

Treball de Fi de Màster

Màster en Enginyeria Industrial

Anàlisi d'un sistema de bateries per al control de caiguda de freqüència en plantes fotovoltaïques

MEMÒRIA

Autor: Oriol Yglesias Jiménez
Director: Oriol Gomis-Bellmunt
Convocatòria: Juny 2021



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



Resum

L'increment del nombre de les plantes renovables no controlables (com és el cas de l'energia solar i l'eòlica), presenta un gran repte per a la robustesa de les xarxes elèctriques. Per afrontar-lo, la Comissió Europea va dur a terme la renovació dels *grid codes* (requisits de la xarxa) per aconseguir un sistema elèctric comú, que pugui mantenir la seguretat del subministrament elèctric, augmentant la competitivitat de forma assequible per al consumidor.

D'entre els *grid codes* establerts, el present treball es fixarà en els serveis auxiliars de control de caiguda de freqüència que els generadors elèctrics han de prestar, amb especial atenció en el cas de les plantes fotovoltaïques de gran escala.

El servei de control de la caiguda de freqüència (amb les sigles MRPFL-U) consisteix en la reserva de potència activa, per a poder-la injectar a la xarxa en moments de desajust de la freqüència. Les formes de mantenir aquesta reserva poden ser, o bé la limitació de la producció de la central, o bé l'emmagatzematge d'energia en bateries.

L'objectiu principal d'aquest treball és el dimensionament i l'estudi de la viabilitat econòmica d'un sistema de bateries per a una central fotovoltaïca de gran escala, capaç de cobrir la demanda d'aquest servei. Per a fer-ho, s'analitza una planta fotovoltaïca de 50 MW ubicada a Catalunya. Aquest dimensionament es realitza seguint els assajos de certificació del servei requerits per Red Eléctrica, basats en la normativa europea.

S'utilitza el programa HOMER Legacy, especialitzat en el dimensionament i simulació de sistemes elèctrics renovables, i es compara el resultat amb càlculs analítics seguint els assajos anteriorment mencionats.

Finalment, s'elabora l'anàlisi econòmica de les solucions trobades i es compara amb l'alternativa de la reserva de producció, per determinar-ne la viabilitat.

Els resultats extrets de totes les simulacions permeten afirmar que en xarxes robustes com l'espanyola (i l'europea), l'alternativa d'un sistema de bateries és, des d'un punt de vista econòmic, molt més rendible que la reserva de producció.

A més, els resultats obtinguts mostren que el fet de ser aquest, un servei molt puntual, fa que el desgast de les bateries sigui mínim, motiu que apunta al fet que un estudi més profund sobre la gestió d'aquestes podria oferir més flexibilitat a la planta.

Sumari

| | |
|---|----|
| Resum | 3 |
| Sumari | 5 |
| 1. Glossari | 8 |
| 2. Prefaci | 9 |
| 2.1. Origen del projecte..... | 9 |
| 2.2. Motivació | 9 |
| 3. Introducció | 10 |
| 3.1. Objectius del projecte | 10 |
| 3.2. Abast del projecte | 10 |
| 3.3. Normativa | 11 |
| 4. Marc teòric | 12 |
| 4.1. Introducció | 12 |
| 4.2. Plantes fotovoltaïques..... | 12 |
| 4.2.1. Panells solars | 12 |
| 4.2.2. Inversors fotovoltaïcs | 13 |
| 4.2.3. Transformadors | 14 |
| 4.3. Sistemes d'emmagatzematge d'energia | 14 |
| 4.3.1. Bateria d'ió de liti..... | 16 |
| 4.3.2. Bateria de Plom-àcid..... | 17 |
| 4.4. Requeriments i codi del sistema elèctric | 17 |
| 4.4.1. MRPFL-U..... | 19 |
| 4.4.2. MRPFL-O | 21 |
| 4.5. Control de generació | 23 |
| 4.5.1. PPC (Power Plant Controller) | 23 |
| 5. Dimensionament i anàlisi | 25 |

| | | |
|--------|---|----|
| 5.1. | Introducció..... | 25 |
| 5.2. | Cas d'estudi..... | 25 |
| 5.3. | Metodologia..... | 25 |
| 5.3.1. | HOMER Legacy | 25 |
| 5.4. | Obtenció de dades | 27 |
| 5.4.1. | Solars..... | 27 |
| 5.4.2. | Caiguda de freqüència | 28 |
| 5.4.3. | Preu de l'energia | 29 |
| 5.5. | Definició del sistema i selecció de tecnologies | 30 |
| 5.6. | Definició de paràmetres..... | 31 |
| 5.6.1. | Plaques solars..... | 31 |
| 5.6.2. | Inversor | 32 |
| 5.6.3. | Xarxa elèctrica..... | 32 |
| 5.6.4. | Bateries..... | 33 |
| 5.6.5. | Càrrega (MRPFL-U) | 37 |
| 5.7. | Simulació horària..... | 38 |
| 5.7.1. | SIMULACIÓ 1..... | 38 |
| 5.7.2. | SIMULACIÓ 2..... | 40 |
| 5.7.3. | SIMULACIÓ 3..... | 42 |
| 5.7.4. | Anàlisi dels resultats..... | 45 |
| 5.8. | Simulació quinze-minutal..... | 46 |
| 5.8.1. | SIMULACIÓ 1..... | 47 |
| 5.8.2. | SIMULACIÓ 2..... | 49 |
| 5.8.3. | SIMULACIÓ 3..... | 50 |
| 5.8.4. | SIMULACIÓ 4..... | 52 |
| 5.8.5. | Anàlisi dels resultats..... | 54 |
| 5.9. | Anàlisi econòmica..... | 55 |

| | | |
|---------|---|----|
| 5.10. | Estudi analític de la simulació..... | 57 |
| 5.10.1. | Assaig US2F2: $s_2=2\%$ i $\Delta f_1=0,2$ Hz | 57 |
| 5.10.2. | Assaig US2F5: $s_2=2\%$ i $\Delta f_1=0,5$ Hz | 59 |
| 5.10.3. | Assaig US12F2: $s_2=12\%$ i $\Delta f_1=0,2$ Hz | 60 |
| 5.10.4. | Assaig US12F5: $s_2=12\%$ i $\Delta f_1=0,5$ Hz | 62 |
| 5.10.5. | Anàlisi dels resultats..... | 63 |
| 5.10.6. | Anàlisi econòmica | 63 |
| 6. | Conclusions | 65 |
| 6.1. | Perspectives futures | 65 |
| 7. | Impacte ambiental..... | 66 |
| 7.1. | Impacte ambiental de la instal·lació | 66 |
| 7.1.1. | Impacte en el mercat elèctric | 66 |
| 7.1.2. | Impacte de la fabricació de bateries de liti | 66 |
| 7.2. | Impacte ambiental del projecte | 67 |
| 8. | Pressupost del projecte..... | 69 |
| 9. | Bibliografia | 70 |
| | Bibliografia complementària | 71 |

1. Glossari

MRPFL: Mode de regulació potència-freqüència limitat

MRPFL-O: Mode de regulació potència-freqüència limitat a sobre-freqüència

MRPFL-U: Mode de regulació potència-freqüència limitat a sota-freqüència

PV: Fotovoltaica

LS-PVPP: Large Scale Photovoltaic Power Plant

OMIE: Operador del mercat ibèric elèctric

PPC: Power Plant Controller

AC: Corrent alterna

DC: Corrent Continua

MPPT: Maximum Power Point Tracking

LS-PVPPs: Large Scale Photovoltaic Power Plants

ENTSOE: European Network of Transmission System Operators for Electricity.

ESS: Energy Storage System

EMS: Energy management system

BMS: Battery management System

MGE: Mòdul de generació d'electricitat

GRD: Gestor de la xarxa de distribució

GRT o TSO: Gestor de la xarxa de transport

Statcom: Compensador estàtic síncron

CF: Cash flow o Flux de caixa

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

Aquest treball va ser titulat en un primer moment *Anàlisi de la capacitat de cobertura de demandes pic en plantes PV*, amb l'objectiu d'estudiar la viabilitat tècnica i econòmica de controlar la producció de les plantes PV reservant capacitat de producció amb l'objectiu de poder subministrar-la en moments de demanda pic. A causa de la falta d'objectius assumibles, es va apostar per centrar-se en un tipus de demanda pic concret: el control de potència-freqüència en cas de caiguda de freqüència, mitjançant el dimensionament d'un sistema de bateries.

2.2. Motivació

La preocupació per la crisi climàtica, ha estat l'eix vertebrador de la meua trajectòria acadèmica. El desafiament que suposa la descarbonització del sector energètic, és la meua principal font de motivació, motiu pel qual vaig decidir orientar-me cap a les energies renovables, escollint l'especialitat d'energia en els estudis de màster. Aquests estudis, m'ha donat una visió global del sistema elèctric, imprescindible per entendre el paper de les renovables en aquest. Concloure aquesta etapa acadèmica amb un treball relacionat amb les energies renovables em va semblar una bona oportunitat per aplicar i aprofundir en els coneixements assolits.

