L'inversor haurà de presentar aquest funcionament en condicions nominals:

Potència	5000 W
Voltatge d'entrada	445 V
Corrent d'entrada	11,7 A
Voltatge de sortida	230 V rms
Corrent de sortida	21,7 A rms
Freqüència	50 Hz
Factor de potència	< 0,9
Eficiència	98%

Taula 3-3: Valors nominals de l'inversor

S'implementen dos models diferents d'inversor per a diferents nivells de realisme: un circuit Full-Bridge de 4 MOSFETS, i un model equivalent no commutat.

3.3.1 Model commutat de l'inversor

Per a la simulació del model commutat d'un inversor s'implementa una tipologia H-Bridge amb 4 MOSFETS simulats en mode "ideal switching".

El control de la commutació dels MOSFETS es realitza amb un block de la llibreria Simulink Simscape que crea les senyals de control tipus PWM unipolar. Es considera un valor constant d'índex de modulació.

També s'afegeixen filtres passius en forma de condensadors i bobines per tal de millorar els harmònics de voltatge a la entrada i corrent a la sortida.

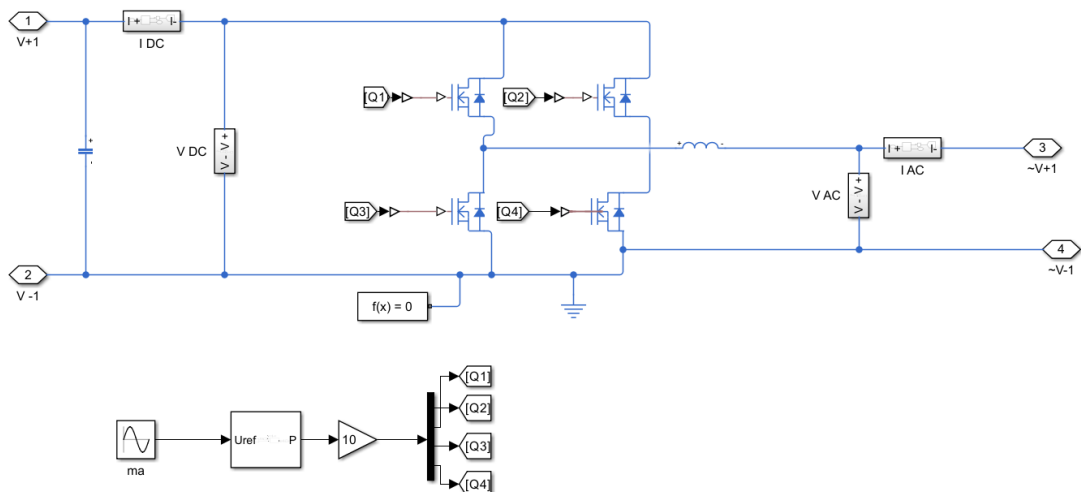


Figura 3-18: Model commutat de l'inversor a Simulink

3.3.3 Resultats dels models d'inversor

Es comprova el funcionament de cada model connectant a la entrada els models del panell fotovoltaic i MPPT, i a la sortida una font de tensió sinusoidal (simulant la xarxa elèctrica).

Per a l'inversor commutat s'observen les següents formes d'ona.

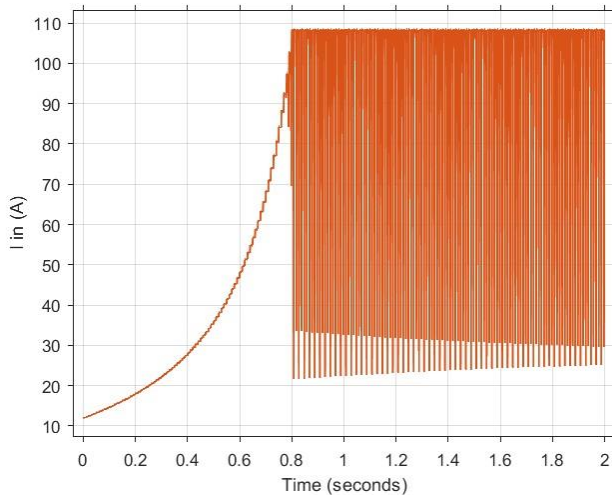


Figura 3-20: Corrent d'entrada de l'inversor pel model commutat

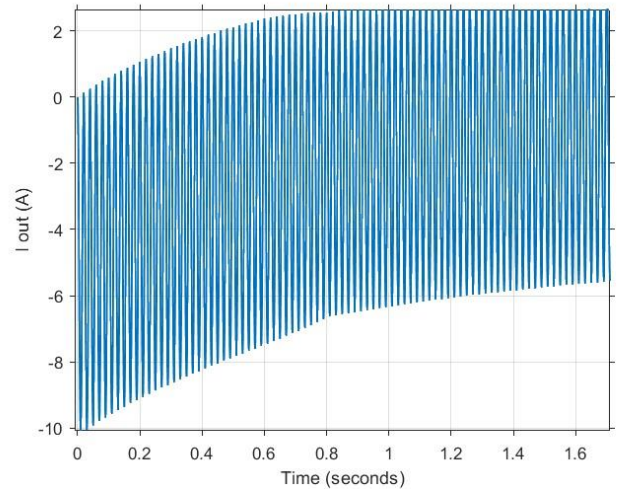


Figura 3-21: Corrent de l'inversor pel model commutat

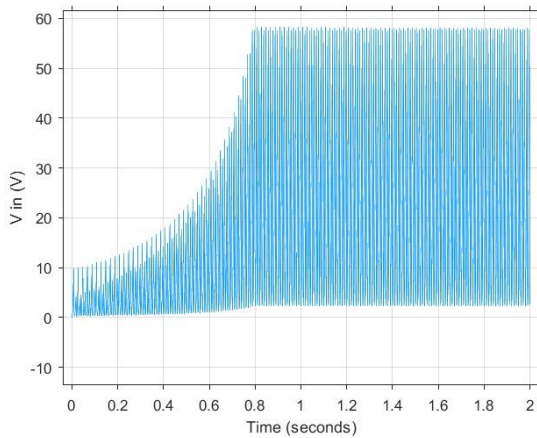


Figura 3-22: Voltatge d'entrada de l'inversor pel model commutat

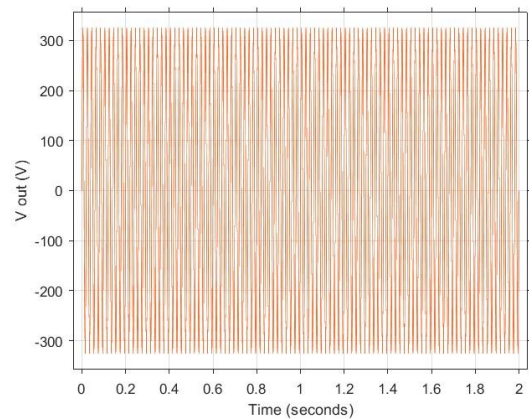


Figura 3-23: Voltatge de sortida de l'inversor pel model commutat

Per aquesta configuració s'extreuen les següents conclusions:

- La sortida del seguidor de punt de màxima potència és incapaç de trobar el punt òptim de funcionament, ja que les condicions de funcionament a la sortida d'aquest influeixen en el circuit d'entrada. Per a la configuració definida el voltatge d'entrada és pràcticament nul.
- És necessari un filtre més complex per reduir els harmònics sense produir un temps d'establiment acceptable, i sense comprometre els valors de voltatge i corrent en règim permanent.
- Per tal de sincronitzar els valors i freqüència del voltatge amb els requerits per la xarxa, i que les perturbacions a l'entrada i sortida de l'inversor no afectin, és necessari un llaç de control més complex.

Com l'objectiu d'aquest treball no és el disseny d'un inversor, s'escull el model no commutat.

Per a la configuració del model no commutat és més senzill obtenir els valors de voltatge i corrent desitjats.

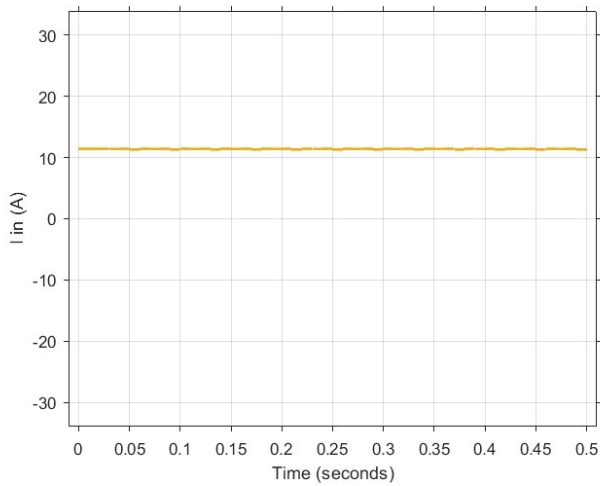


Figura 3-24: Corrent d'entrada de l'inversor pel model no commutat

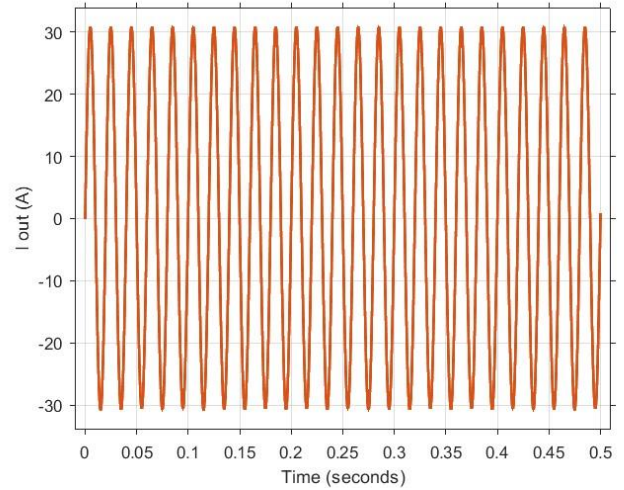


Figura 3-25: Corrent de sortida de l'inversor pel model no commutat

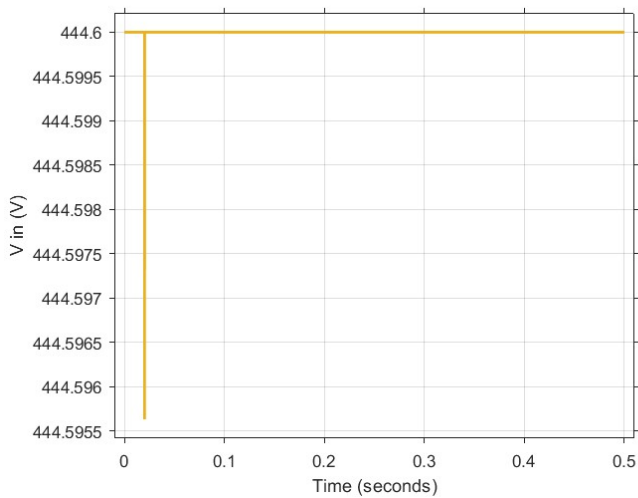


Figura 3-26: Voltatge d'entrada de l'inversor pel model commutat

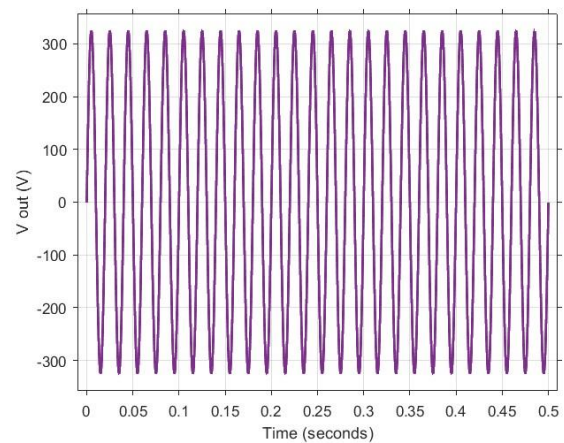


Figura 3-27: Voltatge de sortida de l'inversor pel model commutat

3.4 Modelització de les Bateries

En aquest cas no es vol estudiar el comportament dinàmic de la bateria, sinó el seu funcionament davant situacions d'excés de producció i demanda.

Es parteix de les següents condicions nominals de la bateria:

Energia Útil	9,6 kWh
Voltatge	350 – 450 V
Potència nominal	5 kW
Corrent màxim (V=350)	14,3 A

Taula 3-4: Valors nominals de la bateria emmagatzemadora

Es considera que la bateria treballa a un voltatge constant independentment de la potència a carregar/descarregar. Com el model d'inversor descrit a l'apartat anterior no contempla l'entrada de voltatge d'una bateria, aquesta es connectarà en paral·lel amb els mòduls fotovoltaics generadors, a l'entrada de l'inversor. Per tant, la bateria haurà de proporcionar el mateix voltatge (445 V) que el conjunt de panells. Donat que aquest valor forma part del rang de funcionament nominal de la bateria a modelitzar, es pren aquesta solució per vàlida. Partint d'aquesta idea, la injecció de potència de la bateria serà en forma de corrent. El model es basarà en una font de corrent controlada a partir de les següents instruccions.

- La potència que la bateria carrega/descarrega es calcula com la diferència entre la potència definida a la xarxa i la potència generada pel camp fotovoltaic.
- El corrent a subministrar es calcula com el quocient entre la potència de sortida de la bateria i el voltatge de bateria definit.
- El corrent, potència i energia emmagatzemada estan limitats d'acord amb els valors definits anteriorment a la taula. En cas de que el valor de corrent calculat sobrepassi els límits, aquest quedarà limitat al seu màxim/mínim.
- Des del Dashboard de la simulació de Simulink es permet la encesa i apagada de la bateria. En cas d'apagar la bateria, el corrent de la font serà nul.

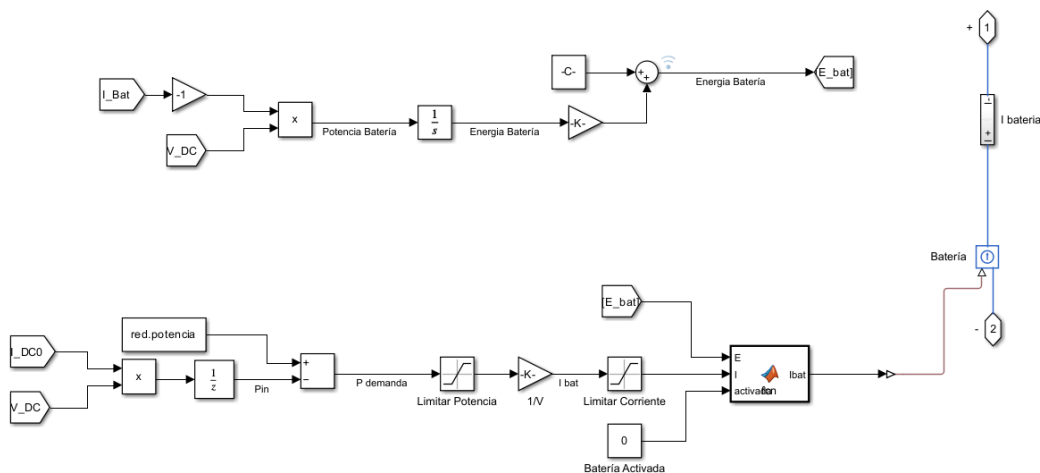


Figura 3-28: Model de la bateria en Simulink

3.4.1 Resultats del model de bateria

Per comprovar el funcionament del model s'observa el seu comportament davant excedents i demanda de producció:

El cas d'excedent en la generació es donarà quan la potència de la càrrega és menor a la potència generada. Per aquest mode de funcionament s'observa que la bateria absorbeix corrent (corrent negatiu) i l'energia emmagatzemada augmenta.

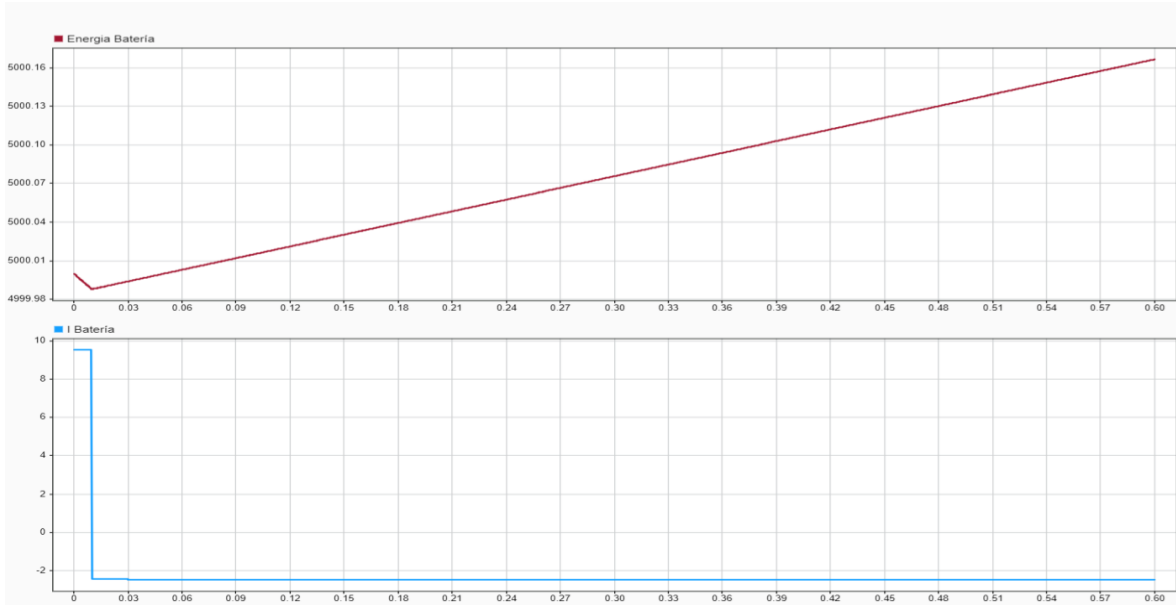


Figura 3-29: Corrent i energia de la bateria per excedent de generació

El cas de demanda en la generació es donarà per irradiàncies menors. Les gràfiques mostrades a continuació mostren les formes d'ona de la bateria per una irradiància de 100 W/m². Per aquest mode de funcionament la bateria injecta potència al sistema (corrent positiu), mentre que la energia emmagatzemada disminueix.

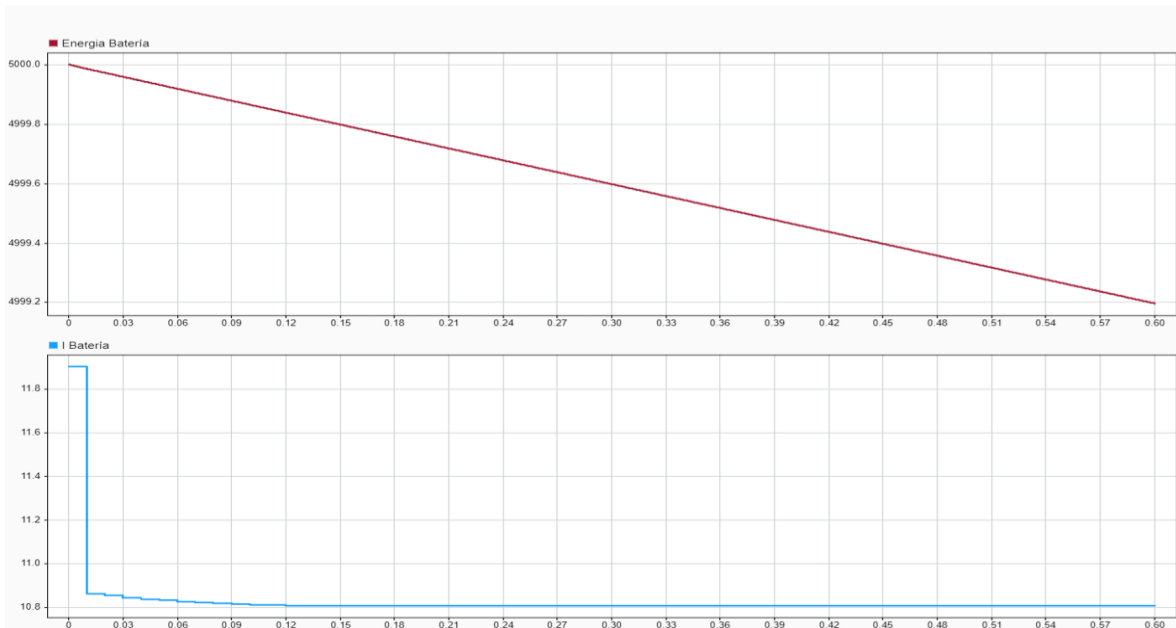


Figura 3-30: Corrent i energia de la bateria per demanda de generació

3.5 Modelització de les proteccions elèctriques

A la simulació s'inclouen els següents elements per als valors indicats:

Fusibles Mòduls Fotovoltaics	I nominal = 20 A	Itall/Inominal = 1,2
Fusibles CC	I nominal = 15 A	Itall/Inominal = 1,2
Protecció de Sobretensions CC	V màxima = 1000 V	
Protecció de Sobretensions AC	V màxima = $1,2 \cdot \overline{U_n}$ V	
Interruptor Automàtic Inversor	I nominal = 32 A	Itall/Inominal = 8 Ttall = 0.025s
Interruptor Automàtic Xarxa	I nominal = 32 A	Itall/Inominal = 8 Ttall = 0.025s
Interruptor diferencial	I = 30 mA	
Subtensió-Sobretensió	$0,85 U_n < V < 1,1 U_n$	Ttall max = 0,5 s
Límits de freqüència	$49 < f < 51$	Ttall max = 5T d'ona

Taula 3-5: Proteccions i valors nominals considerats

Els paràmetres nominals s'han extret dels Datasheets proporcionats. Per tal de simplificar els models no s'ha considerat el temps de dispar en funció dels valors màxima admissibles. Totes funcionen a partir de la mesura dels valors a regular, i en funció del resultat actuen o no, passat el temps (constant) establert.

Es comprovarà individualment que aquests funcionen correctament pels valors nominals. Per als valors límit establerts actuen i donen una senyal del seu estat als indicadors inclosos al Dashboard de la simulació.

3.5.1 Fusibles

Per a la modelització dels fusibles s'utilitza l'element "Fuse" de la llibreria Simscape Electrical. Es configura per al valor nominal de corrent i el ratio Corrent de Tall/Corrent Nominal.

S'inclou un fusible per a cada mòdul fotovoltaic (indicat al seu Datasheet) i un a la connexió entre el camp fotovoltaic i l'entrada de l'inversor.

Per comprovar el seu funcionament es connecta en sèrie una font de corrent amb el seu valor nominal i un valor superior al límit.

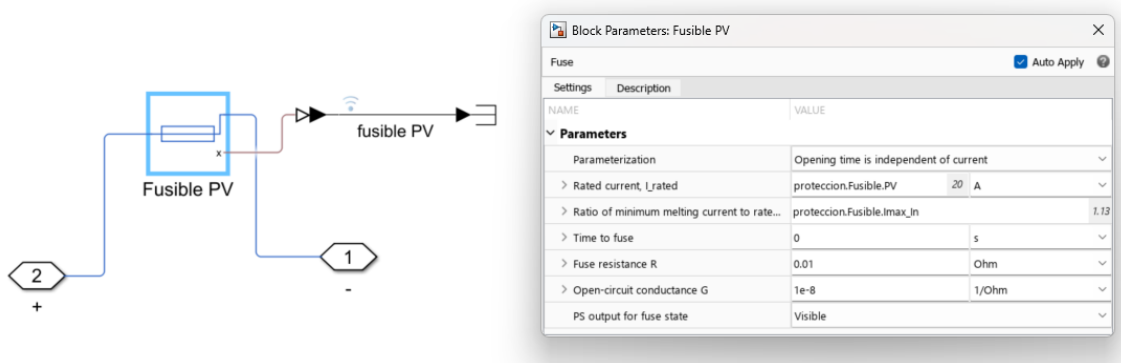


Figura 3-31: Model de Fusible i Configuració

S'observa que pel seu corrent nominal presenta lleugeres pèrdes degut a la resistència interna, i per al corrent de tall establert s'obre el circuit ($I = 0$ A).

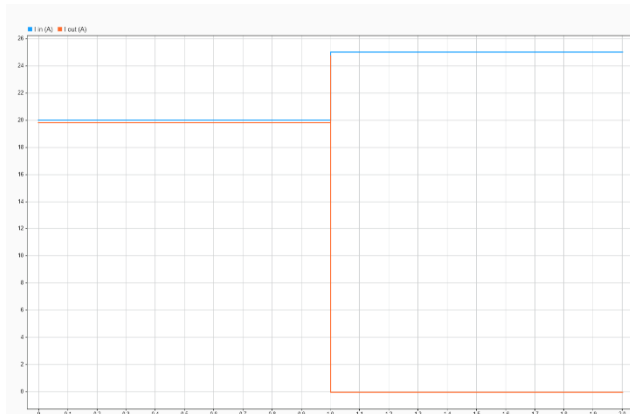


Figura 3-32: Corrent al fusible PV

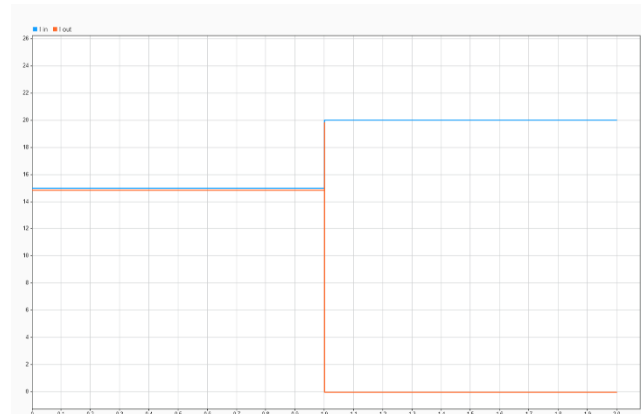


Figura 3-33: Corrent al fusible CC

3.5.2 Protecció de sobretensions

Per simular l'efecte de les proteccions per sobretensions s'utilitza un varistor (resistència variant en funció del voltatge). S'utilitza una parametrització lineal, es a dir, fins al voltatge definit la resistència pren un valor de resistència suficientment gran per considerar-se un circuit obert. Un cop superat aquest voltatge la impedància augmenta per tal de reduir d'excés d'energia elèctrica.

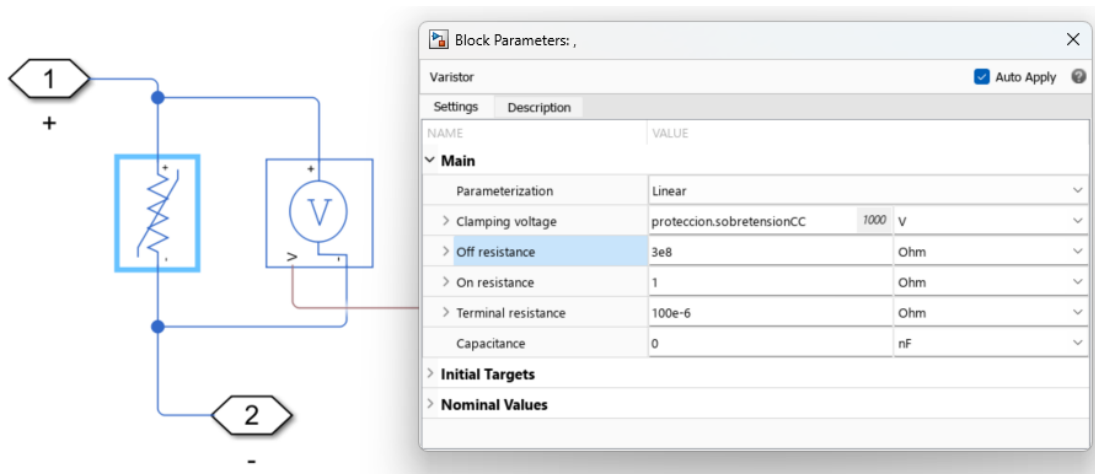


Figura 3-34: Model de protecció de sobretensions i Configuració

Es comprova el punt de funcionament dels varistors per a les seves condicions nominals, i per un valor superior de voltatge. S'utilitzarà una senyal constant per al voltatge de les proteccions CC i un senyal sinusoidal per a les proteccions AC.

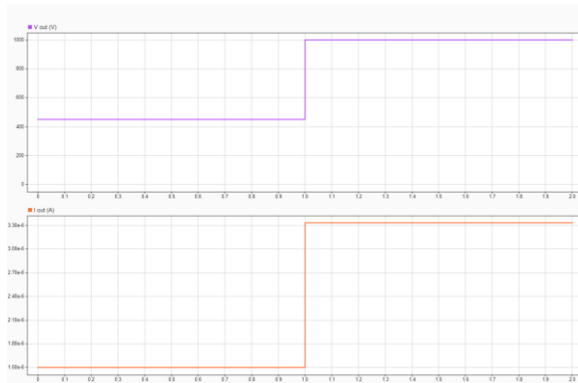


Figura 3-4: Corrent i Tensió a la PDS CC

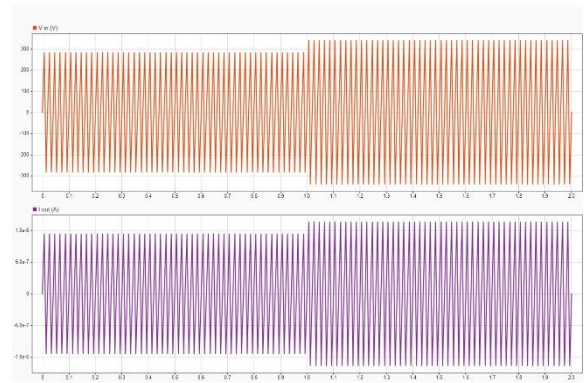


Figura 3-36: Corrent i Tensió a la PDS AC

3.5.3 Interruptor Diferencial

El model d'interruptor diferencial consisteix en dos amperímetres i un interruptor. Cada amperímetre mesura el corrent a l'entrada i sortida del circuit.

La funció implementada calcula la diferència entre corrents. En cas que la diferència entre corrents superi el valor establert, obre el circuit i el manté obert fins acabar la simulació.

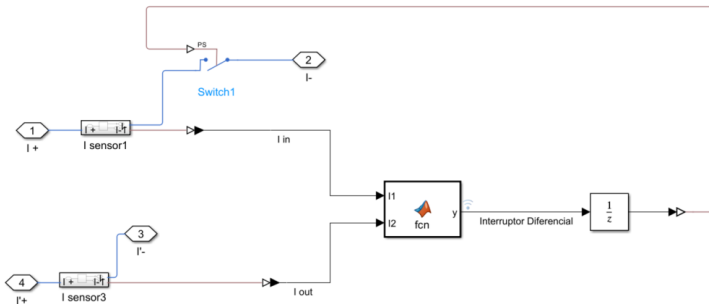


Figura 3-37: Model del Interruptor Diferencial

Es comprova el funcionament per a corrents iguals i diferents entre els dos punts de mesura. S'observa que, en detectar la diferència de corrent entre els punts de mesura el corrent s'anul·la.

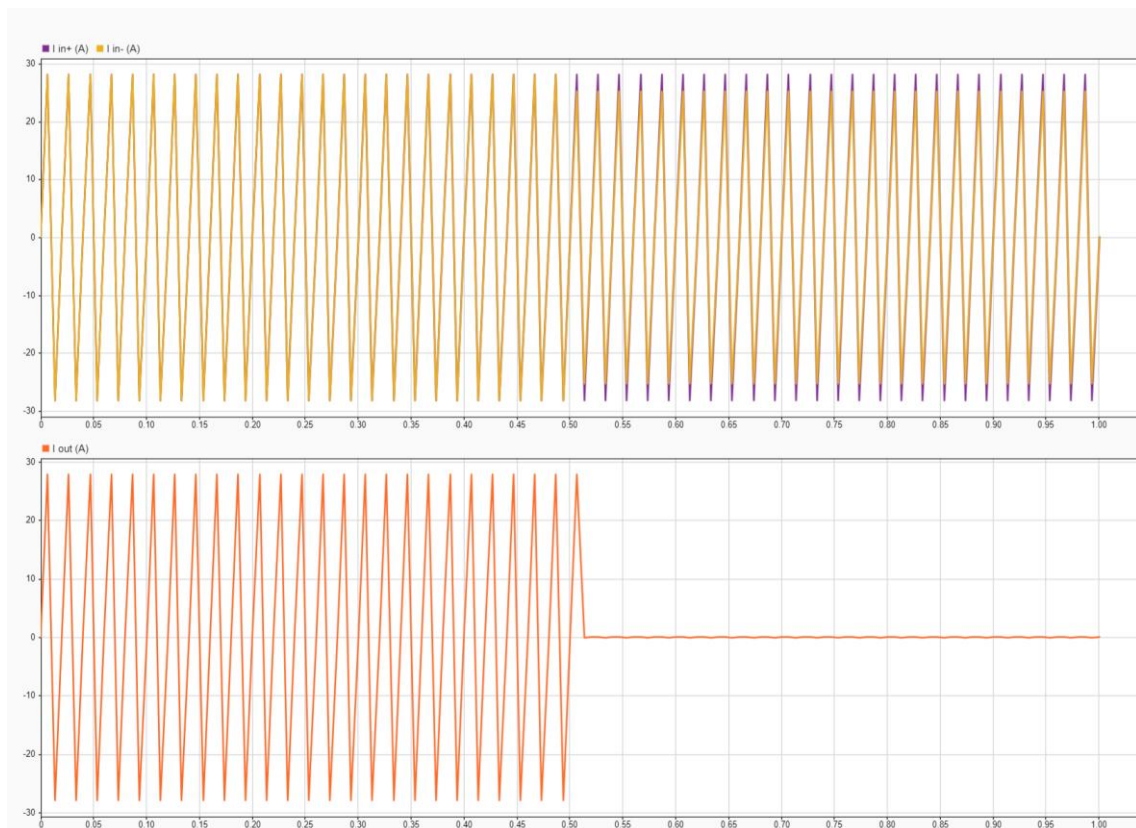


Figura 3-38: Corrent al Interruptor Diferencial

3.5.4 Interruptor Automàtic

El model d'interruptor automàtic comprèn un amperímetre i un bloc "breaker". La funció compara el corrent mesurat amb el valor màxim establert i crea un senyal per obrir l'interruptor i mantenir-lo així fins el final de la simulació. S'afegeix un bloc "delay" configurat amb el temps de dispar establert.

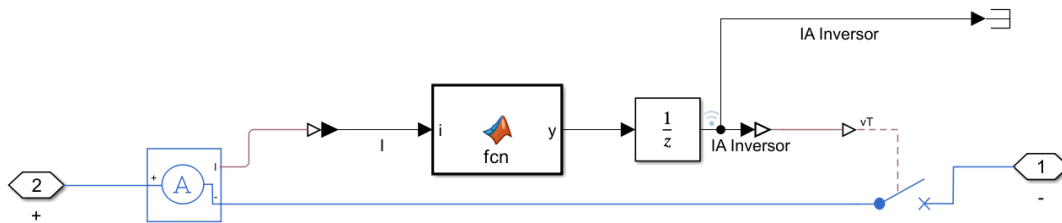


Figura 3-39: Model d'interruptor automàtic

Es comprova el dispar de l'interruptor automàtic en variar el corrent d'entrada a un valor superior al corrent de tall. La resposta és l'esperada, el corrent s'anul·la passat el temps establert.

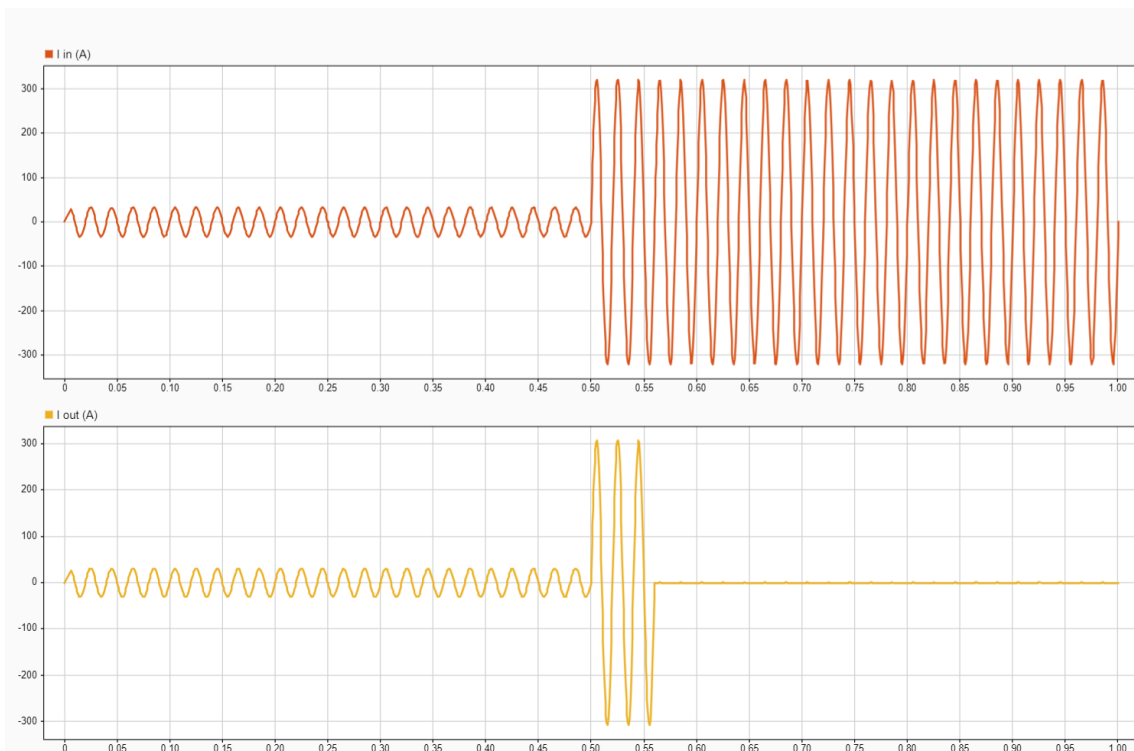


Figura 3-40: Corrent a l'interruptor automàtic

3.5.5 Proteccions de connexió a la xarxa elèctrica

Per a la simulació de les proteccions de connexió a la xarxa elèctrica s’han utilitzat 4 breakers: sobretensió, subtensió, freqüència superior i freqüència inferior.