3. Introducció

En aquest capítol, es descriuen els objectius del projecte i l'abast.

3.1. Objectius del projecte

Aquest treball té com a objectiu principal el dimensionament d'un sistema auxiliar de regulació de freqüència per una planta fotovoltaica, basat en bateries. Els objectius que es marquen per a la realització d'aquest estudi són:

- L'estudi de la normativa del sistema elèctric espanyol amb relació als requeriments de control d'episodis de caiguda de la freqüència, amb especial interès de les plantes fotovoltaïques.
- El dimensionament d'un sistema de bateries per a una planta fotovoltaica (cas d'estudi).
- L'anàlisi del comportament de les bateries en aquest tipus d'actuacions, mitjançant la simulació d'un cas d'estudi.
- L'estudi de la viabilitat econòmica del projecte, i la comparació amb l'alternativa.

Altres objectius d'aquest projecte són:

- L'adquisició de coneixements relacionats amb els sistemes auxiliars de la xarxa elèctrica.
- Aprofundir en els coneixements relacionats amb les plantes de generació renovable, el seu control i la integració a la xarxa elèctrica.
- Adquirir coneixements sobre els ESS (*Energy Storage System*) utilitzats a les centrals fotovoltaïques.

3.2. Abast del projecte

- L'abast del present estudi, es limita a la realització del dimensionament d'un sistema de bateries sense aprofundir en la definició dels aspectes tècnics de les mateixes ni la seva instal·lació en el terreny.
- L'estudi, es basa en els codis de xarxa impulsats per la Comissió Europea, i en la normativa del sistema elèctric espanyol.
- L'adquisició de dades dels recursos energètics, es realitza de bases de dades d'accés lliure que han estat considerades suficientment contrastades.

3.3. Normativa

Aquest treball està basat principalment en les normatives vigents, que fan referència als requisits de xarxa de les centrals de generació:

- Reglament UE 2016/631 de la Comissió Europea del 14 d'abril de 2016 que estableix un codi de xarxa sobre requisits de connexió de generadors de xarxa.
- Reglament UE 2016/1388 de la Comissió Europea del 17 d'agost de 2016 per el que s'estableix un codi de xarxa en matèria de connexió de la demanda.
- BOE num.208, Orden TED/749/2020, de 16 de julio, por la que se establecen los requisitos técnicos para la conexión a la red necesarios para la implementación de los códigos de red de conexión. 1 d'agost de 2020.

4. Marc teòric

4.1. Introducció

En aquest capítol, s'exposen els coneixements teòrics en els quals es basa aquest treball. En primer lloc, es descriu la tecnologia de les plantes fotovoltaïques, posteriorment s'analitzen els requeriments normatius els quals intenta donar resposta aquest treball i finalment s'explica de forma general el sistema de control emprat en plantes fotovoltaïques.

4.2. Plantes fotovoltaïques

En aquest apartat es descriu l'estructura de les plantes fotovoltaïques, i es detallen breument els seus components.

Les plantes fotovoltaïques són centrals de producció elèctrica que mitjançant panells fotovoltaïcs, transformen l'energia solar en energia elèctrica. Els seus components principals són els panells solars, els inversors i els transformadors (Fig. 1).

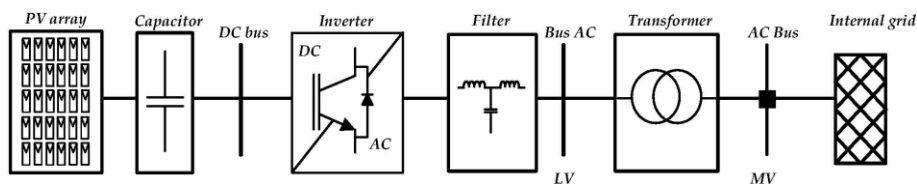


Fig. 1 Esquema dels components d'una central fotovoltaïca [1]

4.2.1. Panells solars

Els panells solars, la base d'aquestes centrals, converteixen la radiació solar en electricitat en corrent continu, mitjançant l'efecte fotoelèctric. Aquests panells són associacions de cel·les de silici (material semiconductor) interconnectades entre elles i encapsulades entre dues capes d'EVA (etilè-vinil-acetat), un vidre frontal i un termoplàstic (tedlar), de forma estanca.

Existeixen diferents tipus de cel·les, sent les més emprades les monocristal·lines i les policristal·lines. Ambdues, es diferencien per la seva estructura cristal·lina, i els processos de fabricació. Les cel·les monocristal·lines, constituïdes per un sol cristall de silici, ofereixen rendiments propers al 16%, mentre les policristal·lines, es troben al voltant del 14%. Existeixen també altres tecnologies com les cel·les PERC, basades en les anteriors, que

incorporen una capa dielèctrica que permet captar ones de longitud més gran, que arriben a rendiments propers al 20%.

L'eficiència dels panells solars és un factor de gran importància en plantes solars de gran escala, ja que condiciona l'extensió necessària, i el transport, muntatge, instal·lació i manteniments dels panells [3].

4.2.2. Inversors fotovoltaïcs

Els inversors són elements electrònics de potència que tenen com a funció principal convertir l'electricitat generada pels mòduls fotovoltaïcs, de corrent continu (DC) a corrent altern (AC). Acostumen a incorporar sistemes de MPPT, que permeten optimitzar el punt de màxima potència per obtenir el millor rendiment de la generació elèctrica. Finalment, també controlen la sortida dels *strings* que hi tenen connectats, per tal de complir amb els requeriments de la xarxa elèctrica.

A les LS-PVPP (centrals fotovoltaïques de gran escala), cal interconnectar centenars de panells solars per aconseguir arribar a potències altes. Aquests panells poden estar connectats de forma central, en *string* o *multistring* [1,3], depenent de la configuració d'inversors desitjada.

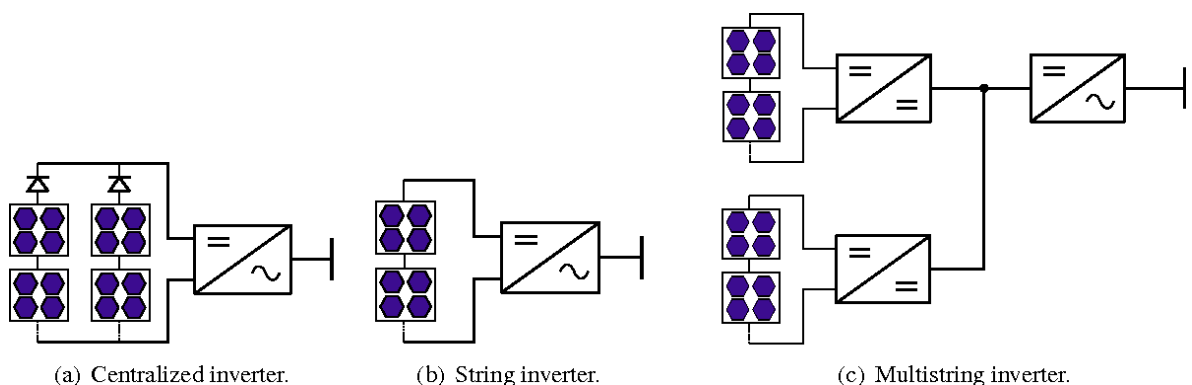


Fig. 2 Tipologies de connexió de panells fotovoltaïcs [2]

Tal com mostra la Fig. 2, depenent de la connexió dels panells solars, els busos s'interconnecten per conduir el corrent a l'inversor central (a), o bé es transforma en corrent altern en inversors modulars a cada *string* (b) o bé es realitza la conversió en una primera etapa cc-cc per cada *string*, i s'acaba enviant a un inversor central (c).

4.2.3. Transformadors

L'electricitat alterna a baixa tensió, s'eleva a la tensió d'injecció a la xarxa amb transformadors de tres debanats. Aquests, acostumen a transformar l'electricitat en dues etapes: la primera, eleva el voltatge fins a un rang de 13,8-46 kV, i la segona incrementa el voltatge fins a la tensió de la xarxa.

Finalment, la sortida dels diferents transformadors de la central es connecten a la *collection grid* (el node d'unió dels transformadors amb la xarxa) en interconnexió radial, en estrella o en anell [3].

4.3. Sistemes d'emmagatzematge d'energia

El procés de descarbonització de la xarxa elèctrica, en el que les energies renovables no controlables van en augment i les centrals tèrmiques en decrement, fa que els sistemes d'emmagatzematge d'energia adquireixin un paper molt rellevant. La disparitat entre la disponibilitat dels recursos energètics emprats per les centrals renovables no controlables i la demanda elèctrica, obliga a buscar sistemes auxiliars (lliures d'emissions), que garanteixin la fiabilitat i la seguretat del subministrament de la xarxa elèctrica. Per aquesta raó, en els pròxims anys l'emmagatzematge d'energia es preveu que sigui una peça clau per assegurar la flexibilitat d'operació de les xarxes elèctriques [4].