Es mesura el voltatge de sortida de l’inversor (“V_AC”) i mitjançant els blocs “Fourier” i “PLL” es calcula l’amplitud d’ona i freqüència. Aquests valors es comparen amb els límits establerts per controlar l’apertura de cada bloc “Breaker”. També es graven les senyals de control per visualitzar l’estat de cada interruptor des del Dashboard.

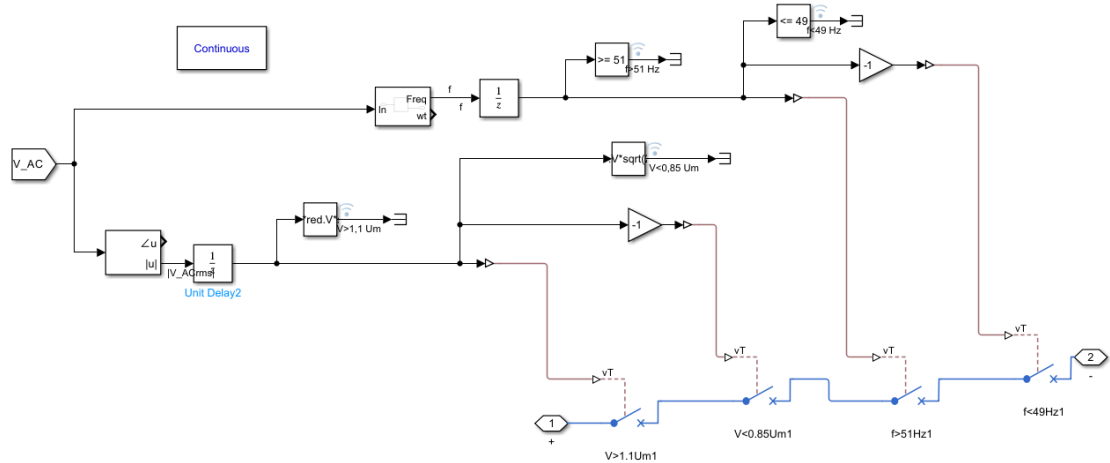


Figura 3-41: Modelatge de les proteccions de connexió a la Xarxa Elèctrica

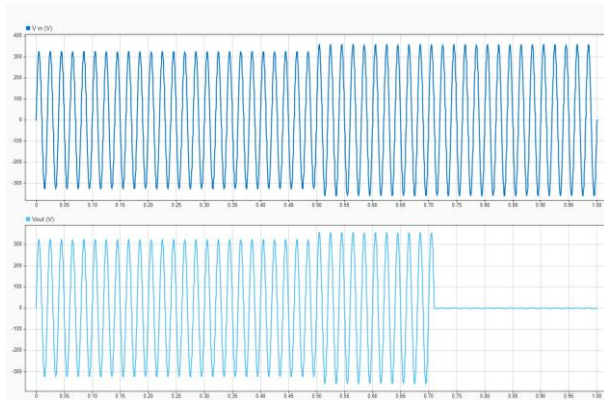


Figura 3-42: Voltatge a la connexió per $V=1,1U_n$

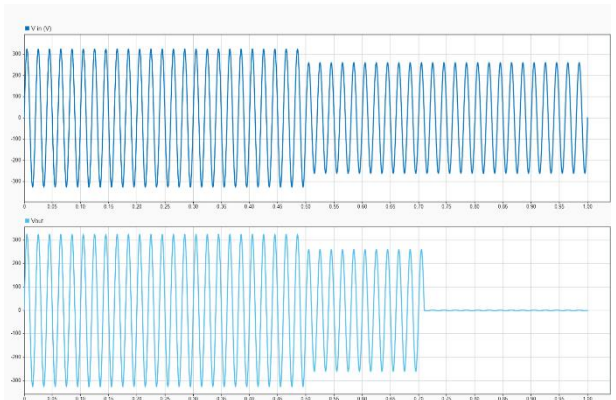


Figura 3-43: Voltatge a la connexió per $V=0,8U_n$

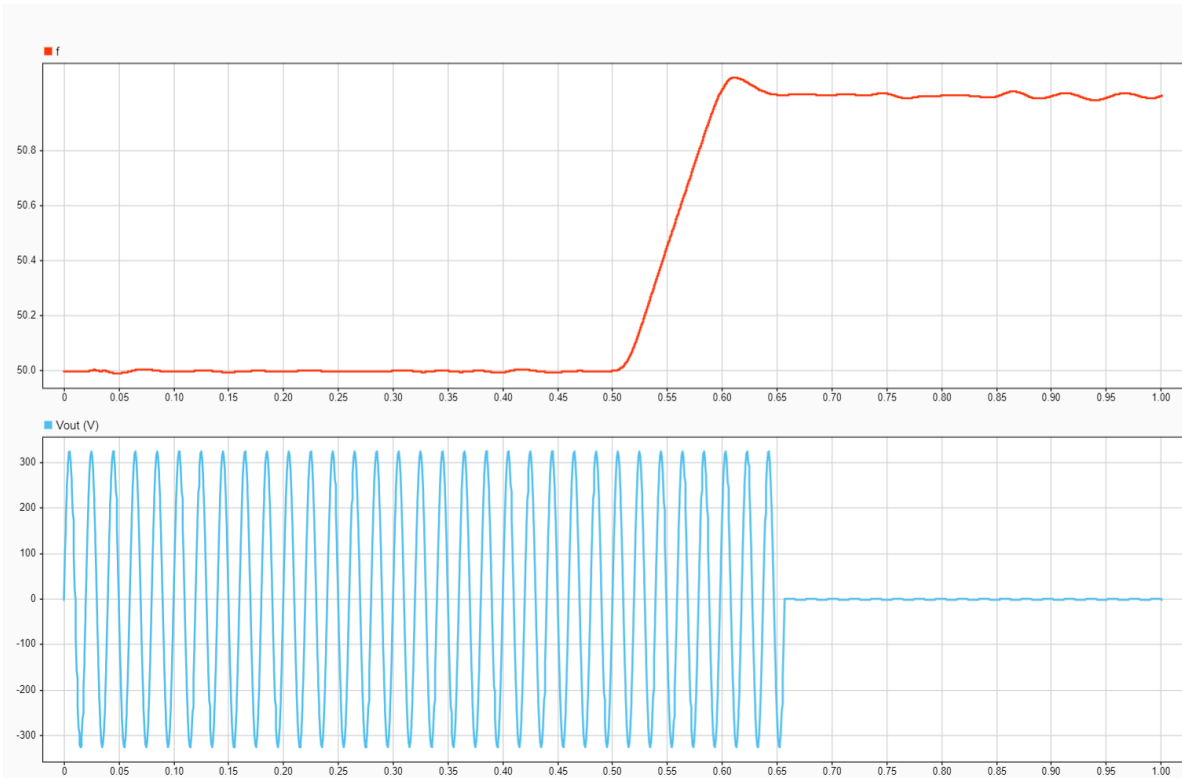


Figura 3-44: Voltatge a la connexió per $f = 51$ Hz

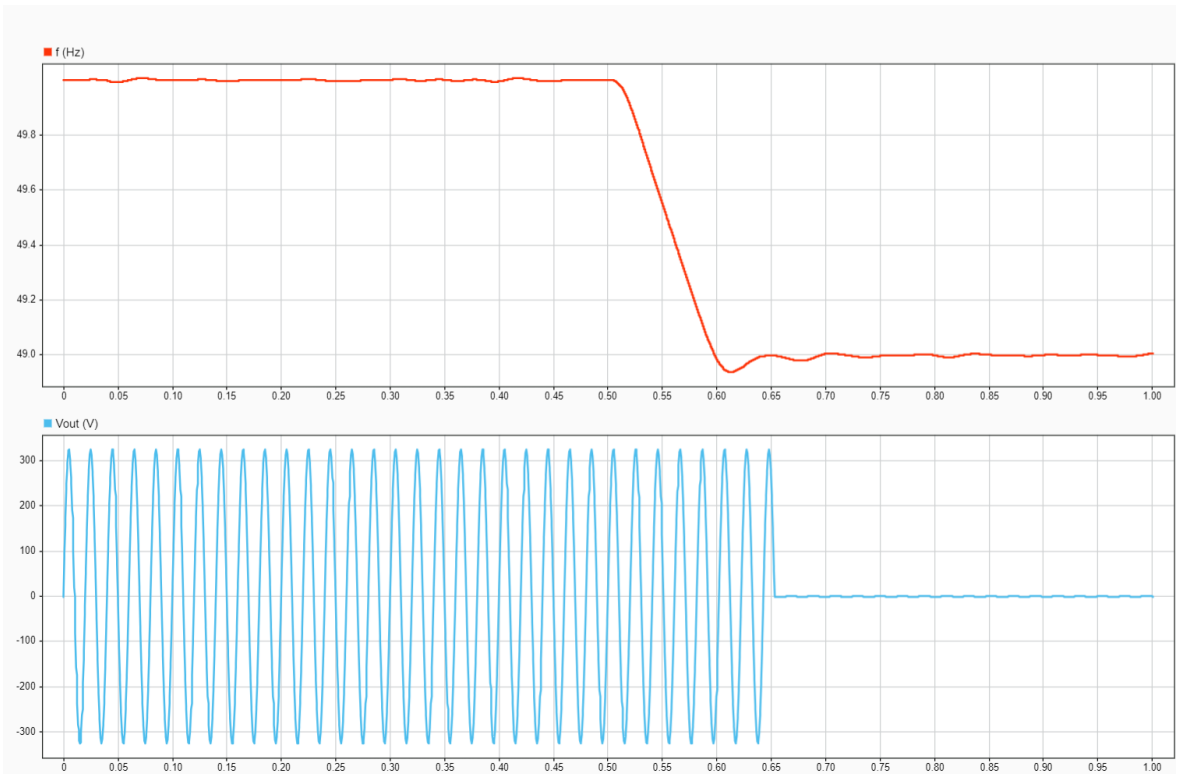


Figura 3-45: Voltatge a la connexió per $f = 49$ Hz

4 Modelatge de la Instal·lació Fotovoltaica

El sistema complet a modelitzar és una instal·lació fotovoltaica menor de 15 kW en modalitat d'autoconsum, amb excedents aïllats a compensació i emmagatzematge. La finalitat d'aquesta és la generació d'energia per consumir-se en l'habitatge (consum previst de 5 kW per aquest cas). En cas d'excedents l'energia s'emmagatzema en un sistema de bateries, i si no és possible (o la bateria ja està plena) s'injecta a la xarxa elèctrica. En cas de no cobrir totalment el consum demandat, l'habitatge consumeix electricitat de la xarxa. La instal·lació mai funcionarà aïllada de la xarxa, les desconexions només es realitzaran en cas de dispar de les proteccions elèctriques. Els elements fonamentals d'una instal·lació d'aquest tipus, ja descrits en capítols anteriors, es distribueixen de la següent forma:

- 13 mòduls fotovoltaics, cadascun amb fusibles DC al pol positiu i negatiu i connectats al seu respectiu optimitzador. Els panells es distribuiran en un sol string.
- A la connexió entre el string de panells i l'inversor es disposa de fusibles DC i protecció contra sobretensions permanents i transitòries.
- L'inversor híbrid treballa amb la potència d'entrada dels panells fotovoltaics i la bateria. En funció de la generació de potència i la demanda d'aquesta les bateries es carregaràn o descarregaràn.
- L'inversor haurà d'assegurar que la tensió i freqüència a la sortida d'aquest es troba en els valors establerts. En cas de no ser així, es desconectarà de la resta de la instal·lació (proteccions de connexió a la xarxa elèctrica).
- La connexió entre la instal·lació fotovoltaica i el consum de l'habitatge constarà de proteccions AC: un interruptor general automàtic i un interruptor diferencial.
- El punt de connexió entre el consum de l'habitatge i la xarxa elèctrica constarà de proteccions contra sobretensions transitòries i permanents i un interruptor general automàtic.

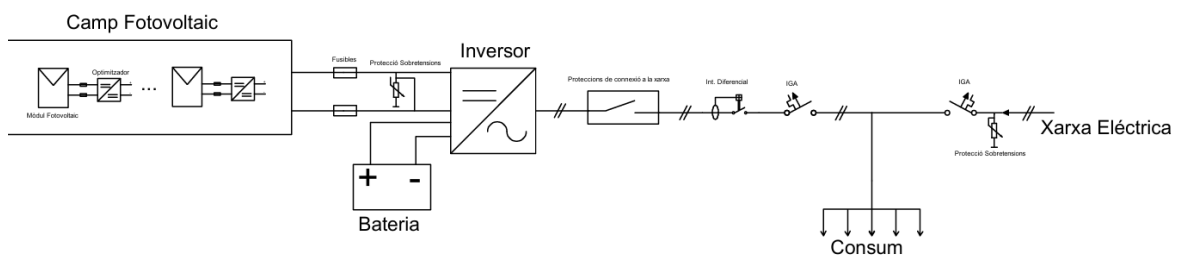


Figura 4-1: Esquema Instal·lació Fotovoltaica d'autoconsum

A partir dels components modelitzats en els apartats anteriors es completa el model de la instal·lació fotovoltaica. També s'afegeixen les pèrdues corresponents al cablejat elèctric i elements per la visualització dels resultats de la simulació.

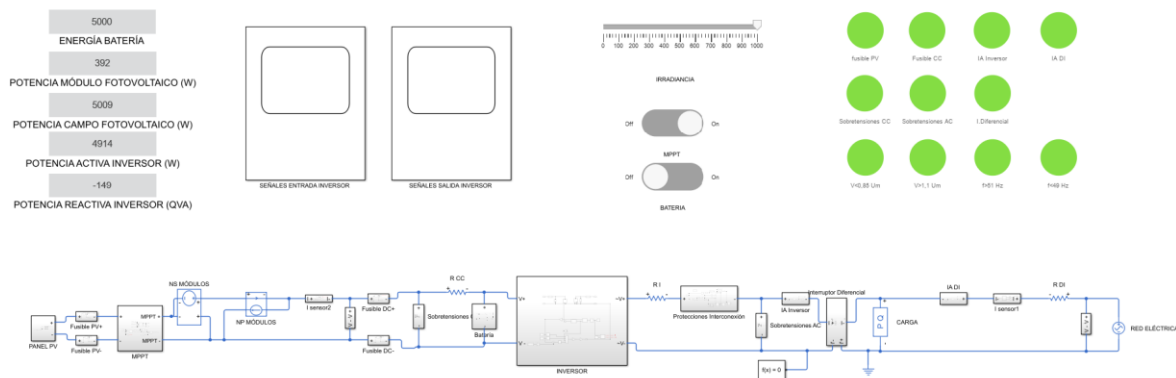


Figura 4-2: Model complet de la Instal·lació Fotovoltaica en Simulink

Camp fotovoltaic

Es considerarà amb el nom de “Camp Fotovoltaic” el conjunt de panells fotovoltaics, fusibles dels panells i MPPTs.

Es connecta un sol panell fotovoltaic en sèrie amb els seus corresponents fusibles de protecció i un bloc MPPT. Aquest conjunt d'elements s'anomenarà mòdul. Per agilitzar la simulació, es considera que tots els mòduls tenen les mateixes característiques i proporcionen el mateix corrent i voltatge.

A partir del corrent i voltatge de sortida del bloc MPPT, s'utilitzen fonts controlades de tensió i corrent per configurar el nombre de panells en sèrie i paral·lel.

Les fonts controlades de tensió i corrent es configuren amb les següents expressions:

$$V_{out} = -V_{in} \times (N_{mòdul\ sèrie} - 1) \quad (11)$$

$$I_{out} = -I_{in} \times (N_{mòdul\ paral·lel} - 1) \quad (12)$$

A la sortida del camp fotovoltaic, voltatge i corrent dependran del nombre de mòduls connectats en sèrie i paral·lel i del punt de funcionament.

$$V_{camp} = V_{mòdul} \times N_{mòdul\ sèrie} \quad (13)$$

$$I_{camp} = I_{mòdul} \times N_{mòdul\ sèrie} \quad (14)$$

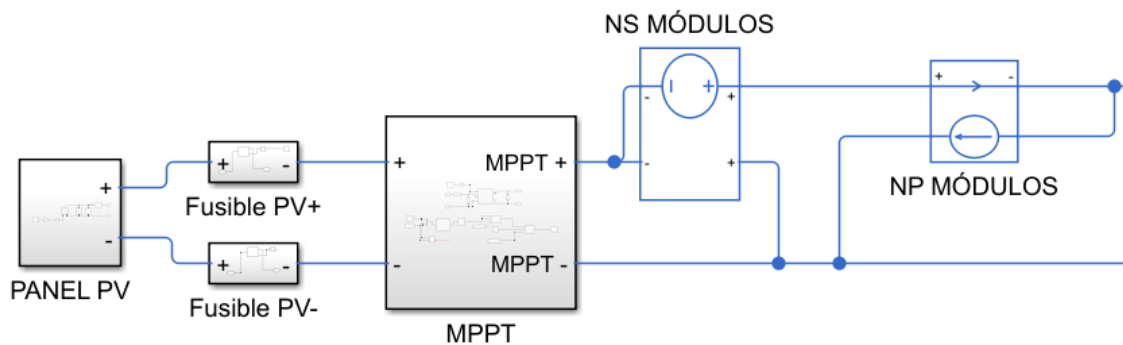


Figura 4-3: Model del camp fotovoltaic

Cablejat Elèctric

Com les connexions a l'entorn de Simulink son ideals, per modelar les pèrdues provocades pel cablejat elèctric s'han connectat resistències en sèrie entre components.

Es consideren 3 trams de cablejat: dels panells fotovoltaics a l'entrada de l'inversor, de la sortida de l'inversor al punt de connexió amb la càrrega i xarxa elèctrica, i del punt de connexió a la xarxa elèctrica.

Per al càlcul de la resistència del cablejat es té en compte la longitud del tram, i superfície i material del cable.

$$R = N_{conductors} \times \rho \times \frac{l}{S} \quad (15)$$

Tram	N	$\rho(\Omega mm^2/m)$	L (m)	S(mm ²)	R(Ω)
String-Inversor	2	1/56 (coure)	37	4	0,33
Inversor-Punt Connexió	2	1/56 (coure)	1	6	0,006
Punt Connexió-Xarxa	2	1/56 (coure)	3	6	0.018

Taula 4-1: Paràmetres i resistència per cada tram de cablejat

Si es calcula la resistència en funció de la caiguda de tensió i el corrent nominal de cada tram, s'observen resultats molt aproximats. Es consideraran els valors de resistències en funció dels paràmetres del cable.

Tram	C.d.T(%)	V Nominal (V)	I Nominal (A)	R (Ω)
String-Inversor	1,16	445	11,7	0,44
Inversor- Punt Connexió	0,08	230	27,06	0,0068
Punt Connexió-Xarxa	0,23	230	27,06	0.019

Taula 4-2: Caigudes de tensió i punt de funcionament nominal per cada tram de cablejat

Xarxa elèctrica i càrrega

El model de la instal·lació correspon a una instal·lació generadora interconnectada. És a dir, la sortida de l'inversor es connectarà a la xarxa elèctrica i a un consum de potència en baixa tensió.

Entre l'inversor i el punt de connexió es disposen les proteccions elèctriques del quadre general de protecció i control (sobretensions, interruptor automàtic, interruptor diferencial i proteccions de connexió a la xarxa). De la xarxa elèctrica al punt de connexió s'afegeix un nou interruptor automàtic corresponent a la derivació individual.

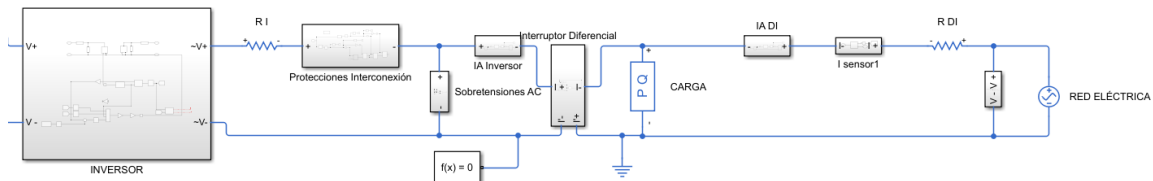


Figura 4-4: Model de la connexió inversor, quadre general de protecció i control, xarxa elèctrica i consum.

La xarxa elèctrica es modelitza amb una font de tensió sinusoidal configurada amb l'amplitud de voltatge i freqüència. Per al consum en baixa tensió s'utilitza un bloc de càrrega de potència constant, configurat amb el voltatge d'entrada nominal i la potència activa i reactiva a consumir.

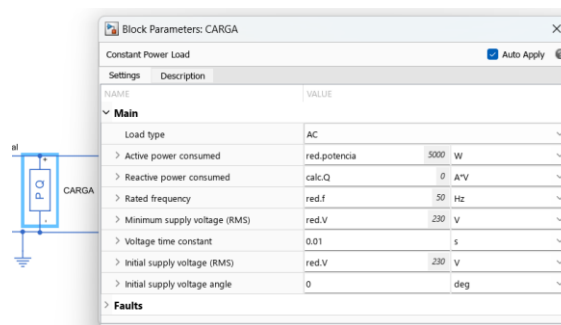


Figura 4-5: Model de càrrega de potència i configuració

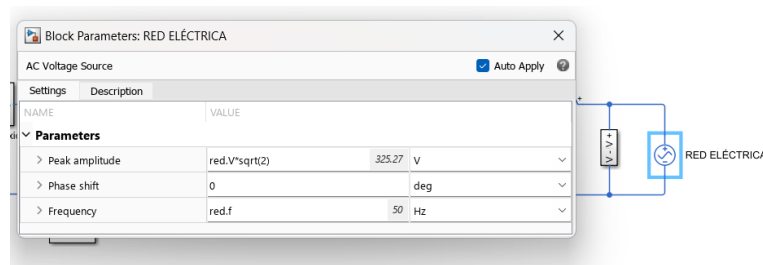


Figura 4-6: Model de xarxa elèctrica i configuració

Dashboard

Es dissenya un Dashboard per facilitar la interacció de l'usuari amb el model. Des de la simulació de Simulink s'implementen les següents funcions:

- Modificació del valor d'irradiació incident als panells fotovoltaics.
- Encesa i aturada de les funcions del MPPT i la Bateria.
- Visualització dels valors de potència del panell fotovoltaic, camp fotovoltaic, potència activa i reactiva de l'inversor i energia disponible a la bateria.
- Visualització de les formes d'ona de corrent i voltatge a l'entrada i sortida de l'inversor.
- Visualització de l'estat de cada element de protecció elèctrica:
 - o Fusibles de protecció del panell fotovoltaic.
 - o Fusibles d'entrada CC a l'inversor
 - o Protecció de sobretensions CC a l'entrada de l'inversor.

- Interruptor Vinversor $> 1,1 U_n$
- Interruptor Vinversor $< 0,85 U_n$
- Interruptor f inversor $> 51 \text{ Hz}$
- Interruptor f inversor $< 49 \text{ Hz}$
- Protecció de sobretensions del QGCP.
- Interruptor Automàtic del QGCP.
- Interruptor Diferencial del QGCP.
- Interruptor automàtic de la Derivació Individual

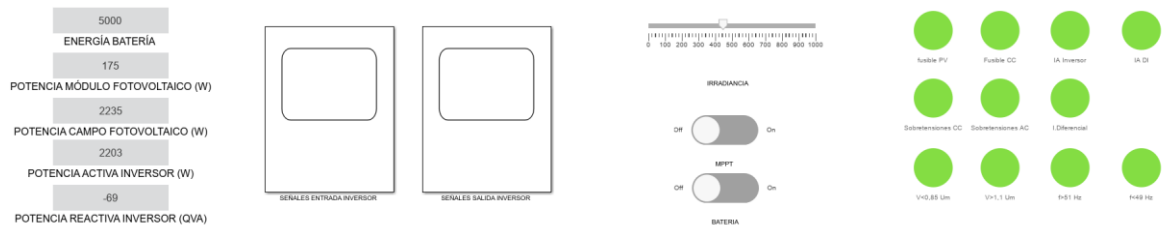


Figura 4-7: Dashboard de la Simulació

5 Estudi de les simulacions

5.1 Condicions nominals

La primera prova és el seu funcionament del model per a les condicions nominals definides als paràmetres del fitxer Matlab, irradiància de 1000 W/m², MPPT activat i bateria desactivada. A la taula es mostren els valors esperats per aquestes condicions.

Paràmetre	Valor
Voltatge mòdul PV	34,2 V CC
Corrent mòdul PV	11,7 A CC
Potència panell PV	392 W
Corrent entrada Inversor	11,7 A CC
Voltatge entrada Inversor	445 V CC
Potència d'entrada Inversor	5096 W
Voltatge de sortida Inversor	311 Vpic AC (230 Vrms)
Corrent de sortida Inversor	30,74 Apic AC
Potència de sortida Inversor	4944 W

Taula 5-1: Condicions nominals de la instal·lació fotovoltaica

S'observen les següents formes d'ona:

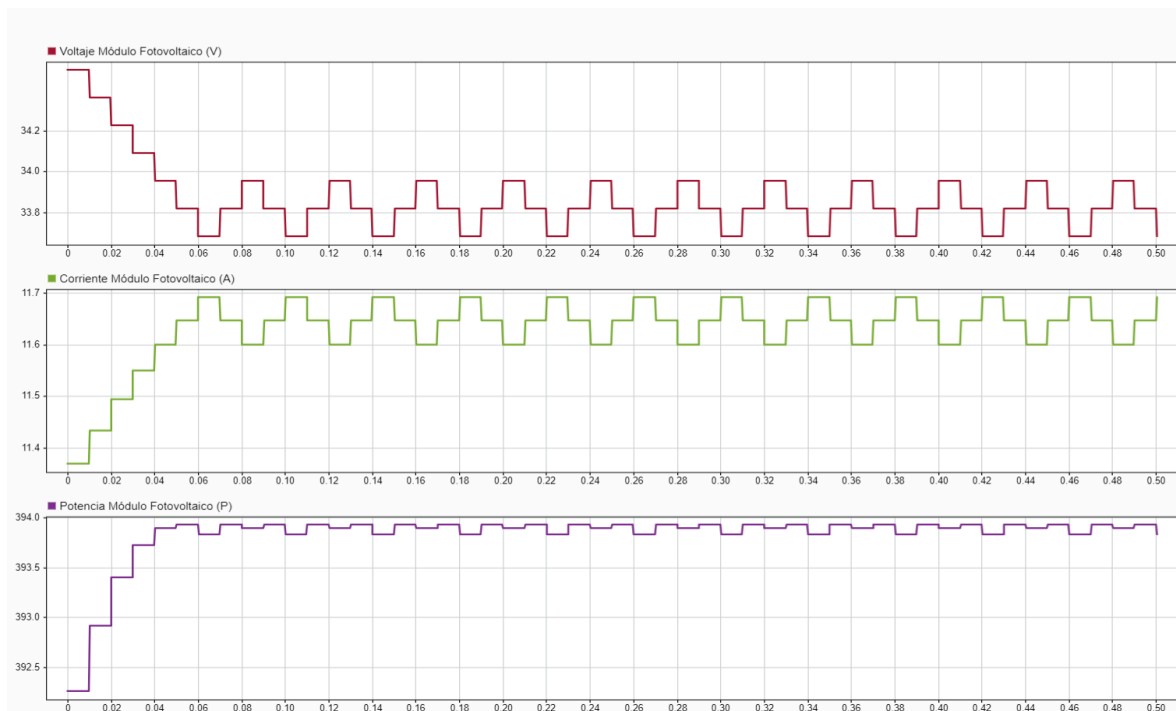


Figura 5-1: Voltatge, corrent i potència del mòdul fotovoltaic en condicions nominals

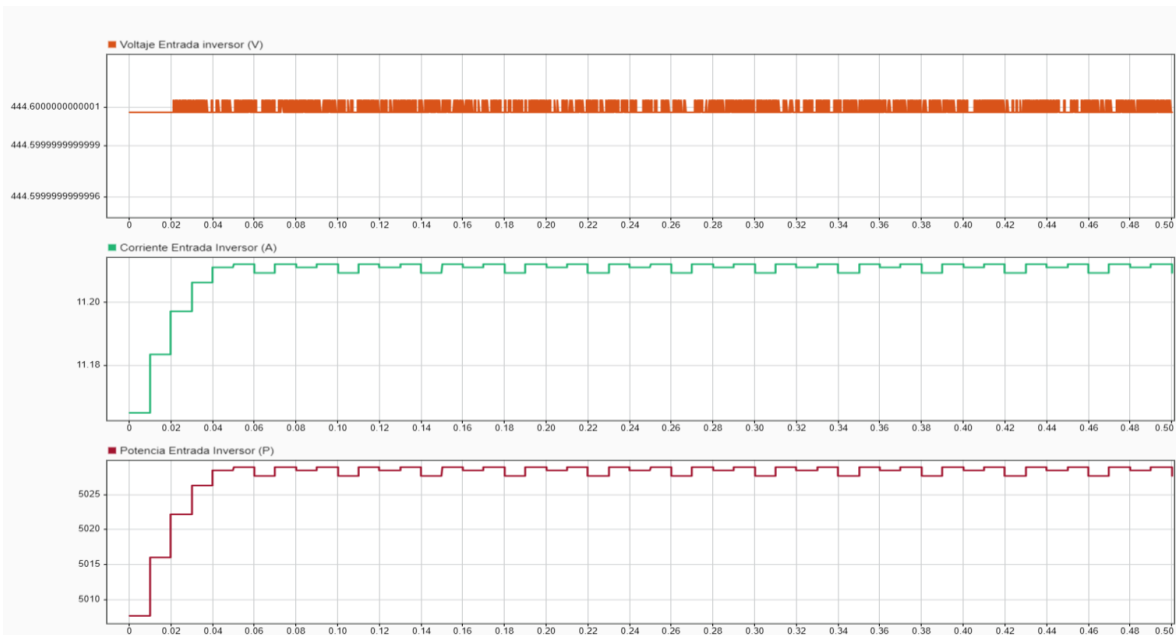


Figura 5-2: Voltatge, corrent i potència a l'entrada de l'inversor en condicions nominals

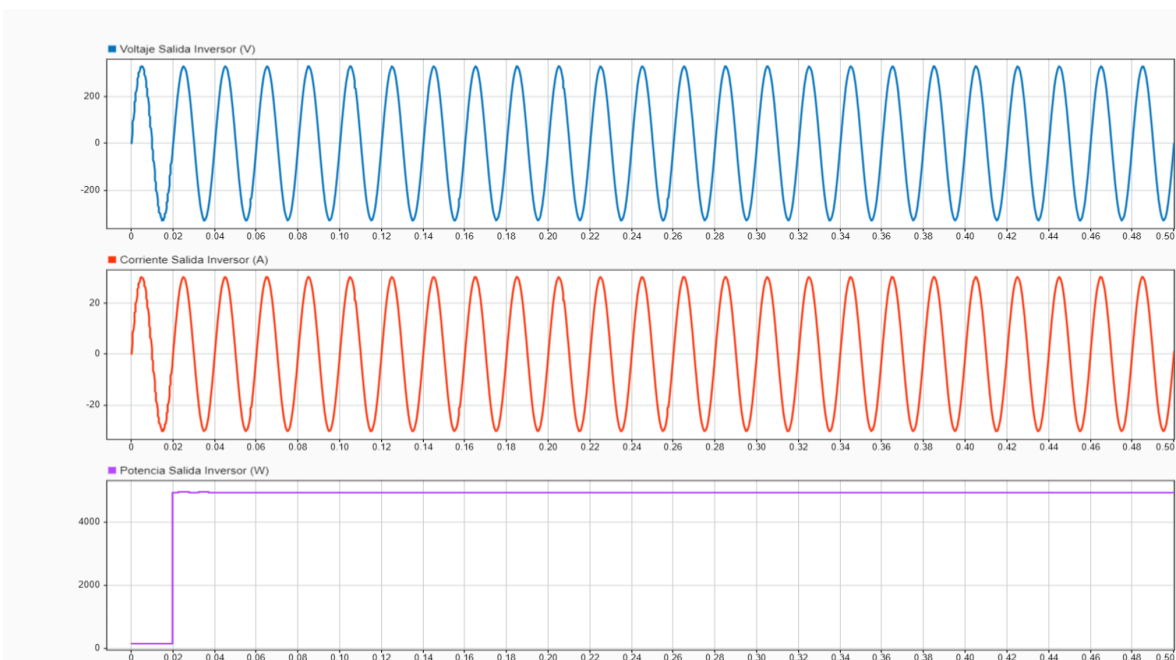


Figura 5-3: Voltatge, corrent i potència a la sortida de l'inversor en condicions nominals

Les formes d'ona resultants responen a les condicions nominals esperades. No obstant, cal destacar algunes variacions:

- Les mesures de corrent continu mostren un lleuger arrissament, provocat pel MPPT. El MPPT introdueix en cada cicle una pertorbació en el punt de funcionament per tal de buscar el punt de funcionament òptim.
- El MPPT no és capaç de trobar el punt de potència exacte: proporciona un corrent de 11,37 A i 34,5 V.
- La potència de sortida de l'inversor té un petit component reactiu. Això és degut a un lleuger error en el càlcul de la fase del corrent de sortida.

5.2 Variacions en la irradiància

Es simula el model per a les mateixes condicions nominals, MPPT activat, bateria desactivada, i diferents valors d'irradiància (333 W/m^2 , 666 W/m^2 , 1000 W/m^2).

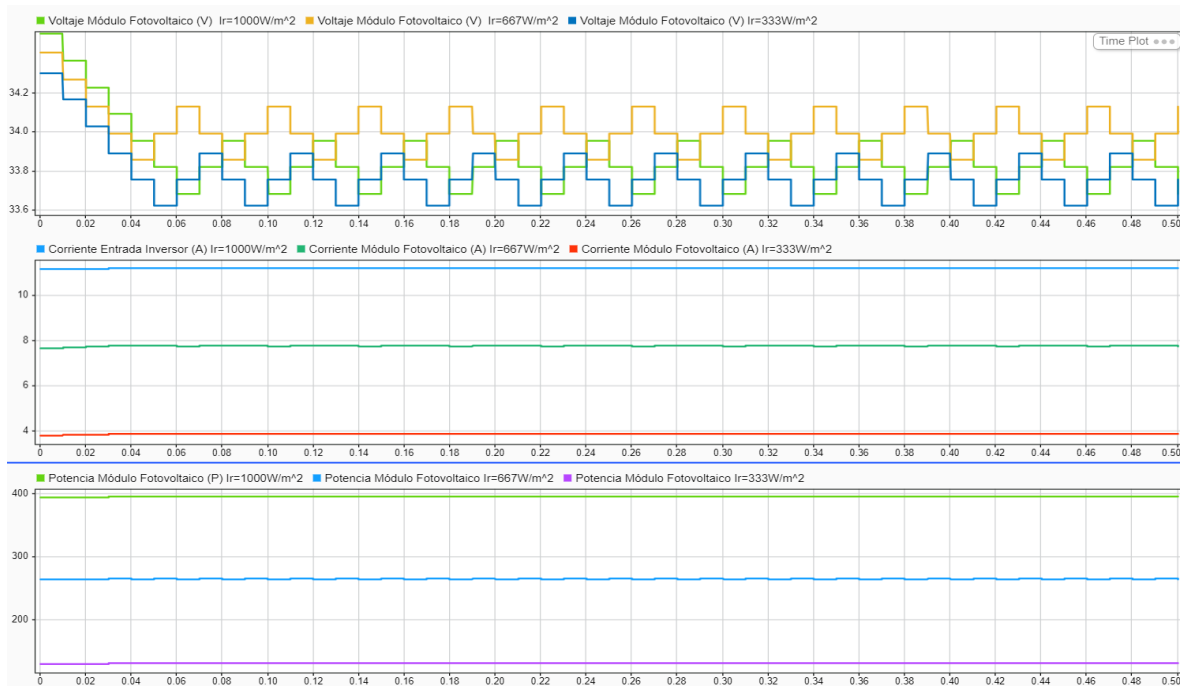


Figura 5-4: Voltatge, corrent i potència del mòdul fotovoltaic en funció de la irradiància