Existeixen diferents tecnologies utilitzades per a l'emmagatzematge d'energia, i les seves propietats intrínseques determinen la seva conveniència a ser utilitzades en determinades aplicacions. Aquestes tecnologies són [5, 6]:

- Emmagatzematge electroquímic: basats en reaccions químiques, ofereixen un ampli rang de potències, de pocs kW fins a 10 MW, i temps de descàrrega de l'ordre de les hores. Un exemple en són les bateries.
- Emmagatzematge electromagnètic: utilitza l'efecte electromagnètic, amb un rang de potència entre els 10 kW i 1 MW, i temps de descàrrega molt baixos, de l'ordre dels segons. L'exemple més notori són els condensadors.
- Emmagatzematge termodinàmic: s'utilitzen les propietats termodinàmiques de fluids per a l'emmagatzematge energètic. S'aconsegueixen alts rangs de potència (entre 100 MW i 1 GW), i temps de descàrrega de l'ordre de les hores. En són un exemple l'emmagatzematge en forma de pressió o en forma de temperatura (com per exemple a les centrals solars tèrmiques).

- Emmagatzematge mecànic: aquest tipus de tecnologia utilitza l'energia mecànica (potencial o cinètica), per emmagatzemar energia, oferint un ampli rang de potències (des de desenes de kW fins a 1 GW). Els temps de descàrrega és molt variable segons el tipus. Dos exemples àmpliament utilitzats són les centrals de rebombeig i els volants d'inèrcia (també coneguts com a *flywheels*).

Els sistemes d'emmagatzematge emprats a les plantes fotovoltaïques, són bàsicament electroquímics. La capacitat d'aquests sistemes típicament es troba a l'ordre dels MWh, i fan servir cel·les d'ió de liti (Li-ion) o d'àcid-plom. En els últims anys, les vendes de bateries d'ió de liti han anat augmentant la quota de mercat fins a situar-se prop del 90% de les noves instal·lacions de gran escala [7].



Fig. 3 Sistema de bateries Tesla MegaPack [Tesla]

Els elements que emmagatzemen l'energia a una bateria, s'anomenen cel·les, les quals es connecten en sèrie i/o paral·lel (segons les característiques de tensió i corrent desitjats) obtenint mòduls, que a la vegada, es connecten entre ells per obtenir el sistema de bateries. Les cel·les poden tenir forma prismàtica o cilíndrica, i tot i aprofitar millor l'espai les prismàtiques, en bateries de gran potència es fan servir cel·les cilíndriques per la facilitat de la seva refrigeració.

Cada cel·la està formada per un càtode i un ànode (els pols positiu i negatiu respectivament), que intercanvien ions a través d'un medi electrolític.

A més de les cel·les, aquests dispositius també incorporen components electrònics com controladors de càrrega (BMS) o equips de protecció d'equip. A més, solen incorporar sistemes de refrigeració de les bateries.

Els paràmetres més habituals per definir una bateria i el seu funcionament són la capacitat nominal i el voltatge. La capacitat nominal és la quantitat d'energia que se'n pot extreure a

un corrent constant quan es troba al 100% de càrrega, i se sol expressar en Ah. Els fabricants, típicament ofereixen els assajos corresponents a les corrents amb temps de descàrrega de 10, 20 i 100 hores (C_{10} , C_{20} i C_{100} respectivament) [8], ja que la capacitat no és un valor constant a tots els nivells de descàrrega a causa de l'efecte de la cinètica de les reaccions químiques que es produeixen al seu interior [9].

La capacitat de les bateries, va disminuint amb el temps d'ús. Aquesta disminució depèn principalment de la profunditat de descàrrega (DOD) dels cicles que es realitzen. Quan els cicles es realitzen a profunditats de descàrrega menors, l'envelliment de la bateria és menor. Es considera que una bateria ha arribat al final de la seva vida quan la capacitat de la bateria es redueix al 75% de la capacitat inicial [6].

A continuació s'expliquen detalladament les dues tecnologies utilitzades en bateries, esmentades anteriorment.

4.3.1. Bateries d'ió de liti

Desenvolupades a principis dels noranta per Sony Corporation, aquestes bateries han estat les més emprades per l'electrònica de consum [5]. Existeixen diferents tipus de bateries basades en aquesta tecnologia, diferenciades pel material de l'ànode i la composició de l'electròlit.

El funcionament d'aquestes bateries, es fonamenta en l'intercanvi de ions de liti entre l'ànode i el càtode. L'ànode sol ser de grafit i el càtode, de diòxid de cobalt de liti o compostos de manganès de liti. Com electròlit, aquestes bateries solen utilitzar sals de liti dissoltes en un compost orgànic.

Aquestes bateries ofereixen una densitat energètica molt alta, amb relació a la resta de les tecnologies. Són capaces d'oferir descàrregues a potències elevades, mantenint eficiències altes, i presenten poques pèrdues per auto descàrrega [7]. Les cel·les tenen un voltatge de 3,6 V (superior a altres tecnologies), i tenen temps de vida relativament llarg, uns 4500 cicles (depenent de la profunditat de la descàrrega). Tot i això, hi ha fabricants com Tesla, que asseguren poden oferir més de 15 anys de vida útil amb descàrregues del 100%.

El cost d'aquesta tecnologia, ha caigut més d'un 80% des de 2010. Actualment, el preu de les cel·les es troba entre els 108 \$/MWh i els 140 \$/MWh (per a sistemes de 20 MW i 80 MWh) [7].

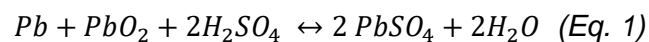
D'altra banda, aquestes bateries poden presentar problemes relacionats amb l'estabilitat tèrmica i la seguretat de les cel·les. Aquests, són causats per l'alliberament d'oxigen de la reacció química que es produeix a l'interior, quan els càtodes d'òxid de liti s'escalfen, podent causar fuites de gasos i fins i tot la ignició d'aquestes. És per això, que en sistemes de gran escala, s'hi incorporen sistemes de control i gestió tèrmica, i proteccions per càrregues o descàrregues d'alta intensitat.

4.3.2. Bateries de Plom-àcid

Les bateries de plom-àcid, van ser les primeres bateries a ser inventades fa més de 150 anys i són les més nombroses tant en el nombre d'instal·lacions com la capacitat instal·lada.

Aquestes bateries fan servir àcid sulfúric aquós (en una concentració del 37%) com electròlit. A cada una de les cel·les, s'hi troba un càtode de diòxid de plom i un ànode de plom metàl·lic d'estructura porosa (esponja).

Tal com mostra l'equació 1, el funcionament d'aquesta bateria està basat en la reacció electroquímica, que durant la descàrrega, transforma els elèctrodes en sulfat de plom ($PbSO_4$), a la vegada que la concentració d'àcid sulfúric disminueix, i torna els components a la seva situació inicial durant la càrrega [7].



Aquesta tecnologia té un cost baix comparat amb les altres. Per altra banda, presenta una pitjor gestió, una vida útil curta (2500 cicles) i una eficiència més baixa. A més, la seva densitat energètica és baixa i precisa de manteniment periòdic per reomplir l'aigua de l'electròlit, per evitar danys permanents (per exemple per estratificació àcida).

El rang de potències és molt ampli, i poden arribar a subministrar per sobre dels 10 MW.

4.4. Requeriments i codi del sistema elèctric

El sistema elèctric espanyol exigeix el compliment dels codis de xarxa del reglament UE 2016/1388 als sistemes de generació que hi estan connectats. L'objectiu de compartir un mateix codi de mercat amb tots els països de la Unió Europea, és aconseguir un mercat europeu d'electricitat plenament interconnectat y funcional, capaç de mantenir el

subministrament energètic, augmentar la competitivitat i garantir que tots els consumidors puguin adquirir l'energia a preus assumibles [10].

Entre els requisits existents, es destaquen els que fan referència al control de la generació:

- Protecció de la xarxa de transport.
- Protecció de la instal·lació de demanda connectada a la xarxa de transport o distribució.
- Control de la freqüència (ajust de la potència activa).
- Restricció de potència activa.
- Restricció de potència reactiva.
- Restricció de tensió.

Els diferents tipus de requisits, no són d'aplicació obligatòria per a tots els MGE (mòdul de generació d'electricitat). La normativa diferencia els tipus de plantes de forma progressiva depenent del seu impacte a la xarxa, mesurat amb relació a la potència instal·lada i nivell de tensió al punt de connexió. Els generadors de menor impacte han de complir un nombre de requisits més reduït o laxes, incrementant-se amb l'augment de l'afecció. La classificació es realitza de la forma següent:

| Tipus MGE | Tensió al punt de connexió | Potència instal·lada |
|-----------|----------------------------|---|
| A | $V < 110 \text{ kV}$ | $0,8 \text{ kW} \leq P \leq 100 \text{ kW}$ |
| B | $V < 110 \text{ kV}$ | $100 \text{ kW} \leq P \leq 5 \text{ MW}$ |
| C | $V < 110 \text{ kV}$ | $5 \text{ MW} \leq P \leq 50 \text{ MW}$ |
| D | $V \geq 110 \text{ kV}$ | $P > 50 \text{ MW}$ |

Taula 1 Tipus de MGEs [10]

En el cas de MGEs que comparteixin punt de connexió i s'uneixin per a formar una unitat econòmica, es consideren segons la suma de les seves capacitats.