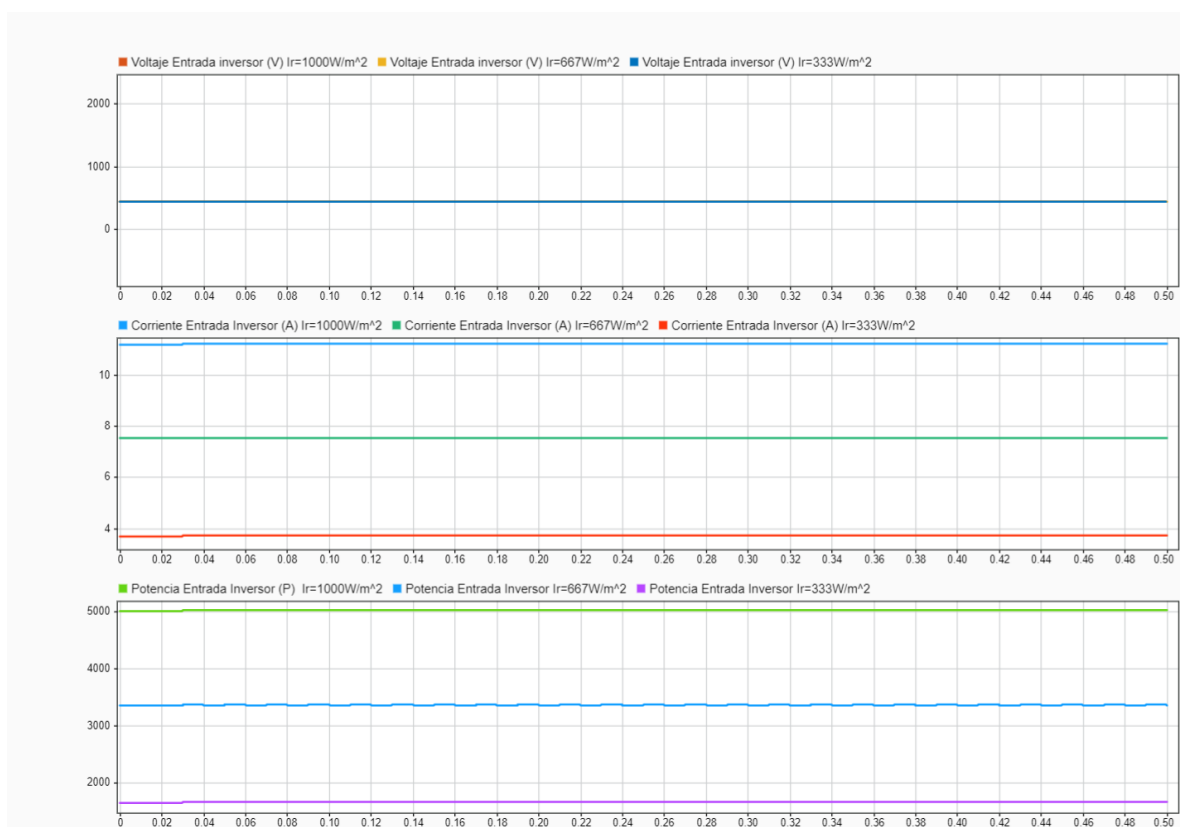


Figura 5-5: Voltatge, corrent i potència a l'entrada de l'inversor en funció de la irradiància

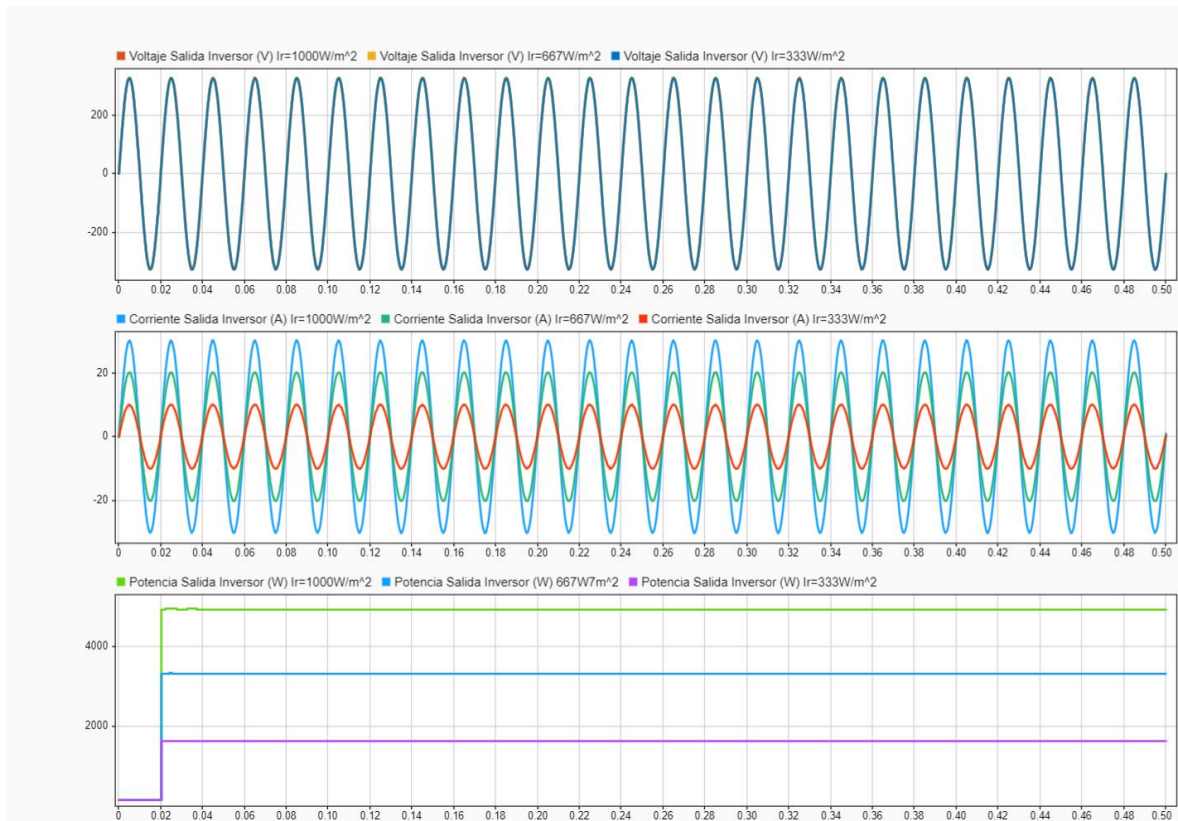


Figura 5-6 Voltatge, corrent i potència a la sortida de l'inversor en funció de la irradiància

El model respon correctament davant els canvis d'irradiància: la potència és proporcional a la irradiància, però el voltatge a la sortida de l'inversor està fixat a 230V. Per tant, la variació de irradiància implica una variació proporcional al corrent. No obstant, el voltatge del mòdul fotovoltaic disminueix lleugerament. Això és degut a que el voltatge de màxima potència canvia amb la irradiància, per tant el MPPT variarà el punt de funcionament per trobar aquest punt per cada valor d'irradiància.

5.3 Funcionament amb la bateria Activada

Es comprova el funcionament de la simulació per irradiàncies de 333 W/m², 666 W/m², 1000W/m², bateries i MPPT desactivat.

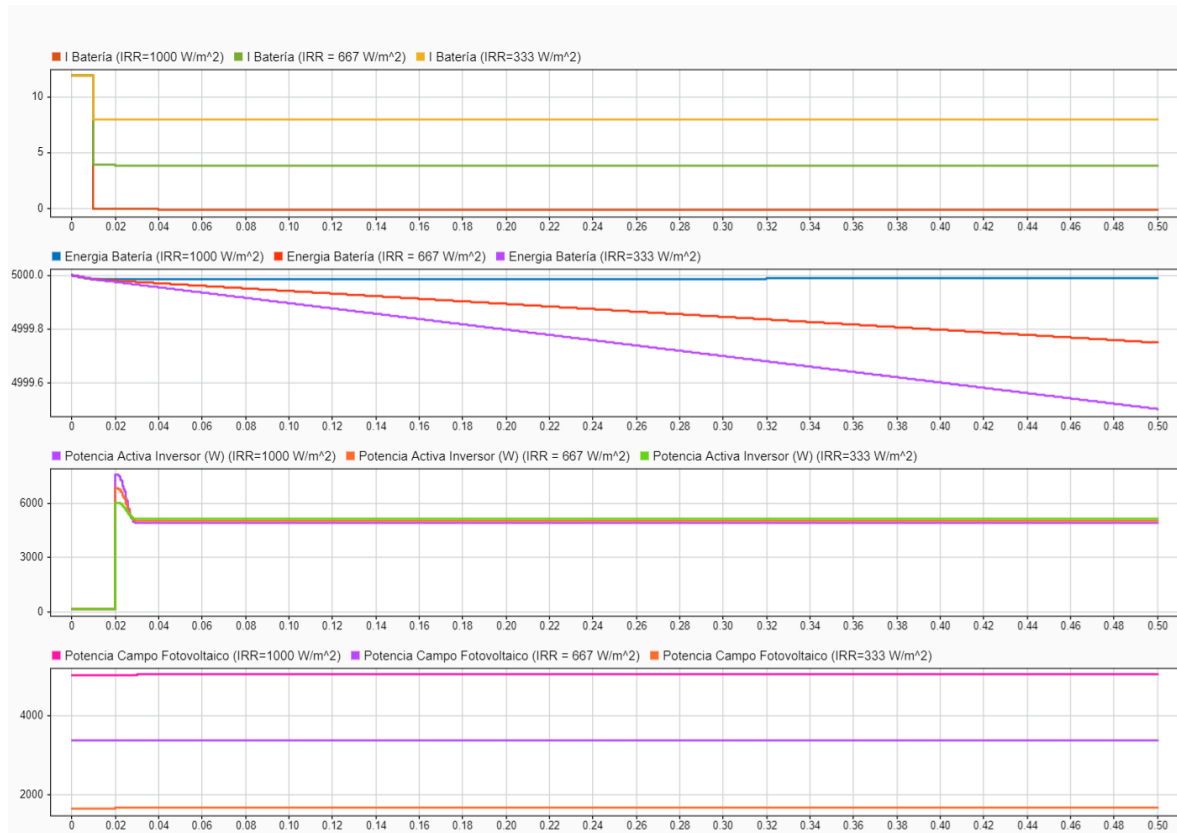


Figura 5-7: Gràfiques de la bateria i inversor en funció de la Irradiància

El comportament és el desitjat:

- Si el camp fotovoltaic proporciona una potència igual o major a la càrrega, la bateria no proporciona corrent. S'observa un subtil increment en l'energia emmagatzemada de la bateria.
- Per a potències inferiors a la càrrega, la bateria proporciona un corrent major i es descarrega a major velocitat. La potència a la sortida de l'inversor, sumant la potència de les bateries i del camp fotovoltaic, és pràcticament la mateixa.

5.4 Estudi de les pèrdues provocades pels conductors i proteccions elèctriques

Es comparen les simulacions del model amb cablejat elèctric i proteccions elèctriques amb el model sense ambdós elements. La finalitat d'aquesta prova és mesurar les pèrdues provocades per aquests elements de tensió, i verificar si són un component essencial en el modelatge.

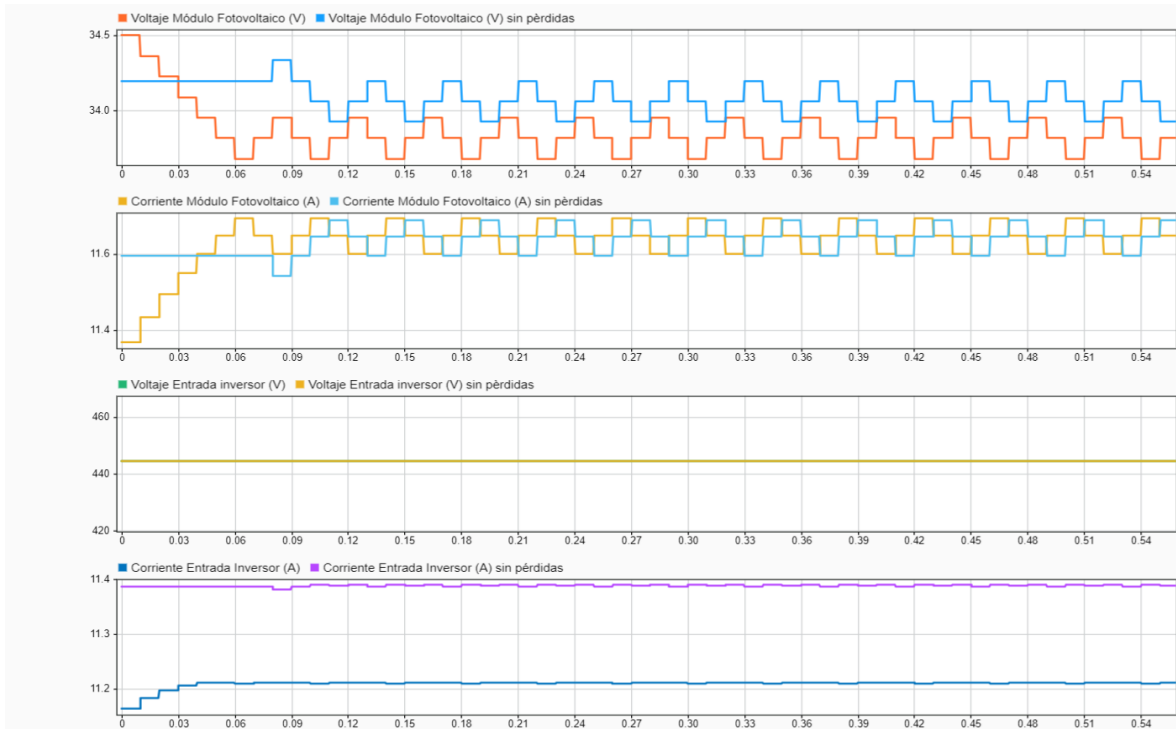


Figura 5-8: Corrents i voltatges DC amb i sense pèrdues per cablejat elèctric

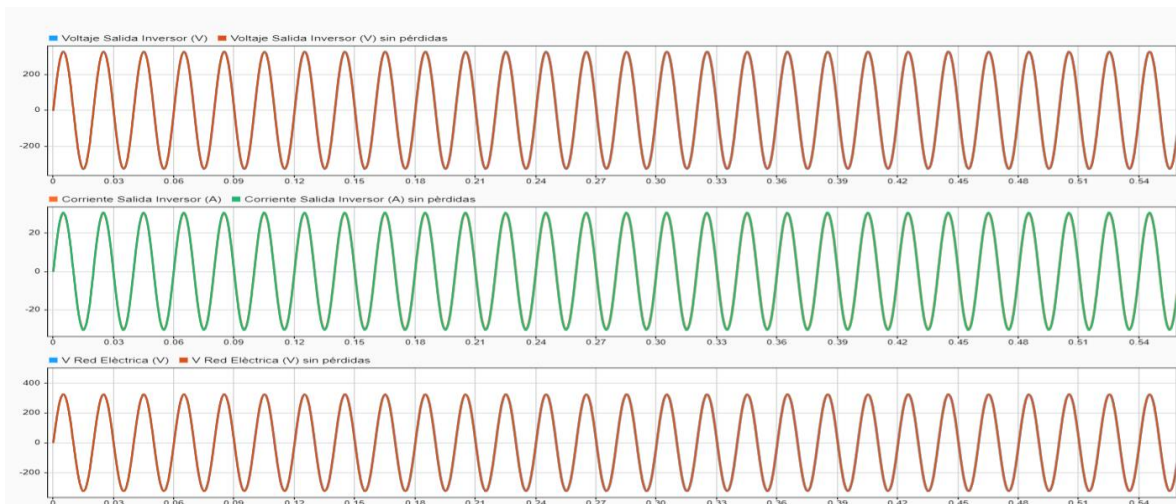


Figura 5-9: Corrents i voltatges AC amb i sense pèrdues pel cablejat elèctric

S'observa que les pèrdues òhmiques afecten lleugerament en el punt de funcionament de la instal·lació en CC, però són gairebé imperceptibles en les ones de sortida de l'inversor i la xarxa elèctrica.

6 Anàlisi de Faltes en la Instal·lació Fotovoltaica

6.1 Sobretensió en la xarxa elèctrica $V > 1,1U_n$

Per comprovar el comportament del sistema davant variacions de tensió es configura la font de tensió modelitzadora de la xarxa elèctrica amb una ona sinusoidal de 400V d'amplitud ($400\text{ V} > 1,1 \times 230\sqrt{2}$). S'observen les formes d'ona de la xarxa elèctrica i a la sortida de l'inversor. També es revisa el comportament de les proteccions elèctriques.

Per una sobretensió de voltatge superior a $1,1U_n$ s'espera el següent comportament:

- Les proteccions de sobrevoltatge de desconexió de la xarxa s'activaran i enviaran el seu senyal corresponent.
- A la sortida de l'inversor, si no es connectés la protecció per sobretensions, s'observaria un circuit obert: corrent nul i un voltatge de circuit obert molt elevat.
- En connectar la protecció per sobretensions els pics de voltatge queden reduïts al valor límit. L'ona del voltatge de sortida de l'inversor té una forma sinusoidal amb els pics retallats pel voltatge màxim definit. El corrent de sortida de l'inversor també es desvia a la protecció de sobretensions.
- Les desviacions en el corrent i voltatge a la sortida de l'inversor no provoquen un canvi en el punt de funcionament de l'entrada de l'inversor suficientment rellevant.
- En actuar les proteccions de connexió la instal·lació fotovoltaica no injecta corrent a la xarxa elèctrica.
- El corrent provinent de la xarxa augmentarà per suplir la desconexió de la instal·lació fotovoltaica.
- L'actuació de les proteccions elèctriques no serà immediata: s'observarà un règim transitori amb un voltatge i corrent major al desitjat. A l'ona de corrent de la xarxa elèctrica s'aprecia una forma no desitjada durant el temps d'actuació.

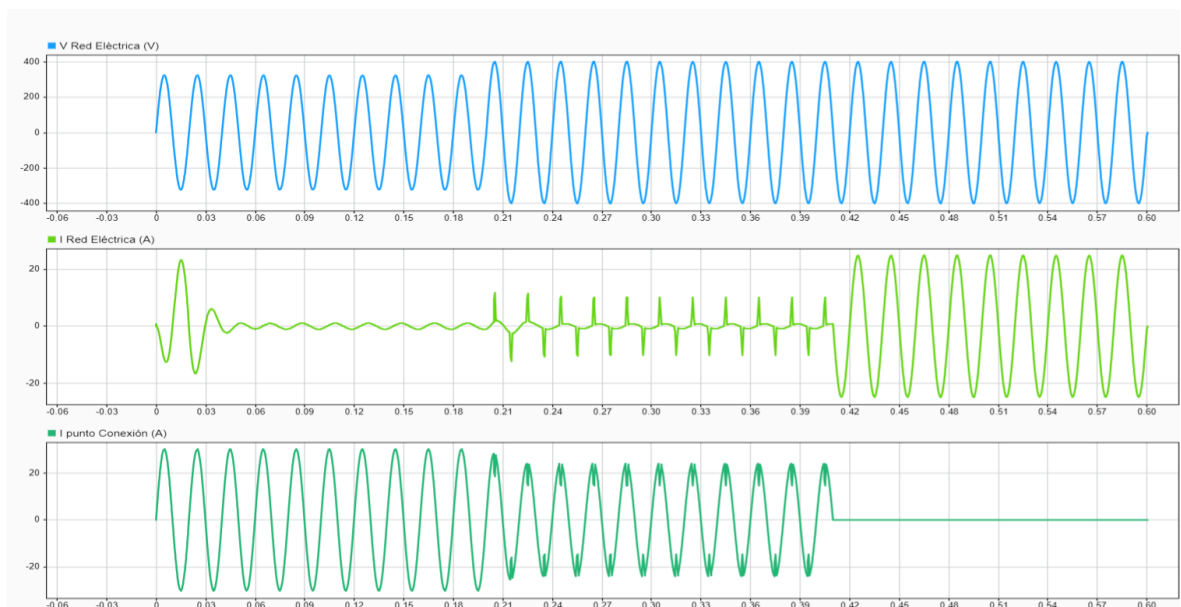


Figura 6-1: Voltatge i corrent a la xarxa elèctrica per $V > 1,1U_n$

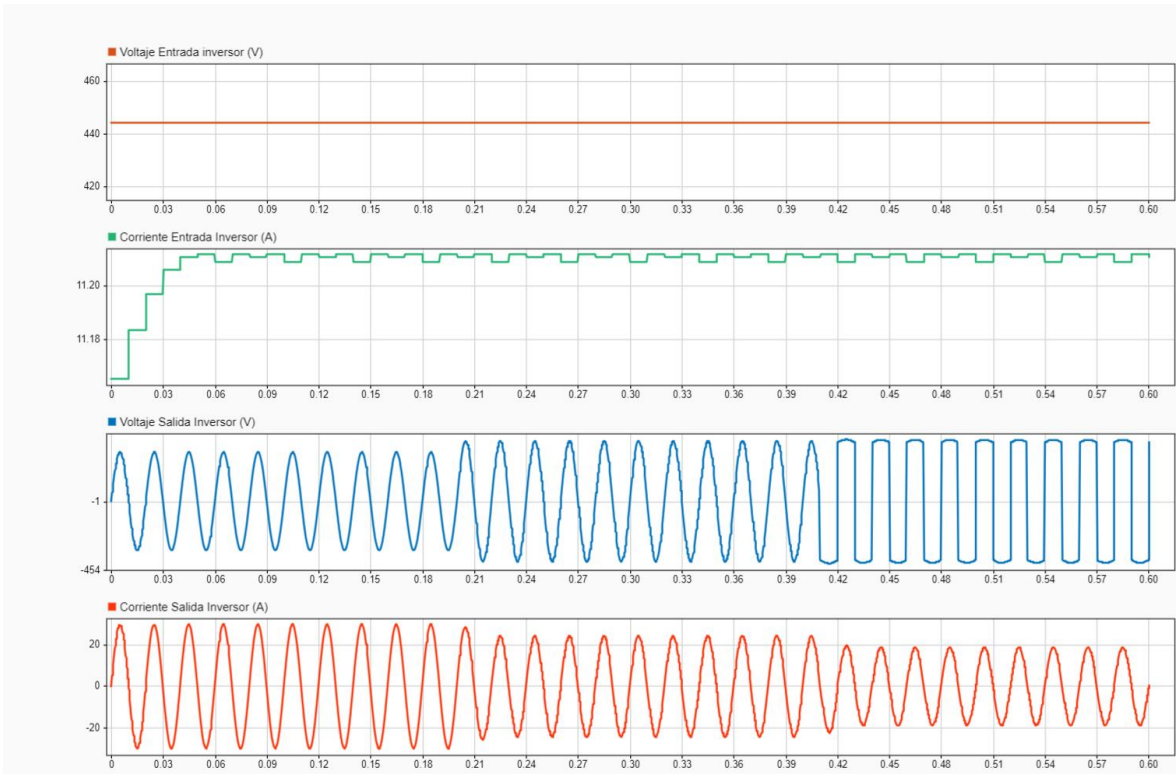


Figura 6-2: Voltatge i corrent a l'entrada i sortida de l'inversor per $V > 1,1U_n$

6.2 Sot de tensió total

Es simula el comportament de la instal·lació davant un sot de tensió. El sot es configura amb la font de tensió emuladora de la xarxa elèctrica proporcionant un voltatge de 0 V.

El comportament esperat compleix el següents punts:

- La desconexió de la xarxa elèctrica equival a un voltatge i corrent nul per part de la xarxa elèctrica.
- Idealment, per a l'inversor el sot de tensió total és equivalent a una desconexió controlada. Per tant, la resposta del sistema tindrà les mateixes característiques explicades a l'apartat anterior: un voltatge de circuit obert però limitat per la protecció de sobretensions, injecció de corrent a la xarxa nul·la i corrent de sortida de l'inversor, consumit per la protecció de sobretensions. Els avisos de sobretensió queden activats.
- La desconexió immediata provoca un pic de corrent molt elevat a la xarxa, que afectarà al corrent de sortida de l'inversor. Aquest pic de corrent posarà en marxa els interruptors automàtics.

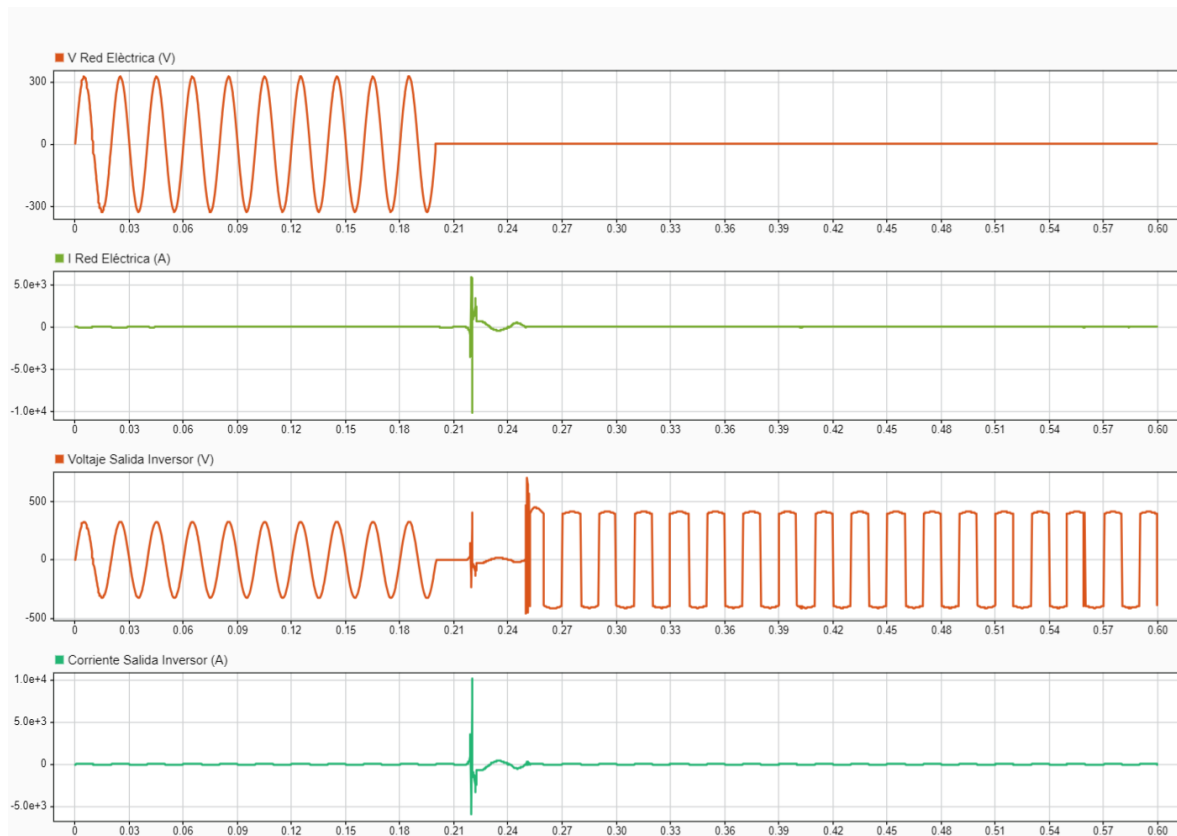


Figura 6-3: Voltatge i corrent de la xarxa elèctrica i de sortida de l'inversor per un sot total de tensió

6.3 Sot de Tensió Parcial

Es simula el comportament de la instal·lació fotovoltaica per una disminució notable del voltatge de la xarxa elèctrica. El voltatge de la xarxa elèctrica es configura amb una ona sinusoidal de 220 V d'amplitud. Aquest valor serà suficientment petit per provocar la desconexió de la xarxa, però no equivalent a un circuit obert. Es comenten els punts més rellevants de la resposta del sistema:

- Cal destacar que, per la modelització de la xarxa elèctrica escollida, es comet un error: en la simulació del corrent de la xarxa elèctrica s'observa un increment en el corrent de la xarxa per compensar la caiguda de tensió. Aquest fet idealment no ocorreria.
- En la detecció del sot de voltatge s'activa la protecció de la connexió per $V < 0,85U_n$. De nou, la desconexió de la xarxa elèctrica implicarà la no-injecció de corrent elèctric a la xarxa i activació de la protecció de sobretensions.
- Entre el canvi de voltatge de la xarxa i l'actuació de les proteccions s'obtenen valors de tensió menors, que es supleixen amb un increment temporal del corrent.

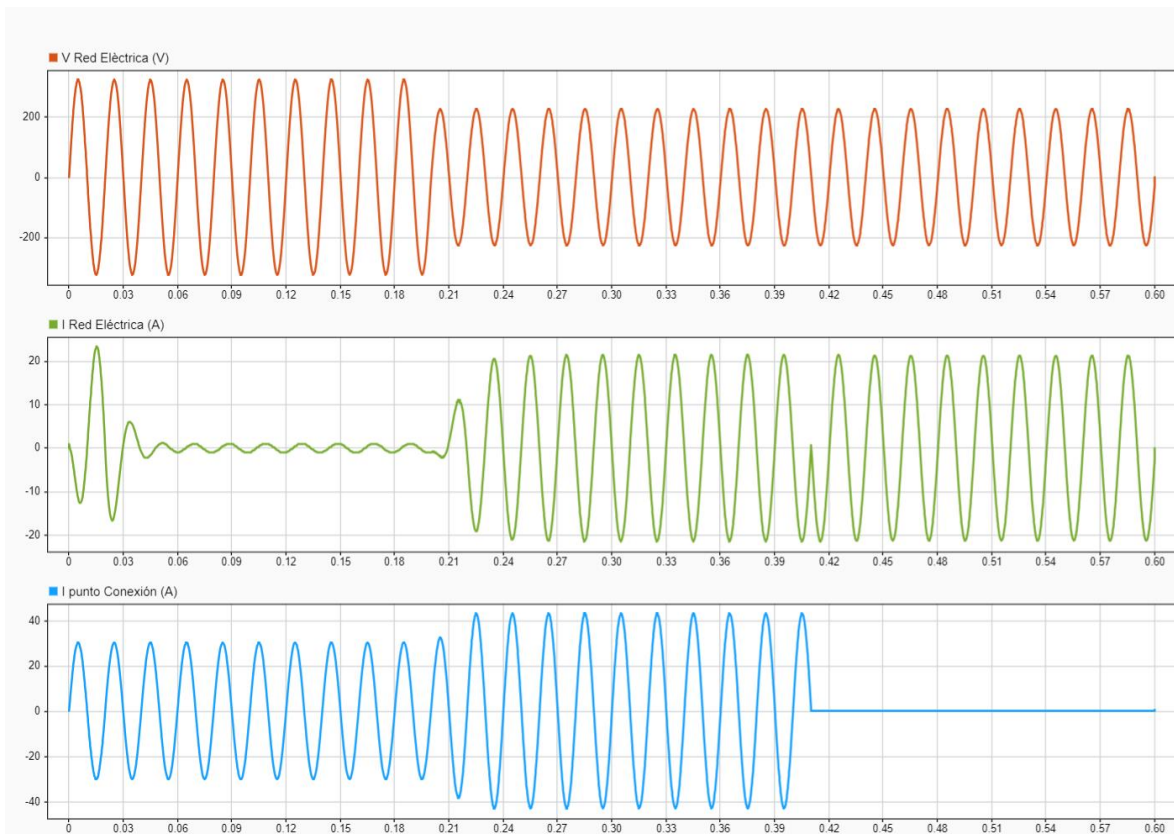


Figura 6-4 Voltatge i corrent a la xarxa elèctrica per $V < 0,85U_n$

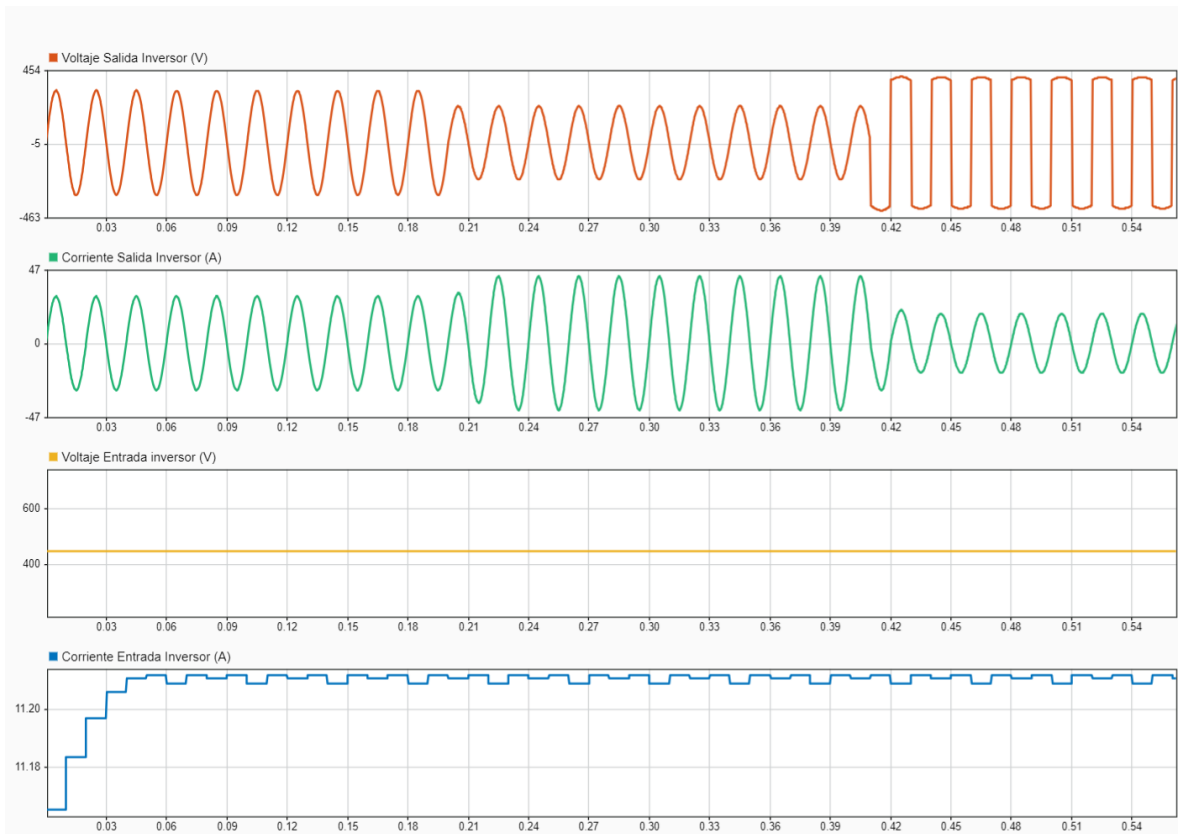


Figura 6-5: Voltatge i corrent a l'entrada i sortida de l'inversor per $V < 0,85U_n$

6.4 Circuit Obert a l'entrada de l'inversor

Es simula un circuit obert entre la sortida del MPPT i l'entrada dels fusibles de protecció de l'inversor.

El comportament esperat pels panells és treballar en circuit obert (41,2 V) i sense corrent.

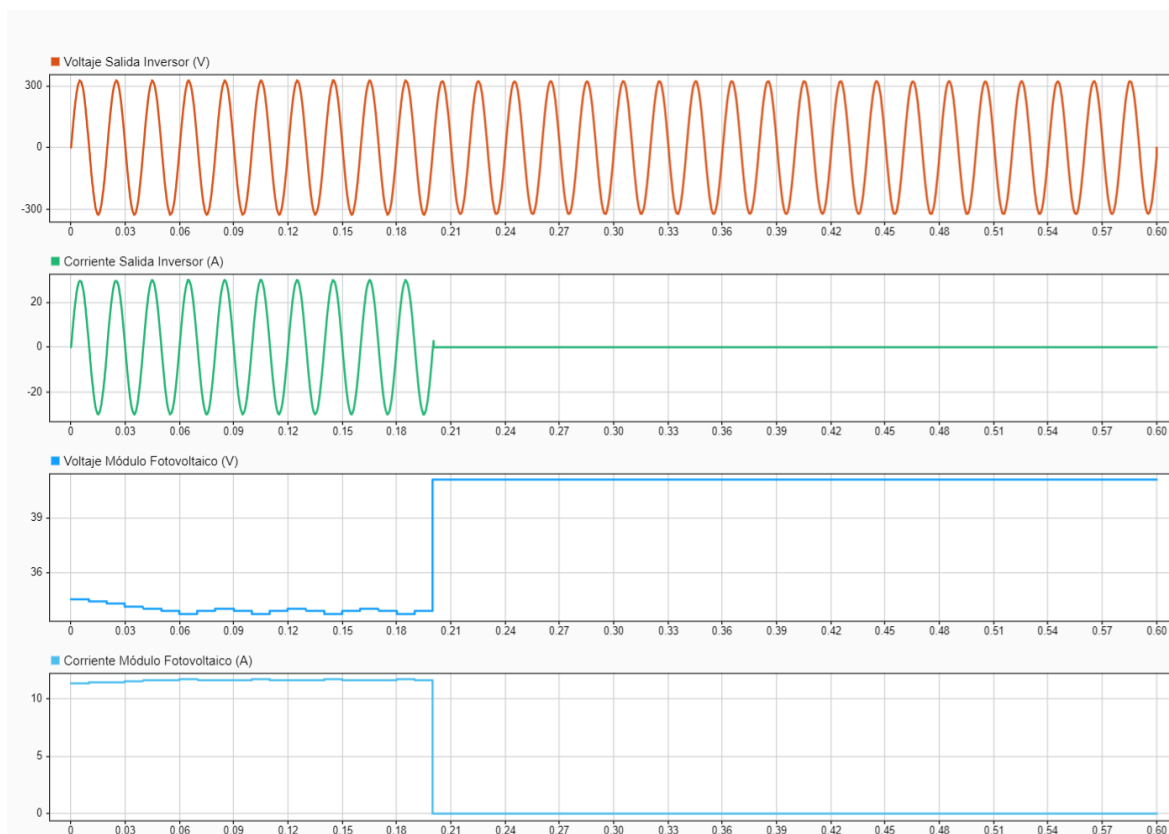


Figura 6-6: Voltatge i corrent al mòdul fotovoltaic i sortida de l'inversor

6.5 Variacions de freqüència en la xarxa elèctrica

Es modifica la freqüència de l'ona de tensió provinent de la xarxa elèctrica, per 48,9 Hz i 51,1 Hz. Per als dos casos es compleix l'actuació de les proteccions de connexió a la xarxa. Els efectes són els mateixos: circuit obert a la sortida de l'inversor, limitat per la protecció de sobretensions, i increment en el corrent provinent de la xarxa.