En aquest estudi, ens basarem en el control de la freqüència, amb especial atenció en el cas de caiguda de freqüència. Totes les plantes (tipus A, B, C i D) han de ser capaces de mantenir-se en funcionament, connectades a la xarxa en freqüències amb una variació de fins a 2 Hz/s en intervals de 500 ms. Quan aquestes variacions sobrepassen els límits de la banda morta establerts pel gestor de la xarxa (GRD o GRT), certs mecanismes auxiliars han d'activar-se, depenent del tipus de planta.

4.4.1. MRPFL-U (Mode de regulació potència-freqüència limitat a sota freqüència)

Es considera un episodi de caiguda de freqüència quan aquesta se situa per sota del llindar definit per la banda morta (que podrà variar entre 0,2 i 0,5 a petició del gestor de la xarxa de transport). Quan es produeix, el regulador del sistema obliga als generadors de tipus C i D a incrementar la injecció de potència activa a la xarxa durant un mínim de 15 minuts, amb un ajust de l'estatisme del 5% (que podrà variar entre el 2% i el 12%). La potència màxima total que una central de generació estarà obligada a injectar, estarà sempre fixada per la potència màxima de la planta [11,12].

Es defineix l'estatisme com la diferència percentual de la freqüència entre la diferència percentual de la potència (Eq. 2).

$$s (\%) = 100 \cdot \frac{\frac{|\Delta f - \Delta f_1|}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_{ref}}} \quad (\text{Eq.2})$$

On Δf_1 representa la banda morta (0,2Hz o 0,5Hz), Δf la diferència de freqüència entre la nominal i l'actual, f_n la freqüència nominal (50Hz), i la P_{ref} la potència activa del moment en el qual entra en funcionament el servei [12]. Per a la pràctica, aquesta equació es representa de la següent manera:

$$\frac{\Delta P}{P_{ref}} = 100 \cdot \frac{|\Delta f - \Delta f_1|}{s \cdot f_n} \quad (\text{Eq. 3})$$

Per poder una planta entrar en operació en el mercat espanyol, haurà de complir amb la Norma tècnica de supervisió de la conformitat per a mòduls de generació elèctrica, segons el reglament UE 2016/631 [11]. Aquest document detalla les proves que ha de passar una central per a poder connectar-se a la xarxa. Els assajos corresponents a MRPFL-U, són els següents:

- Assaig **US2F2**: $s_2=2\%$ i $\Delta f_1=-0,2$ Hz (Variació de potència vs. Freqüència requerit (estatismes 2, 5 i 12% amb $\Delta f_1=0,2$ Hz) Fig. 4)
- Assaig **US2F5**: $s_2=2\%$ i $\Delta f_1=-0,5$ Hz (Fig. 5)
- Assaig **US12F2**: $s_2=12\%$ i $\Delta f_1=-0,2$ Hz (Fig. 4)
- Assaig **US12F5**: $s_2=12\%$ i $\Delta f_1=-0,5$ Hz (Fig. 5)

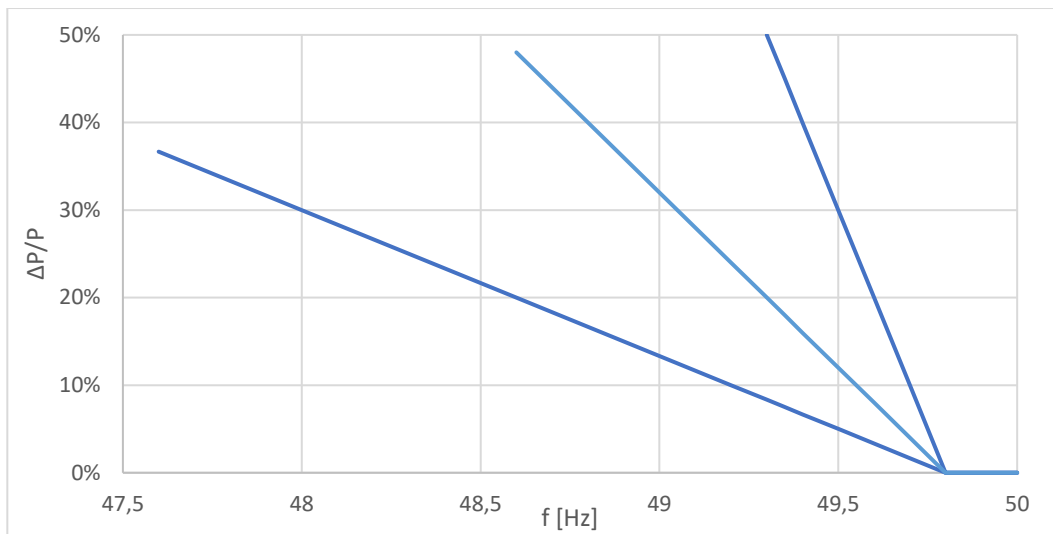


Fig. 4 Variació de potència vs. Freqüència requerit (estadístimes 2, 5 i 12% amb $\Delta f_1=0,2\text{Hz}$)

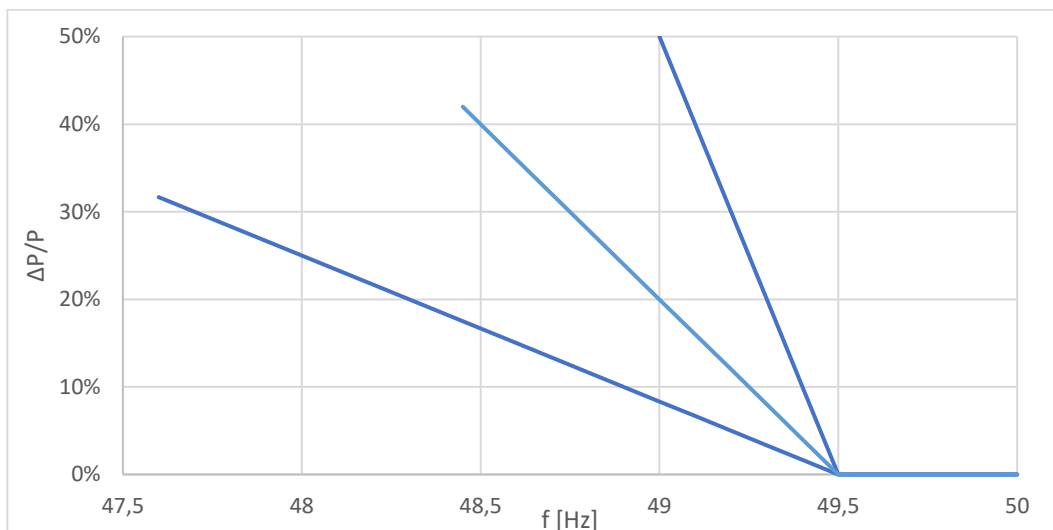


Fig. 5 Variació de potència vs. Freqüència requerit (estadístimes 2, 5 i 12% amb $\Delta f_1=0,5\text{Hz}$)

El lapse d'activació d'aquest sistema auxiliar, depèn del tipus de planta i depèn dels següents temps [12]:

- Temps de retard inicial (t_a): temps d'activació de la resposta, que haurà de ser el mínim possible (menor de 2 segons).
- Temps de resposta (t_r): temps en arribar al 90% de la resposta esperada.
- Temps d'establiment (t_e): temps que triga la planta a establir-se a un nivell de resposta dins de la banda d'error $\pm 5\%$ de la potència esperada.

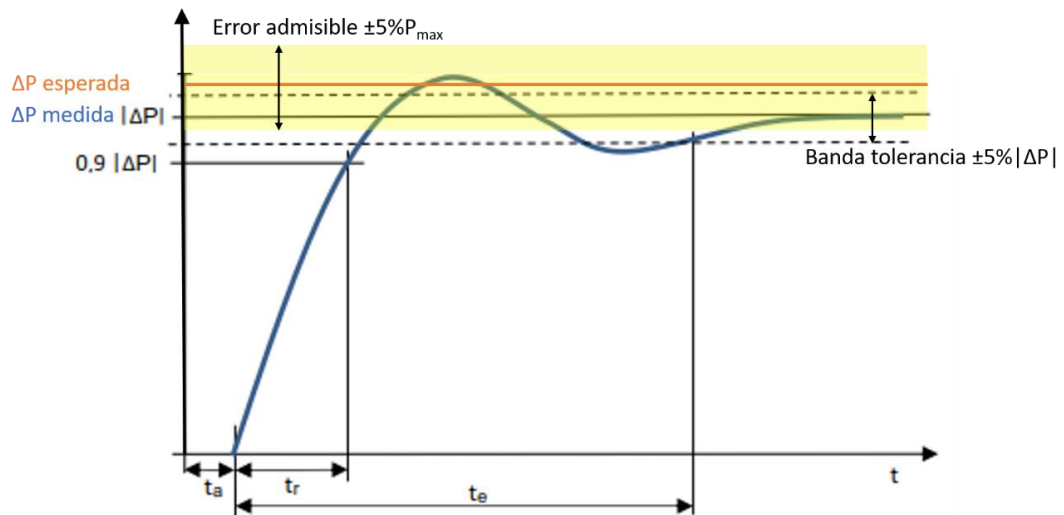


Fig. 6 Exemple de resposta que il·lustra els temps t_a , t_r , i t_e [11]

La reserva de regulació primària haurà de completar aquesta actuació en un temps inferior a 15 segons, des del moment del desequilibri i si aquest valor és inferior o igual a 1500 MW. En cas d'un desequilibri superior, la planta haurà de subministrar com a mínim un 50% de la potència abans dels 15 segons, i arribar a la banda de 95-105% abans dels 30 segons. Aquest requeriment fa indispensable la incorporació de sistemes de PPC que permetin la injecció automàtica.