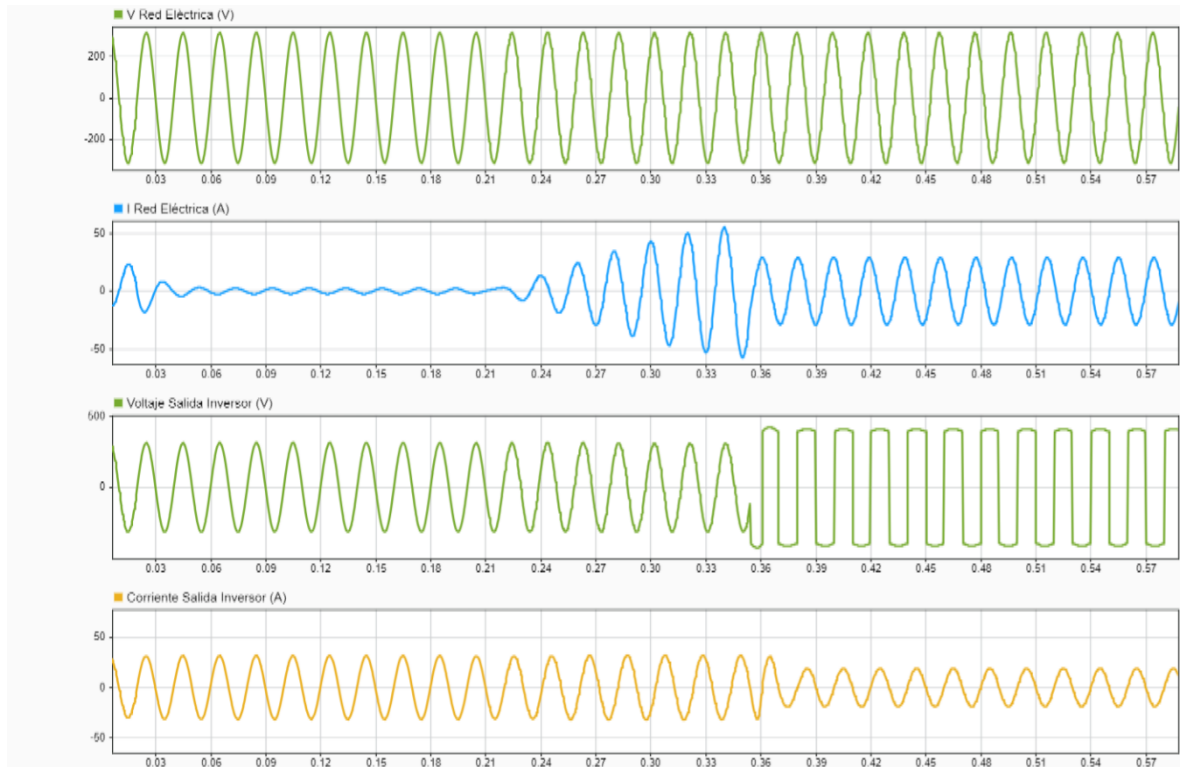


Figura 6-7: Voltatge i corrent a la sortida de l'inversor i a la xarxa elèctrica per $f=51$ Hz

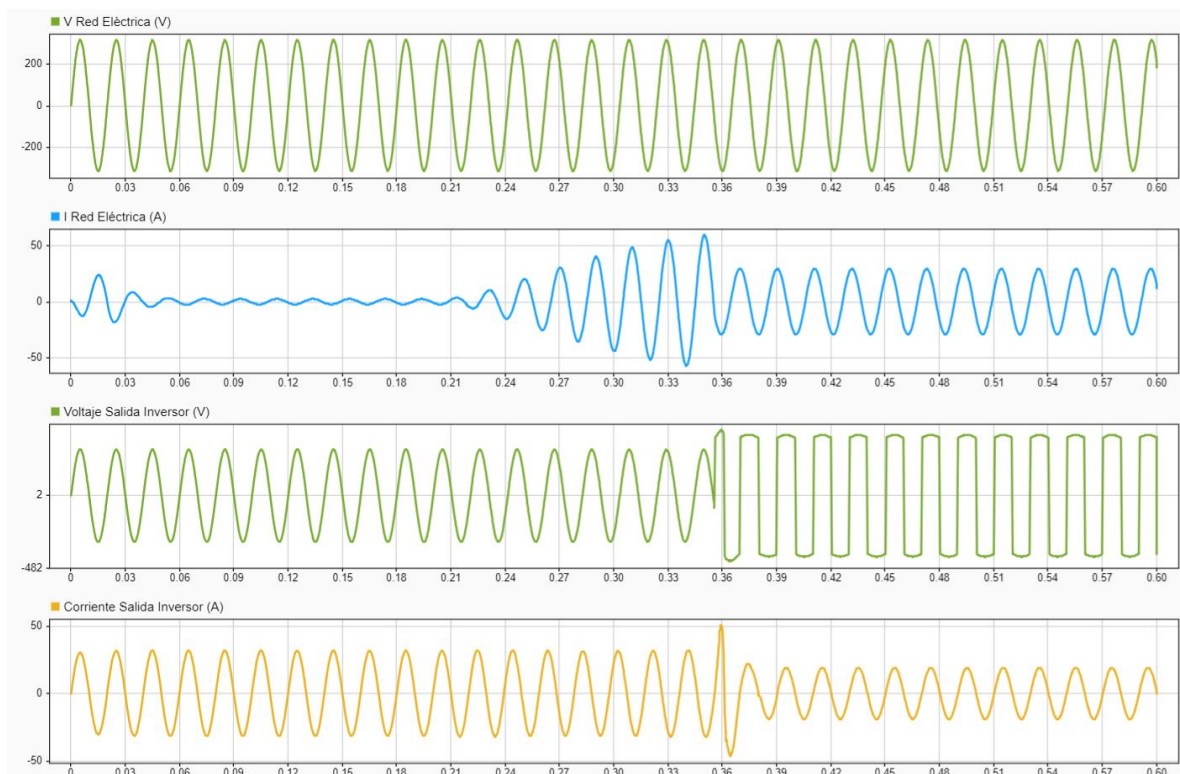


Figura 6-8: Voltatge i corrent a la sortida de l'inversor i xarxa elèctrica per $f=49$ Hz

6.6 Curtcircuit a l'entrada de l'inversor

Es curtcircuita el model a l'entrada de les proteccions de l'inversor. La resposta al sistema és l'esperada pel comportament dels panells fotovoltaics: els panells fotovoltaics generen el seu corrent màxim de curtcircuit però no voltatge. El corrent d'entrada a l'inversor presenta un pic de valor avants de suprimir-se el corrent. Aquest pic és detectat pels fusibles d'entrada de l'inversor, que anul·len el corrent d'entrada. Com la potència generada a la instal·lació és nul·la, no s'injecta corrent a la xarxa elèctrica.

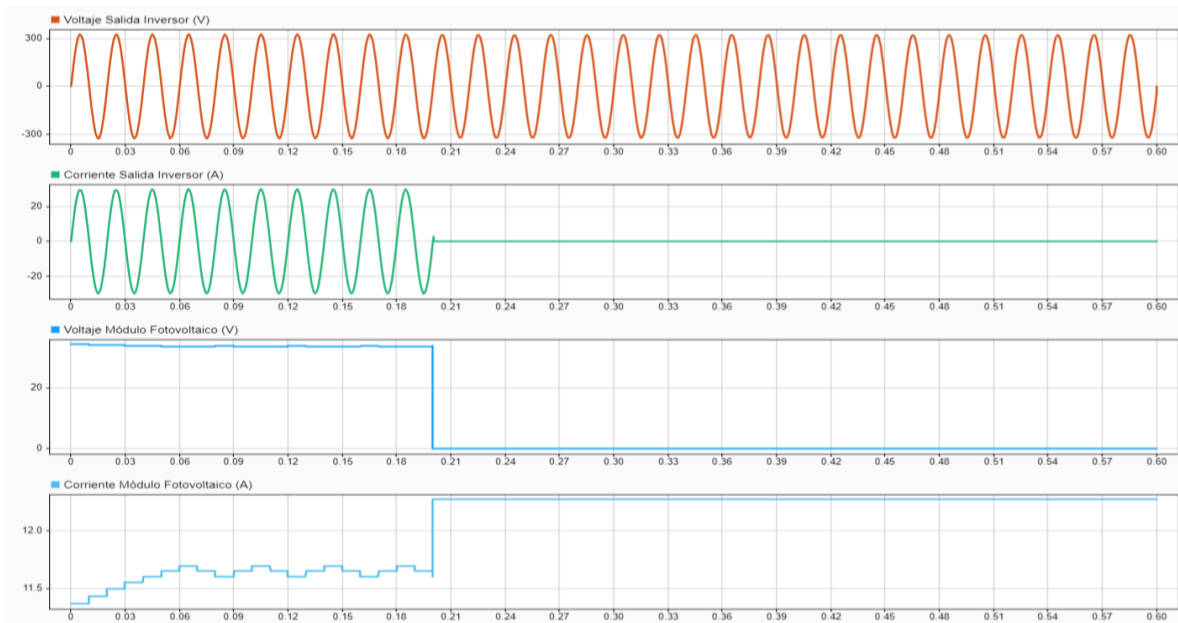


Figura 6-9: Voltatge i corrent al panell fotovoltaic i a la sortida de l'inversor per un curtcircuit a l'entrada de l'inversor

Els fusibles de l'entrada de l'inversor protegeixen l'inversor i la connexió a la xarxa elèctrica. En cas de que aquests no s'incloguin, en ocórrer el curtcircuit l'inversor queda en circuit obert a l'entrada. Sense mesures vàlides de corrent i voltatge d'entrada el model equivalent de l'inversor és incapaç de calcular el punt de funcionament a la sortida.



Figura 6-10: Corrent i voltatge a l'entrada i sortida de l'inversor sense fusibles de protecció

7 Conclusions

Procés de modelatge del sistema

Per al modelatge de certs components, els models equivalents més simplificats poden presentar valors impossibles en la realitat. En el model equivalent de una cèl·lula fotovoltaica, per tal de replicar el comportament descrit al Datasheet del panell, es va haver de considerar un factor d'idealitat del díode de $n=0,5$. Aquest valor és impossible, ja que el factor d'idealitat només contempla valors entre $1 < n < 1,5$.

Els models no commutatats de convertidors DC-DC i DC-AC simplifiquen notablement la simulació per a condicions nominals. No obstant, en l'anàlisi de falles, el seu comportament pot no ser fidel a la realitat.

A més, la simulació del sistema no permet comprovar adequadament el comportament de la instal·lació davant de sobretensions no provinents de la xarxa elèctrica, com podria ser la caiguda d'un llamp.

Per tant, és necessari acotar els objectius de la simulació (què es vol estudiar) a l'hora de escollir els models equivalents del sistema. És necessari conèixer quins dispositius i paràmetres influiran més en el comportament a estudiar, per tal de realitzar models equivalents més realistes. Els elements amb menys influència no requeriran la mateixa complexitat.

No obstant, la simulació final es comporta de forma fidel sota condicions nominals, i davant de variacions en la irradiància i activació i desactivació de bateries.

Resultats de les simulacions

Un dispositiu MPPT és essencial per optimitzar el funcionament d'una instal·lació fotovoltaica. Tot i que les seves pèrdues suposin una lleugera baixada en el rendiment total, un algoritme MPPT més complexe serà capaç d'optimitzar millor el funcionament dels panells sota més condicions de funcionament. En aquest cas el MPPT tipus P&O implica cert arrissament en les ones de CA, però és necessari per tal que els mòduls fotovoltaics proporcionin la màxima potència.

El model d'inversor és crucial per no provocar falles en el funcionament, tant de la instal·lació en CC com CA. Per al model no commutat de l'inversor, el seu disseny no era suficientment sofisticat per assegurar el funcionament de la instal·lació en condicions nominals. Un inversor ideal aïllarà els circuits DC i AC, no injectarà harmònics ni soroll a la xarxa, i el component de potència reactiva a la sortida serà mínim. El model no commutat de l'inversor, tot i no ser un muntatge real, permet simular aquestes condicions.

El cablejat i proteccions elèctriques no suposen pèrdues energètiques rellevants en el sistema en condicions nominals. Per tant, a l'hora de simplificar la simulació sota condicions nominals, aquestes podrien excloure's.

No obstant, les proteccions elèctriques son fonamentals a l'hora de minimitzar els efectes en cas de sobretensions, subtensions, circuits oberts i curtcircuits i desconexió de la xarxa. El comportament de les proteccions elèctriques ha estat l'esperat en totes les proves de falles.

Cal comentar que podrien simular-se més fidelment si es tingués en compte les corbes de temps de dispar en funció dels valors nominals.

Proposta de treball futur:

- Realitzar un model detallat d'una bateria/acumulador d'energia per a una instal·lació fotovoltaica domèstica. Els criteris del model poden seguir el comportament físic durant la càrrega i descàrrega de la bateria i el seu rendiment i evolució d'aquest al llarg de la seva vida útil. També es podria estudiar quins són els algorismes de funcionament més òptims per minimitzar els costos econòmics en electricitat o per maximitzar la independència de la xarxa elèctrica.
- Realitzar un model detallat d'un inversor DC-AC monofàsic: escollir la tipologia adequada per la seva finalitat, càlcul dels llaços de control pels voltatges i corrents d'entrada i sortida, llaços de seguiment de fase (PLL) i filtres d'acondicionament del senyal de sortida.
- Estudi del comportament d'una instal·lació fotovoltaica on els panells es troben en condicions ambientals i de funcionament desiguals.

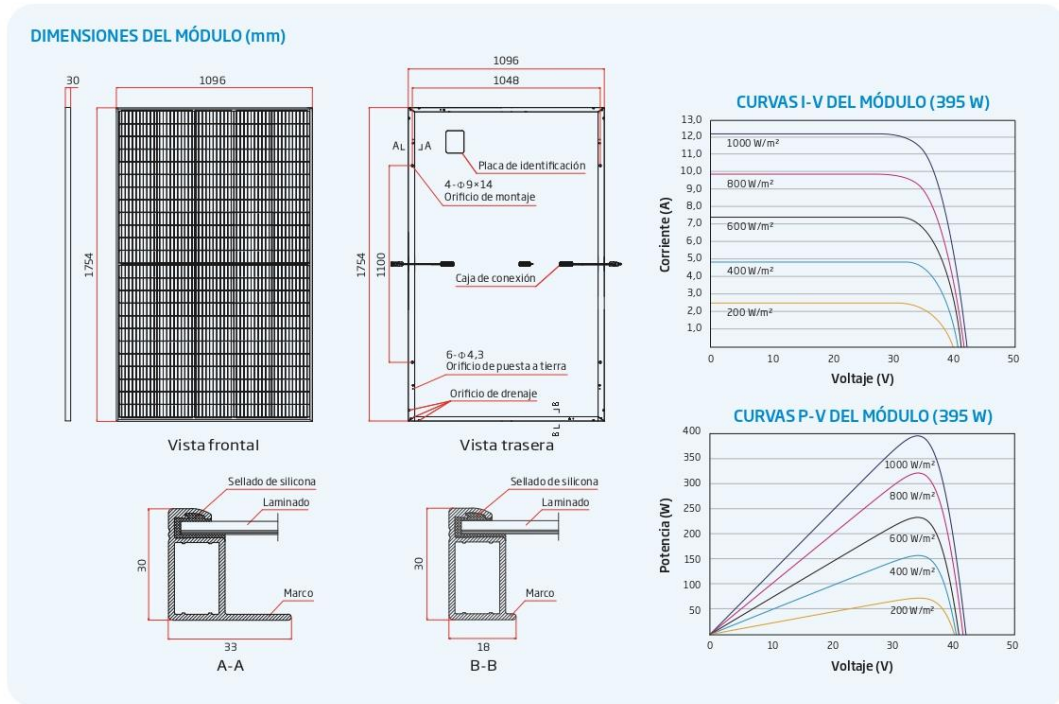
Aquestes propostes permetrien un anàlisi més precís del comportament de certs components de la instal·lació. Respecte a l'estudi del camp fotovoltaic per a diferents condicions de funcionament, aquest treball permetria l'anàlisi de casos més realistes, ja que és una situació molt usual en la majoria d'instal·lacions. També donaria peu a aprofundir en el disseny d'un optimitzador que tingui en compte aquestes desigualtats.

Bibliografia i Webgrafia

1. Inglés Campor, M. (2023). Instal·lació fotovoltaica per autoconsum de 5,2 kWp. [Treball de fi de grau]. URV.
2. <https://www.censolar.org/legislacion-fotovoltaica-2021/> Legislación Solar Fotovoltaica en España (2021) (Consultat el 5/6/2024).
3. Araújo, N. M. F. T. S., Sousa, F. J. P., & Costa, F. B. (2020). Equivalent models for photovoltaic cell—a review. *Revista de Engenharia Térmica*, 19(2), 77-98.
4. Apunts Energies Renovables curs 2023-2024.
5. REBT ITC-BT-40 Sept 2013. Revisió 1.
6. Kathe, M. L., Makokha, A. B., Zachary, S. O., & Adaramola, M. S. (2023). A comprehensive review of maximum power point tracking (mppt) techniques used in solar pv systems. *Energies*, 16(5), 2206.
7. Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodriguez, P. (2011). *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. John Wiley & Sons.
8. Erickson, R.W. (2007). DC–DC Power Converters. In *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, J.G. Webster (Ed.).
9. Bortolini, M., Gamberi, M., & Graziani, A. (2014). Technical and economic design of photovoltaic and battery energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 86, 81-92.
10. <https://matlabacademy.mathworks.com/es/details/power-systems-simulation-onramp/orps> - Cursos Matlab-Simulink Onramp (Consultat el 24/4/2024).
11. Documentació Mathworks Matlab-Simulink.
12. Daowd, M., Omar, N., Verbrugge, B., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2010, November). Battery models parameter estimation based on MATLAB/Simulink®. In *Proceedings of the 25th electric vehicle symposium (EVS-25), Shenzhen, China* (Vol. 2, pp. 1-6).