Existeixen dues formes d'injectar aquesta potència: regulant la potència generada, mantenint sempre un marge, o bé emmagatzemant energia en bateries (ESS) [1].

4.4.2. MRPFL-O (Mode de regulació potència-freqüència limitat a sobre freqüència)

En moments en els quals la freqüència augmenta per sobre de la banda morta (també entre 0,2 i 0,5 Hz), tots els mòduls de generació (tipus A, B, C i D) han de disminuir la potència activa per aconseguir restablir la freqüència dins els límits. De la mateixa forma que el MRPFL-U, la variació de la potència en funció de la variació de freqüència segueix també la tendència de l'estatisme (Eq. 2), que haurà d'estar entre el 2 i el 12% [13].

De la mateixa forma que anteriorment, REE obliga els generadors a certificar els assajos següents per a certificar el bon funcionament de la instal·lació:

- Assaig **OS2F2**: $s_2=2\%$ i $\Delta f_1=0,2$ Hz (Fig. 7)
- Assaig **OS2F5**: $s_2=2\%$ i $\Delta f_1=0,5$ Hz (Fig. 8)
- Assaig **OS12F2**: $s_2=12\%$ i $\Delta f_1=0,2$ Hz (Fig. 7)

- Assaig **OS12F5**: $s_2=12\%$ i $\Delta f_1=0,5$ Hz (Fig. 8)

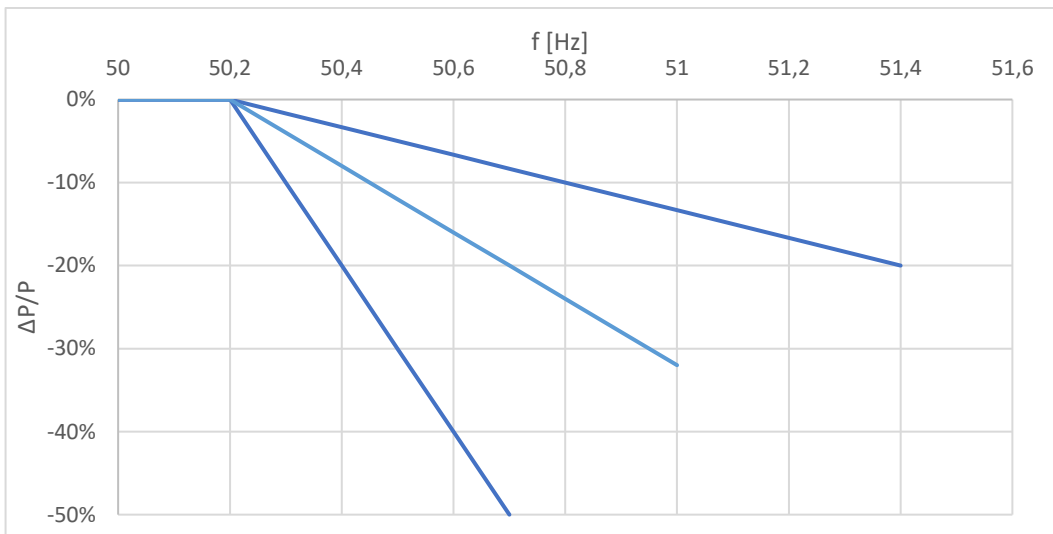


Fig. 7 Variació de potència vs. Freqüència requerit (estatismes 2, 5 i 12% amb $\Delta f_1=0,2$ Hz)

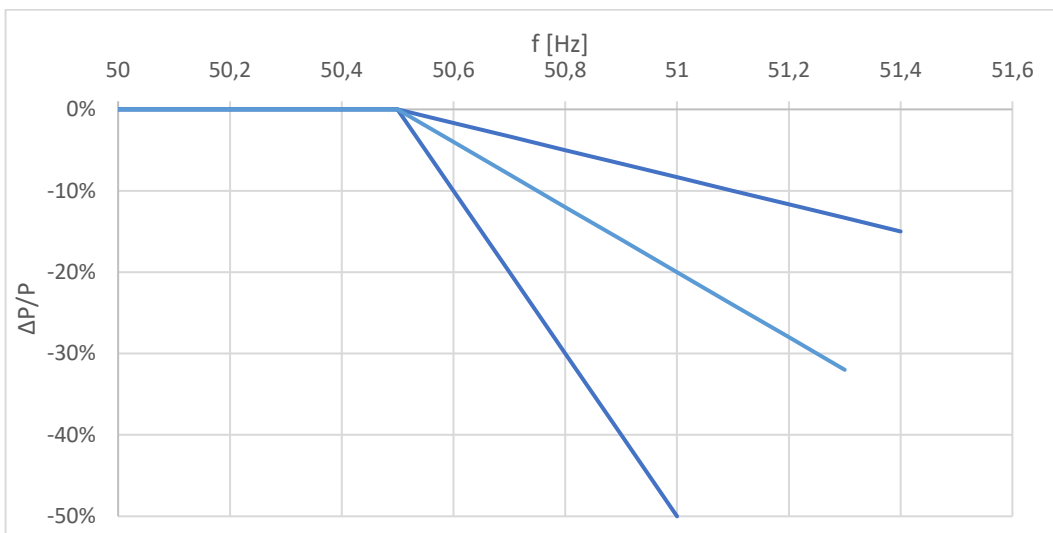


Fig. 8 Variació de potència vs. Freqüència requerit (estatismes 2, 5 i 12% amb $\Delta f_1=0,5$ Hz)

Pel que fa als temps de resposta, es requereixen els mateixos temps que per al MRPFL-U, citats anteriorment (4.4.1).

4.5. Control de generació

Totes les plantes de generació elèctrica connectades a la xarxa (Taula 1), han de tenir un sistema autònom de control. El nivell de control requerit per cada planta, variarà segons el tipus:

- Tipus A: Resposta automatitzada limitada i control mínim per part de GRT i GRD.
- Tipus B: Resposta dinàmica automatitzada de major rang i major resiliència.
- Tipus C: Resposta dinàmica a temps real optimitzada, estable i altament controlable, amb l'objectiu de prestar serveis auxiliars a la xarxa.
- Tipus D: Capacitat de control de tot el sistema, per garantir un funcionament estable de la xarxa elèctrica. Han d'oferir servei auxiliar de producció a escala europea.

Per a les centrals de tipus C i D, serà molt important tenir la informació i control de la producció, per a poder utilitzar-la en les diferents situacions descrites anteriorment.

4.5.1. PPC (Power Plant Controller)

El control de les plantes fotovoltaïques de gran potència, s'acostuma a realitzar amb els dispositius anomenats PPC (Power Plant Controller). Aquest, és un equip de control que regula la resposta de les unitats de generació (en aquest cas els inversors), mitjançant senyals analògics i/o digitals per a regular la seva resposta en els diferents paràmetres d'entrada, amb l'objectiu principal de gestionar la potència activa i reactiva produïda.

Està dissenyat per monitorar i controlar la generació, gestionar sistemes d'emmagatzematge d'energia i els bancs de condensadors o statcoms. Tal com mostra la Fig. 9, el PPC llegeix les mesures de tensió, potència activa, potència reactiva i freqüència de la planta, i els compara amb els *setpoints* requerits pel TSO (o GRT). Finalment el PPC determina els *setpoints* dels inversors [14].

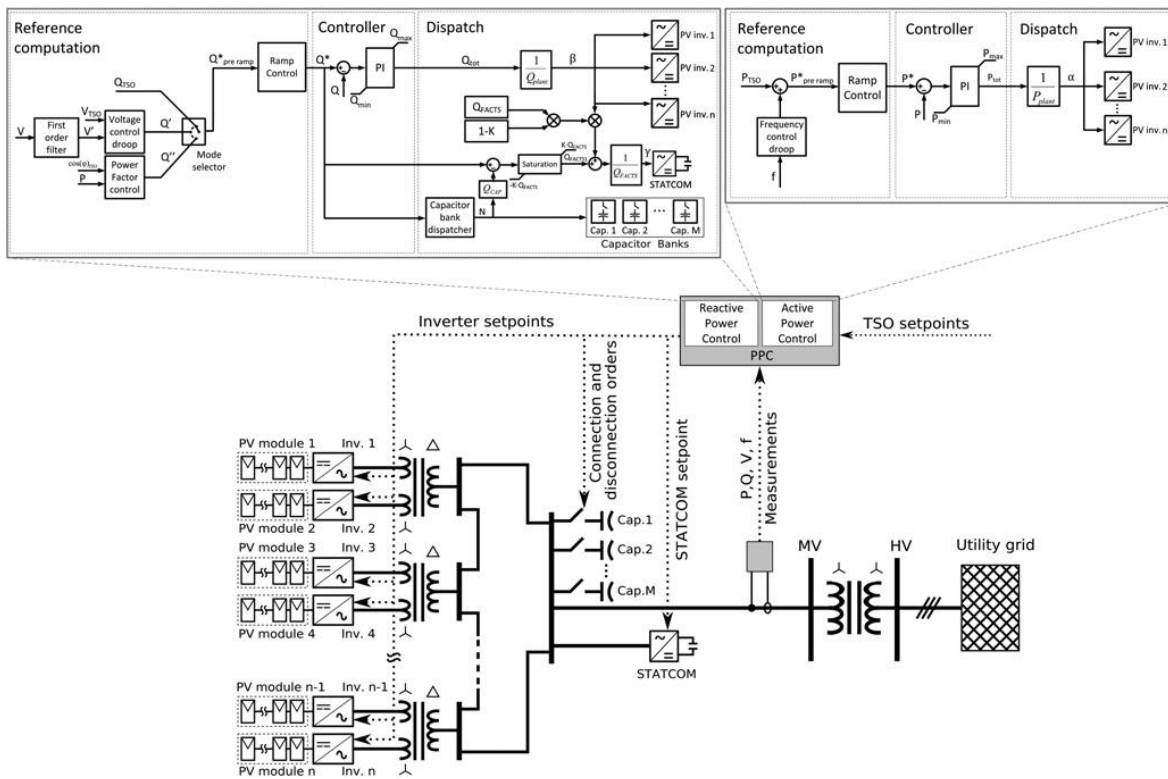


Fig. 9 Esquema d'una planta fotovoltaica amb PPC [14]

5. Dimensionament i anàlisi

5.1. Introducció

En aquest capítol, es detalla el dimensionament del sistema de bateries per a una planta fotovoltaïca. En primer lloc, es detalla el cas d'estudi en el qual es basa aquest treball. Posteriorment, s'explica la metodologia emprada per aquest dimensionament, següent de l'obtenció de dades, la definició del sistema i finalment les simulacions i anàlisi d'aquestes.

5.2. Cas d'estudi

La següent anàlisi del sistema de bateries, estudiarà una planta tipus, de 50 MW de potència nominal ubicada a Catalunya. Aquesta planta, tipificada amb la lletra C per la normativa, tindrà requeriments de servei auxiliar de control de freqüència.

En primer lloc, es dimensionarà un sistema de bateries i posteriorment s'estudiarà la capacitat de respondre a un episodi de caiguda de freqüència (MRPFL-U) segons les exigències descrites a la *Norma técnica de supervisión de la conformidad de los módulos de generación de electricidad según el Reglamento UE 2016/631*, editada per REE.

5.3. Metodologia

La metodologia seguida per a la realització d'aquest treball, consta de tres etapes: l'obtenció i tractament de les dades, l'aplicació de *softwares* de simulació (HOMER Legacy) i realització de càlculs analítics i finalment l'avaluació dels resultats.

Posteriorment, es realitza l'estudi econòmic de la instal·lació, i es compara amb l'alternativa de la reserva de potència en la generació per a determinar-ne la viabilitat econòmica.

5.3.1. HOMER Legacy

HOMER Legacy és el programa escollit per a la modelització i estudi del sistema. Aquest, és un potent *software* que simplifica la tasca de dissenyar, dimensionar i analitzar microxarxes elèctriques renovables o híbrides.

En el disseny d'una microxarxa elèctrica, cal tenir en consideració un gran nombre de paràmetres, que dificulten molt una resolució analítica de sistemes amb diversos

dispositius. HOMER permet avaluar de forma ràpida, la combinatòria d'opcions possibles, i mitjançant l'estudi dels fluxos d'energia i realitzant algorismes heurístics, per trobar la solució econòmicament més favorable.

L'anàlisi del sistema realitza els balanços d'energia per les 8.760 hores de l'any (o temps de mostreig diferent de l'establert), mitjançant la comparació de les demandes elèctrica i tèrmica, amb la generació (en aquest cas de les plaques solars), la gestió del banc de bateries i la disponibilitat de la xarxa pública. Aquests càlculs, els fa ponderat el cost de l'energia en cada cas, per trobar la solució que compleixi les restriccions i tingui un cost menor.

Els resultats de les simulacions són mostrats en ordre ascendent del cost net de la instal·lació. Cada solució conté un informe complet que la justifica de forma numèrica, tant tècnicament com econòmicament.

La interfície de HOMER és amigable i senzilla. Primerament, cal escollir les tecnologies que es desitja estudiar. A la Fig. 10 s'observa la varietat de dispositius que poden incloure's a la simulació. És necessari introduir les característiques tècniques de cada element del sistema abans de poder-lo connectar a la microxarxa, així com els costos dels dispositius, del reemplaçament i el cost d'operació i manteniment. La propi programa, té amb una extensa biblioteca de dispositius comercials que simplifica el procés.

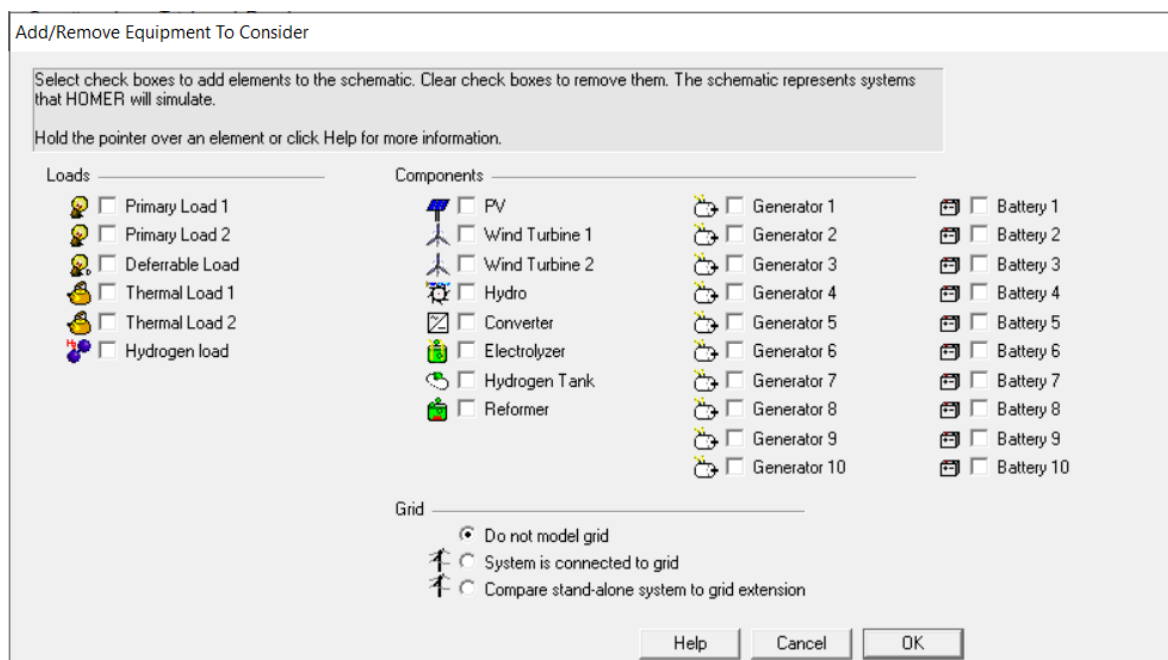


Fig. 10 Finestra de selecció d'equips de HOMER

Les dades de la càrrega elèctrica, poden introduir-se tant de forma horària (o el temps de mostreig definit), com de forma mitjana horària anual. A la segona opció, s'haurà de definir les variacions aleatòries que podrà patir la càrrega.

Finalment, s'introdueixen els recursos energètics renovables (irradiància solar, velocitat del vent, cabal hidràulic, etc.) i els no renovables (cost dels combustibles fòssils). També es poden introduir algunes limitacions de funcionament (com el màxim consum de combustible o la vida mínima dels dispositius), i limitacions econòmiques (com la taxa d'interès, per exemple).

Seguidament, amb tot el sistema definit, es realitzen les simulacions i es troben les combinacions que minimitzen el cost total del projecte. També s'ofereix l'opció de fer estudis de sensibilitat sobre les solucions trobades.

5.4. Obtenció de dades

Per a poder definir el sistema, cal obtenir les dades referents a la radiació solar, la freqüència dels episodis de caiguda de freqüència i finalment el preu al qual es podrà vendre l'energia. A continuació, es detalla l'origen i el tractament d'aquestes dades.