8 Anexos

8.1 Fitxa tècnica Mòduls Fotovoltaics



DATOS ELÉCTRICOS (STC)	TSM-390 DE09.08	TSM-395 DE09.08	TSM-400 DE09.08	TSM-405 DE09.08
Potencia Máxima -P _{MAX} (Wp)*	390	395	400	405
Tolerancia de Potencia Nominal-P _{MAX} (W)	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5
Tensión en Máxima Potencia-V _{MPP} (V)	33,8	34,0	34,2	34,4
Corriente en Máxima Potencia-I _{MPP} (A)	11,54	11,62	11,70	11,77
Tensión de Circuito Abierto-V _{OC} (V)	40,8	41,0	41,2	41,4
Corriente de Cortocircuito-I _{SC} (A)	12,14	12,21	12,28	12,34
Eficiencia η _m (%)	20,3	20,5	20,8	21,1

STC: irradiancia de 1000W/m²; Temperatura de la célula de 25°C, AM1,5 *Tolerancia de medida de ±3%

DATOS MECÁNICOS	
Células Solares	Monocristalinas
Número de células	120 células
Dimensiones del módulo	1754 × 1096 × 30 mm
Peso	21,0 kg
Vidrio Frontal	3,2 mm, alta transmisión, vidrio termoendurecido con recubrimiento AR
Material Encapsulante	EVA/POE
Lámina posterior	Blanca
Marco	Aleación de aluminio anodizado de 30 mm
J-Box	IP 68
Cables	Cable fotovoltaico: 4,0 mm² Instalación en horizontal: 1.100/1.100 mm Instalación en vertical: 280/280 mm*
Conector	TS4/MC4 EVO2*

*Bajo pedido

DATOS ELÉCTRICOS (NOCT)	TSM-390 DE09.08	TSM-395 DE09.08	TSM-400 DE09.08	TSM-405 DE09.08
Potencia Máxima -P _{MAX} (Wp)	295	298	302	306
Tensión en Máxima Potencia-V _{MPP} (V)	31,8	32,0	32,2	32,5
Corriente en Máxima Potencia-I _{MPP} (A)	9,26	9,32	9,38	9,41
Tensión de Circuito Abierto-V _{OC} (V)	38,4	38,6	38,8	38,9
Corriente de Cortocircuito-I _{SC} (A)	9,78	9,84	9,90	9,95

NOCT: irradiancia de 800W/m²; Temperatura ambiente de 20°C; Velocidad del viento de 1 m/s.

TASAS DE TEMPERATURA

NOCT (Temperatura de Operación Nominal de la Célula)	43 °C (±2 K)
Coefficiente de Temperatura de P _{MAX}	-0,34 %/K
Coefficiente de Temperatura de V _{OC}	-0,25 %/K
Coefficiente de Temperatura de I _{SC}	0,04 %/K

GARANTÍA

15 años de garantía del Producto
25 años de garantía de Potencia
2% de degradación el primer año
0,55% de degradación anual de potencia

(Consulte la garantía de producto para más información)

LÍMITES OPERACIONALES

Temperatura de Operación	-40 a +85 °C
Tensión Máxima del Sistema	1500 V DC (IEC)
Capacidad Máxima del Fusible	20 A

CONFIGURACIÓN DE EMBALAJE

Módulos por caja	36 unidades
Módulos por contenedor 40'	936 unidades



PRECAUCIÓN: LEA LAS INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD E INSTALACIÓN ANTES DE UTILIZAR EL PRODUCTO.
© 2021 Trina Solar Limiteda. Todos los derechos reservados. Las especificaciones de esta ficha técnica están sujetas a cambios sin previo aviso

Versión número: TSM_ESP_2021_A

www.trinasolar.com

8.2 Fitxa tècnica Optimitzador

/ Optimizador de potencia

P370 / P401 / P404 / P485 / P500 / P505 / P601

MODELO DE OPTIMIZADOR (compatibilidad típica de módulos)	P370 (módulos de 60 y 72 células)	P401 (módulos de 60 y 72 células)	P404 (para 60 y 72 células, strings cortos)	P485 (para módulos de alta tensión)	P500 (para módulos de 96 células)	P505 (para módulos de alta corriente)	P601 (para 1 módulo FV de alta potencia)	UNIDAD ES DE MEDIDA	
ENTRADA									
Potencia nominal CC de entrada ⁽¹⁾	370	420	405	485	500	505	600	W	
"Tensión máxima absoluta de entrada (Voc a la temperatura más baja)"	60		80	125	80	83	65	Vcc	
Rango de operación MPPT	8 - 60		12,5 - 80	12,5-105	8 - 80	12,5 - 83	12,5 - 65	Vcc	
Corriente máxima de entrada (ISC)	11	12,5	11,75	11	10,1	14		Acc	
Rendimiento máximo	99,5							%	
Rendimiento ponderado	98,8							%	
Categoría de sobretensión	II								
SALIDA DURANTE EL FUNCIONAMIENTO (OPTIMIZADOR DE POTENCIA CONECTADO A INVERSOR SOLAREDEGE EN FUNCIONAMIENTO)									
Corriente máxima de salida	15							Acc	
Tensión máxima de salida	60		80	60	80			Vcc	
SALIDA EN ESPERA (OPTIMIZADOR DE POTENCIA DESCONECTADO DEL INVERSOR SOLAREDEGE O INVERSOR SOLAREDEGE DESACTIVADO)									
Tensión de salida en seguridad por optimizador de potencia	1 ± 0,1							Vcc	
CUMPLIMIENTO DE NORMATIVAS									
CEM	FCC sección 15 clase B, IEC61000-6-2, IEC61000-6-3								
Seguridad	IEC62109-1 (seguridad de clase II), UL1741								
RoHS	Sí								
Seguridad contra incendios	VDE-AR-E 2100-712:2018-12								
ESPECIFICACIONES DE INSTALACIÓN									
Tensión máxima permitida del sistema	1000							Vcc	
Dimensiones (Ancho x Largo x Altura)	129 x 153 x 27,5 / 5,1 x 6 x 1,1	129 x 153 x 29,5 / 5,1 x 6 x 1,16	129 x 153 x 42,5 / 5,1 x 6 x 1,7	129 x 159 x 49,5 / 5,1 x 6,2 x 1,9	129 x 153 x 33,5 / 5,1 x 6 x 1,3	129 x 162 x 59 / 5,1 x 6,4 x 2,3	129 x 153 x 52 / 5,1 x 6 x 2	mm/in	
Peso (incluyendo cables)	655 / 1,5		775 / 1,7		845 / 1,9			1064 / 2,3	g / lb
Conector de entrada	MC4(2)			MC4 único o doble ⁽²⁾⁽⁸⁾		MC4(2)			
Longitud de cable de entrada	0,16 / 0,52, 0,9 / 2,95		0,16/0,52					m	
Conector de salida	MC4								
Longitud de cable de salida	1,2						1,4 / 4,5		m
Rango de temperatura de funcionamiento ⁽⁴⁾	De -40 a +85 / de -40 a +185								°C
Clasificación de protección	IP68								
Humedad relativa	0-100								%

(1) La potencia nominal del módulo en condiciones de prueba estándar no puede superar la «potencia nominal CC de entrada del optimizador». Se admiten módulos con una tolerancia de potencia de hasta +5 %.

(2) Para otros tipos de conectores contactar con SolarEdge.

(3) Para versión dual para la conexión en paralelo de dos módulos solicitar el P485. En caso de que haya un número impar de módulos FV en un string, se admite la instalación de un solo módulo FV en un optimizador de potencia de versión dual P485. Si se conecta un solo módulo, sellar los conectores de entrada sin usar con el par de tapones suministrados.

(4) Para temperatura ambiente superior a +70 °C (+158 °F), se aplica una reducción de potencia. Consultar la Nota Técnica de reducción de la temperatura de optimizadores de potencia para conocer más detalles.

Diseño de sistema FV con inversor SolarEdge ⁽⁵⁾	Inversor Wave SolarEdge Home – Monofásico	Inversor Wave SolarEdge Home – Trifásico para strings cortos	Trifásico para red 230/400V	Trifásico para red 277/480 V	
Longitud mínima de string (optimizadores de potencia)	P370, P401, P500	8	9	16	18
	P404, P485, P505, P601	6	8	14 (15 con SE30K)	14
Longitud máxima de string (optimizadores de potencia)		25	20	50	50
Potencia nominal máxima por string		5700 ⁽⁶⁾	5625 ⁽⁶⁾	11250 ⁽⁷⁾	12750 ⁽⁸⁾
Strings en paralelo de diferentes longitudes u orientaciones	Sí				

(5) No está permitido mezclar P404/P485/P505/P601 con P370/P401/P500 en un mismo string.

(6) Si la potencia nominal CA de los inversores es \leq que la potencia nominal máxima por string, entonces la potencia nominal máxima por string podrá alcanzar la potencia máxima CC de entrada de los inversores. Consultar: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-power-optimizer-single-string-design-application-note-sp.pdf>

(7) Para la red de 230/400 V: se permite instalar hasta 13500 W por string cuando la máxima diferencia de potencia entre strings sea de hasta 2000 W.

(8) Para la red de 277/480 V: se permite instalar hasta 15000 W por string cuando la máxima diferencia de potencia entre strings sea de hasta 2000 W.

8.3 Fitxa tècnica Inversor

/ Inversor monofásico StorEdge® con tecnología HD-Wave

SE2200H-RWS, SE3000H-RWS, SE3500H-RWS, SE3680H-RWS,
SE4000H-RWS, SE5000H-RWS, SE6000H-RWS

	SE2200H- RWS	SE3000H- RWS	SE3500H- RWS	SE3680H- RWS	SE4000H- RWS	SE5000H- RWS	SE6000H- RWS	
APLICABLE A INVERSORES CON CÓDIGO DE REFERENCIA	SEXXXXH-RWSXXBXX4							
SALIDA								
Potencia de salida CA nominal	2200	3000	3500	3680	4000	5000	6000	VA
Potencia máxima de salida CA	2200	3000	3500	3680	4000	5000	6000	VA
Tensión de salida CA (nominal)	220/230							Vca
Rango de tensión de salida CA	184 - 264,5							Vca
Frecuencia CA (nominal)	50/60 ± 5%							Hz
Corriente máxima de salida constante	10	14	16	16	18,5	23	27,5	A
Distorsión armónica total (THD)	<3							%
Factor de potencia	1, ajustable de -0,9 a 0,9							
Monitorización de la red, protección contra el funcionamiento en isla, factor de potencia configurable, umbrales configurables por país	Sí							
Carga de batería desde CA	Sí							
ENTRADA (FV)								
Potencia máxima de CC	3400	4650	5425	5700	6200	7750	9300	W
Sin transformador, sin puesta a tierra	Sí							
Tensión máxima de entrada	480							Vcc
Tensión nominal de entrada CC	380							Vcc
Corriente máxima de entrada	6,5	9	10	10,5	11,5	13,5	16,5	Adc
Protección contra polaridad inversa	Sí							
Detección de fallo de aislamiento a tierra	600							kΩ
Eficiencia máxima del inversor	99,2							%
Rendimiento europeo ponderado	98,3	98,8				99		%
ENTRADA (BATERÍA)								
Baterías compatibles	LG Chem RESU7H o LG Chem RESU10H							
Número de baterías por inversor	1							
Carga y descarga máxima continua de la batería	5000							W
Pico de carga y descarga máxima de la batería (10 segundos)	7000							W
Tensión máxima de entrada	480							Vcc
Corriente máxima constante	14							Adc
CARACTERÍSTICAS ADICIONALES								
Interfases de comunicación admitidos	RS485, Ethernet Wi-Fi ⁽¹⁾ , Celular (opcional), ZigBee para Smart Energy (opcional) ⁽²⁾							
Smart Energy Management ⁽³⁾	Limitación de exportación, Smart Energy							
Puesta en marcha del inversor	A través de la aplicación móvil SetApp utilizando la conexión wifi integrada para conexión local							
Protección contra arco eléctrico	Integrada y configurable por el usuario (conforme a la norma UL1699B)							

⁽¹⁾ La conectividad wifi requiere una antena externa. Para más información, consulte: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-wifi-zigbee-antenna-datasheet.pdf>
⁽²⁾ Para más información, consulte en el siguiente enlace: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-zigbee-plug-in-wireless-communication-for-setapp-datasheet.pdf>
⁽³⁾ La limitación de exportación y la mayoría de las funciones de administración de energía doméstica requieren un Meter de importación y exportación

8.4 Fitxa tècnica Bateria

Specification



RESU16H PRIME		
Usable Energy (DoD 100%) [kWh]	16	
Power (Rated/Peak) [kW]	7 / 11	
Voltage [V]	350-450	
Round-trip Efficiency [%]	≥ 90	
Storage Power Consumption [W]	< 0.1	
Dimension [W x H x D, mm]	504 x 1086 x 295	
Weight [kg]	Total	159
	Module	130 (65 x 2EA)
	Control Unit	24
	Connect Plate	5
Installation Type	Floor-standing	
Scalability	Up to 2 units (3.2kWh / 14kW)	
Operational Temperature [°C]	-10-50	
Ingress Rating	IP55	
Warranty	70% @10 years (E06a)	
Communication	CAN & RS485	
Certification	Cell	UL 1642
	Product	CE/FCC/RCM/IEC/62619/UL1973/IEC/62477

Compatible Inverters: SMA, SolarEdge, SUNGROW, GOODWE, Solis
*Values provided for 25°C.



RESU10H PRIME		
Usable Energy (DoD 100%) [kWh]	9.6	
Power (Rated/Peak) [kW]	5 / 7	
Voltage [V]	350-450	
Round-trip Efficiency [%]	≥ 90	
Storage Power Consumption [W]	< 0.1	
Dimension [W x H x D, mm]	504 x 817 x 295	
Weight [kg]	Total	111
	Module	82 (41 x 2EA)
	Control Unit	24
	Connect Plate	5
Installation Type	Floor-standing & Wall-mounted	
Scalability	Up to 2 units (1.9 kWh / 10 kW)	
Operational Temperature [°C]	-10-50	
Ingress Rating	IP55	
Warranty	70% @10 years (E06a)	
Communication	CAN & RS485	
Certification	Cell	UL 1642
	Product	CE/FCC/RCM/IEC/62619/UL1973/IEC/62477



LG Home Battery **RESU**
www.lghomebattery.com

Be Prepared with **RESU PRIME**



Power your home during outages and reduce the amount of energy used during expensive peak hours with **RESUhome batteries**.



LG Energy Solution

8.5 Codi Matlab d'inicialitzacions

```
%%CONSTANTES
constante.K = 1.38065*10^-23;
constante.q = 1.6*10^-19;
constante.cu = 1/56;
constante.al = 1/35;

%%PARÁMETROS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS
celulaPV.Rsh = 500; %ohm
celulaPV.Rs = 0.2; %ohm
celulaPV.n = 0.5; %ohm

%%PARAMETROS PLACA FOTOVOLTAICA
moduloPV.irradiancia_nominal=1000; %W/m^2
moduloPV.Isc = 12.28; %A
moduloPV.Voc = 41.2; %V
moduloPV.Vmpp = 34.2; %V
moduloPV.Impp = 11.7; %A
moduloPV.P = 400; %W
moduloPV.kisc = 0.04; %A/K
moduloPV.kvoc = -0.25; %V/K
moduloPV.ncelulas=120; %ud

%%PARAMETROS CAMPO FOTOVOLTAICO
campoPV.ns = 13; %ud
campoPV.np = 1; %ud

%%PARÁMETROS MPPT
MPPT.D_ini = 0.5;
MPPT.déltaD = 0.001;
MPPT.Dmax = 0.9;
MPPT.Dmin = 0.1;
MPPT.T = 0.01; %s
MPPT.rendimiento = 98.2; %[%]

%%PARÁMETROS BATERIA
bateria.Pmax = 5000; %W
bateria.V = 420; %V
bateria.imax_v = 14.3*350;
bateria.Imax = bateria.imax_v /bateria.V;
bateria.Emax = 9600; %Wh
bateria.Eini = 5000; %Wh

%%PARÁMETROS INVERSOR
inversor.rendimiento = 99; %[%]
inversor.T = 1e-4; %s

%%PARÁMETROS RED ELÉCTRICA
red.f = 50; %hz
red.V = 230; %Vrms
red.potencia = 5000; %W
red.FP = 1;

Temperatura = 25;
bateria.T = 0.01; %s

%%PROTECCIONES
proteccion.Fusible.PV = 20; %A
```

```

proteccion.Fusible.Imax_In = 1.2;

proteccion.Fusible.DC = 15; %A

proteccion.interconexionT_V = 0.1; %s
proteccion.interconexionT_f = 0.1; %s

proteccion.IA.T = 0.025; %s
proteccion.IA.In = 32; %A
proteccion.IA.Imax_In = 8;

proteccion.sobretensionCC = 1000; %V
proteccion.sobretensionAC = 1.2*red.V;

proteccion.diferencial = 0.03; %A

%%Cableado CC
cableado.Material= constante.cu;
cableado.S= 4; %mm^2
cableado.L = 37; %m
cableado.Nconductores = 2;

cableado.R_CC =
cableado.Material*cableado.Nconductores*cableado.L/cableado.S;

%%Cableado Inversor-Protecciones
cableado.Material = constante.cu;
cableado.S = 6; %mm^2
cableado.L = 1; %m
cableado.Nconductores = 2;

cableado.R_i =
cableado.Material*cableado.Nconductores*cableado.L/cableado.S;

%%Cableado Derivación Individual
cableado.Material = constante.cu;
cableado.S = 6; %mm^2
cableado.L = 3; %m
cableado.Nconductores = 2;

cableado.R_di =
cableado.Material*cableado.Nconductores*cableado.L/cableado.S;

%%CÁLCULOS VARIABLES
calc.k_iph = (moduloPV.Isc*(1+(moduloPV.kisc/100)*(Temperatura-
25)))/moduloPV.irradiancia_nominal;
calc.Vt = 120*(Temperatura+273.15)*constante.K/constante.q;
calc.id = moduloPV.Isc/(exp(moduloPV.Voc/(celulaPV.n*calc.Vt))-1);
calc.Vdc = moduloPV.Vmpp*campoPV.ns;
calc.Idc = moduloPV.Impp*campoPV.np;
calc.Iac = sqrt(2)*red.potencia/red.V;
calc.Q = red.potencia*tan(acos(red.FP));
calc.w = 2*pi*red.f; %[rad/s]
calc.ma = (red.V*sqrt(2)/calc.Vdc);
calc.inc_ma = 1/calc.Vdc;
calc.imaxbat = bateria.imax_v /bateria.V;

```

8.6 Codi Matlab del MPPT

```
function D = fcn(u, moduloPV, MPPT)

persistent Pold Vold Dold;
if isempty(Pold)
    Vold=moduloPV.Vmpp;
    Pold=moduloPV.P;
    Dold=MPPT.D_ini;

end
Inew=u(1);
Vnew=u(2);
Pnew=Inew*Vnew;
if Vnew<8
    Dold=Dold+MPPT.deltaD;
elseif Vnew>60
    Dold=Dold-MPPT.deltaD;
else
if Pnew<Pold
    if Vnew<Vold
        Dold=Dold-MPPT.deltaD;
        if Dold<MPPT.Dmin
            Dold=MPPT.Dmin;
        end

        elseif Vnew>Vold
            Dold=Dold+MPPT.deltaD;
            if Dold>MPPT.Dmax
                Dold=MPPT.Dmax;
            end
        end
    end
end

if Pnew>Pold
    if Vnew<Vold
        Dold=Dold+MPPT.deltaD;
        if Dold>MPPT.Dmax
            Dold=MPPT.Dmax;
        end

        elseif Vnew>Vold
            Dold=Dold-MPPT.deltaD;
            if Dold<MPPT.Dmin
                Dold=MPPT.Dmin;
            end
        end
    end
end
end

D=Dold;
Pold=Pnew;
Vold=Vnew;
```