5.4.1. Solars

Les dades del recurs solar s'extreuen de PVWATTS, una base de dades del NREL (National Renewables Laboratory, EUA), que estima la producció elèctrica d'un sistema de producció fotovoltaica. Per generar aquestes dades, cal introduir certs paràmetres com la localització, l'angle azimutal i inclinació de les plaques, o algunes característiques pròpies dels mòduls fotovoltaics. També permet escollir el temps de mostreig necessari, que en aquest cas s'escollirà horari. Les dades ofertes són de la ciutat de Girona, les quals s'han considerat vàlides per al treball.

| Localització | |
|-----------------------|---------------|
| Estació meteorològica | (INTL) Girona |
| Latitud | 41,9° N |
| Longitud | 2,77° E |

| Especificacions del sistema PV | |
|--------------------------------|---------------------------|
| Potència CC | 50.000 kW (50MW) |
| Tipus de mòdul | Monocristal·lí |
| Inclinació dels panells | 40° sense <i>trackers</i> |
| Posició azimuthal | 180° |
| Pèrdues del sistema | 14,08% |
| Eficiència de l'inversor | 98% |
| Rendiment | |
| Factor de capacitat | 15,4% |

Taula 2 Dades de la planta fotovoltaica

PVWATTS ofereix tant les dades d'irradiància (kWh/m²) com les de potència generada pel sistema. Per aquesta raó, cal introduir les característiques de la planta solar (mostrades a la Taula 2). En aquest cas, es considera la inclinació dels panells de 40° (similar a la latitud), per aconseguir una producció d'energia màxima al llarg de l'any, i sense seguidors solars (*trackers*). La resta de paràmetres són els predeterminats. Finalment s'obtenen les dades de radiació solar desitjades (Fig. 11).

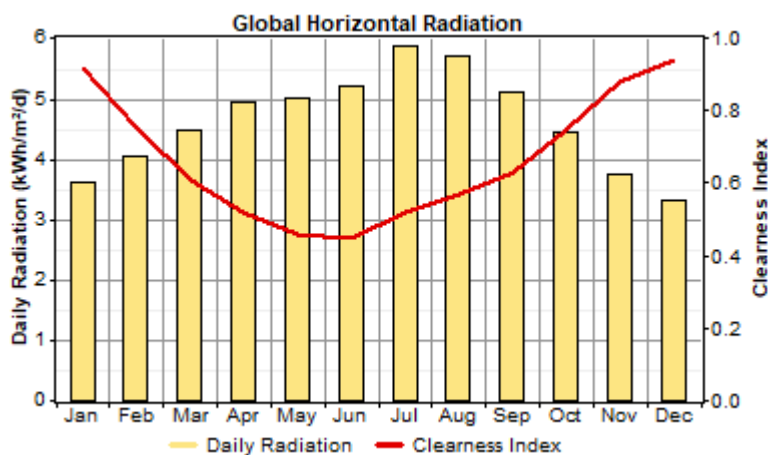


Fig. 11 Radiació solar mitjana mensual

5.4.2. Caiguda de freqüència

La naturalesa aleatòria de les caigudes de freqüència, fa difícil la seva predicció. Després de revisar les dades de la freqüència de la xarxa, podem assegurar que aquest desajust

succeeix molt pocs cops a l'any. Enguany, entre gener i abril només hi ha hagut una caiguda de freqüència en la qual ha estat necessari l'activació del MRPFL-U. Va ser el dia 8 de gener, quan una descompensació de la freqüència per una pujada a la regió sud-est del continent i una caiguda a la regió nord-oest va fer necessari, d'entre altres, l'actuació dels sistemes de MRPFL-U (Fig. 12). [15]

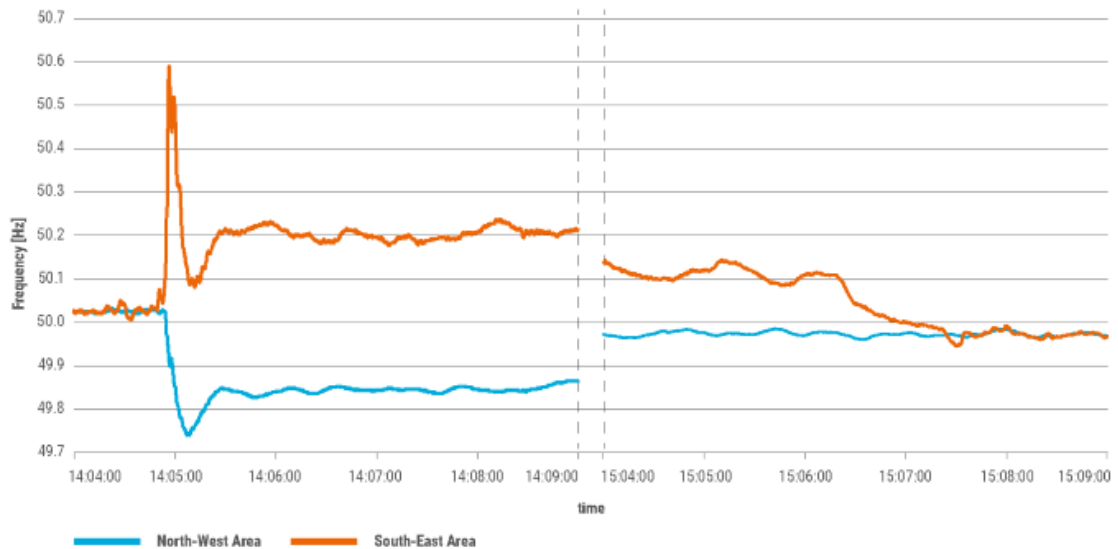


Fig. 12 Freqüència de la xarxa durant el desequilibri [15]

Per aquest motiu, es considera elaborar l'anàlisi (clarament desfavorable) de 12 caigudes de freqüència anualment (una per mes), incloent-hi l'hora amb més generació de l'any (cas més desfavorable). D'aquesta forma ens assegurem el dimensionament d'un sistema que pugui fer front als desajustos reals.

5.4.3. Preu de l'energia

Les dades del preu de l'energia al mercat diari, al qual suposem que vendrà tota l'energia aquesta planta, són públiques i les proporciona l'operador del mercat ibèric de l'energia (OMIE). HOMER permet introduir les dades de mercat de forma mitjana horària mensual, per la qual cosa es processen les dades per fer-les compatibles, tal com mostra la Taula 3, que s'ordena cromàticament per observar de forma fàcil les tendències dels preus.

| [€/MWh] | Gen | Feb | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Des |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 01:00 | 39,11 | 35,13 | 27,39 | 18,85 | 22,73 | 32,27 | 35,81 | 36,54 | 40,50 | 35,17 | 39,06 | 38,88 |
| 02:00 | 35,82 | 32,87 | 24,93 | 16,74 | 21,14 | 30,31 | 31,98 | 33,36 | 37,28 | 31,89 | 36,66 | 34,57 |
| 03:00 | 33,40 | 30,85 | 23,65 | 15,27 | 20,33 | 28,96 | 30,02 | 31,30 | 35,64 | 30,00 | 34,78 | 31,36 |
| 04:00 | 31,92 | 29,73 | 22,99 | 14,41 | 19,81 | 28,46 | 29,32 | 30,37 | 34,04 | 28,74 | 33,74 | 29,15 |
| 05:00 | 31,22 | 29,25 | 22,73 | 13,91 | 19,59 | 28,19 | 29,11 | 30,14 | 33,53 | 28,80 | 33,25 | 28,65 |
| 06:00 | 32,51 | 30,74 | 23,42 | 14,52 | 19,92 | 29,23 | 29,72 | 31,45 | 35,24 | 30,05 | 34,51 | 30,17 |
| 07:00 | 35,53 | 33,92 | 25,61 | 16,66 | 20,68 | 30,63 | 32,07 | 34,07 | 41,96 | 34,44 | 38,05 | 34,30 |
| 08:00 | 41,53 | 36,96 | 27,59 | 17,43 | 20,97 | 32,23 | 34,54 | 36,53 | 44,56 | 39,61 | 41,98 | 40,05 |
| 09:00 | 44,07 | 38,54 | 28,52 | 18,01 | 21,44 | 32,89 | 35,71 | 38,04 | 45,73 | 41,92 | 43,94 | 43,68 |
| 10:00 | 44,86 | 38,91 | 29,05 | 18,73 | 21,45 | 32,40 | 35,95 | 38,63 | 45,51 | 42,23 | 44,13 | 46,66 |
| 11:00 | 44,93 | 37,95 | 28,44 | 17,98 | 20,80 | 31,45 | 35,56 | 37,09 | 43,20 | 40,19 | 43,20 | 47,08 |
| 12:00 | 43,84 | 36,89 | 27,93 | 18,13 | 21,09 | 31,13 | 35,61 | 36,87 | 42,38 | 37,68 | 42,84 | 45,62 |
| 13:00 | 42,80 | 35,69 | 27,92 | 18,48 | 21,31 | 31,23 | 36,50 | 37,58 | 42,96 | 36,51 | 42,95 | 44,46 |
| 14:00 | 41,84 | 35,00 | 27,85 | 18,46 | 21,66 | 31,02 | 36,96 | 36,98 | 42,68 | 35,24 | 42,54 | 43,96 |
| 15:00 | 40,38 | 33,66 | 26,65 | 17,78 | 21,18 | 29,51 | 36,19 | 35,99 | 41,22 | 32,70 | 42,36 | 42,48 |
| 16:00 | 39,89 | 32,48 | 25,62 | 15,65 | 18,89 | 27,03 | 34,33 | 34,00 | 40,02 | 31,66 | 42,06 | 41,46 |
| 17:00 | 41,09 | 33,11 | 25,52 | 13,97 | 18,08 | 26,37 | 33,62 | 33,52 | 40,06 | 32,73 | 43,31 | 43,24 |
| 18:00 | 44,41 | 35,77 | 26,67 | 14,37 | 18,48 | 27,45 | 34,11 | 34,91 | 41,33 | 35,51 | 46,44 | 47,48 |
| 19:00 | 47,43 | 38,80 | 28,59 | 17,04 | 19,95 | 29,17 | 35,25 | 36,86 | 43,05 | 38,98 | 50,37 | 51,54 |
| 20:00 | 49,10 | 42,74 | 33,58 | 19,08 | 21,85 | 30,78 | 37,04 | 39,11 | 47,06 | 44,34 | 50,11 | 52,31 |
| 21:00 | 48,95 | 43,63 | 35,69 | 21,45 | 23,39 | 32,55 | 37,62 | 41,73 | 51,02 | 47,48 | 49,14 | 51,85 |
| 22:00 | 47,61 | 42,55 | 34,03 | 23,87 | 25,90 | 34,29 | 38,70 | 43,43 | 50,47 | 44,09 | 46,44 | 49,22 |
| 23:00 | 44,12 | 39,22 | 31,70 | 22,28 | 25,87 | 34,95 | 39,42 | 41,96 | 46,08 | 40,54 | 43,67 | 46,60 |
| 24:00 | 40,06 | 36,46 | 29,73 | 20,60 | 23,61 | 32,33 | 36,12 | 38,30 | 41,45 | 37,41 | 40,94 | 42,41 |

Taula 3 Preus de l'energia al mercat diari (OMIE)

5.5. Definició del sistema i selecció de tecnologies

A continuació, es defineix el sistema, el qual incorpora els elements típics d'una planta fotovoltaica: els mòduls, l'inversor, les bateries, les càrregues del sistema i la xarxa.

HOMER ens ofereix una senzilla modelització dels elements de la planta solar, connectats cadascun d'ells a corrent continu, altern o ambdós. Tal com mostra la imatge posterior (Fig. 13), les bateries i les plaques solars sempre se situen en el bus de corrent continu, l'inversor serà l'encarregat de transformar aquest a corrent altern i posteriorment podrà ser comercialitzat a la xarxa o consumit per la càrrega en altern.

Per modelitzar les injeccions de potència en moments de caiguda de freqüència, es defineix com una càrrega de consum propi, ja que com s'ha mencionat anteriorment, en cap cas aquest servei serà remunerat.

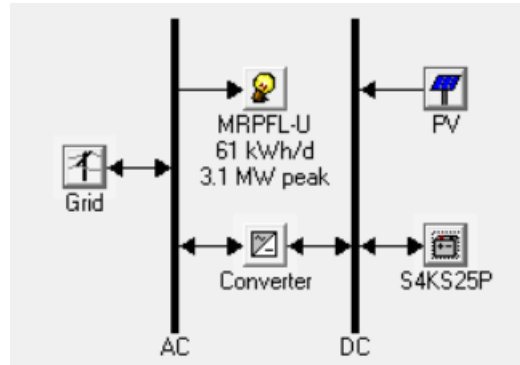


Fig. 13 Esquema de la planta a HOMER

Cada dispositiu es defineix amb les seves dades característiques per tal de modelitzar el seu funcionament.

5.6. Definició de paràmetres

A continuació es detallen els aspectes tècnics de cada component. Com l'objectiu d'aquest estudi és determinar la capacitat de les bateries necessàries i comparar-lo amb l'alternativa de reserva de potència, s'estudiarà tant les plaques fotovoltaïques com l'inversor a cost zero i la dimensió d'ambdós de 50 MW.

5.6.1. Plaques solars

Les plaques solars escollides són de silici monocristal·lí amb vidre senzill. L'eficiència suposada és del 15% i la variació de potència amb la temperatura, de $-0,47\%/^{\circ}\text{C}$ (referenciat en les condicions estàndards de 1000 W/m^2 i 25°C). Es dimensiona una potència pic total del camp fotovoltaic de 50.000 kW , amb una vida útil de 20 anys. La inclinació es suposa de 40° (sense seguidors solars), i l'angle azimutal 180° (totalment cap al sud). Es manté el valor d'albedo (l'energia solar que reflecteix el terra) predeterminat del 20%. Com ja s'ha mencionat, tant el cost de les plaques com el d'operació i manteniment es consideren zero per a la simulació.

5.6.2. Inversor

Per definir l'inversor, s'ha utilitzat com a referència l'inversor Sunny Central Up de la marca SMA, dissenyat per a centrals fotovoltaïques de gran escala com la d'aquest estudi. S'ha dimensionat amb una potència nominal en continua de 50 MW, amb un rendiment del 98% i una vida útil de 25 anys. Els costos d'aquest inversor també s'han considerat nuls. Sabent que la injecció màxima que s'arribarà a realitzar



Fig. 14 Inversor per a plantes fotovoltaïques [SMA]

amb el sistema de bateries, mai superarà la potència màxima de la planta, es considera que els inversors seran capaços d'assumir l'electricitat provinent del banc de bateries, sense necessitat d'incloure'n més.

5.6.3. Xarxa elèctrica

Es defineix la connexió a la xarxa elèctrica definint els preus de venda d'energia, mencionats anteriorment. Es considerarà la hipòtesi per la realització de la simulació, que la planta no consumirà electricitat de la xarxa. La comercialització de l'energia es farà de forma exclusiva al mercat diari.

Tal com es menciona al punt 5.3, es decideix discretitzar els preus de l'energia, obtinguts de l'OMIE, definint 11 tarifes diferents (Fig. 15), que seran representatives de les tendències mensuals.

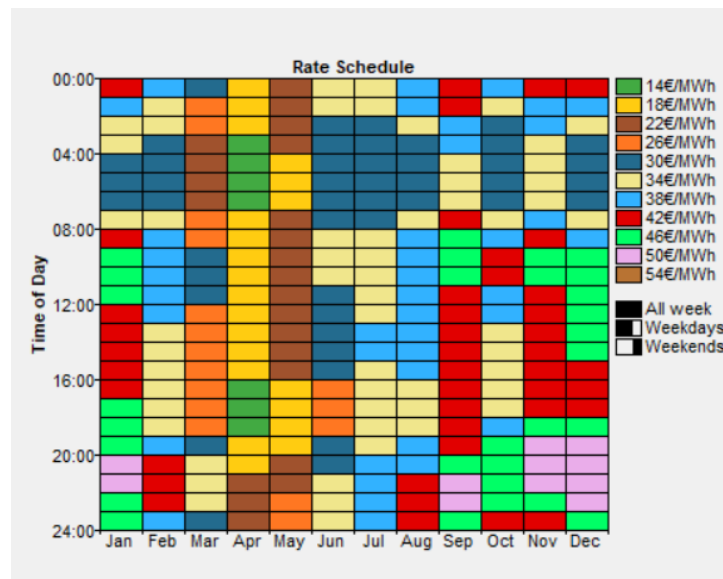


Fig. 15 Discretització dels preus de l'energia a HOMER

5.6.4. Bateries

Les bateries escollides per aquest estudi són les de ió de liti. Aquestes són les que actualment es fan servir a plantes de generació renovable pels avantatges que ofereixen respecte a les bateries d'àcid de plom.

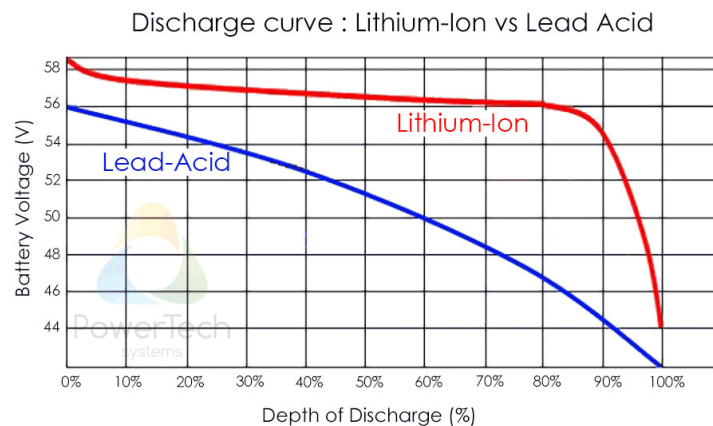


Fig. 16 Voltatge de la bateria vs. Descàrrega (Íó-Liti vs. Àcid-Plom) [Power Tech Systems]

Les característiques tècniques d'aquesta es prenen de la biblioteca del programa HOMER Grid, una altra versió del programa utilitzat per aquest estudi (Fig. 17).

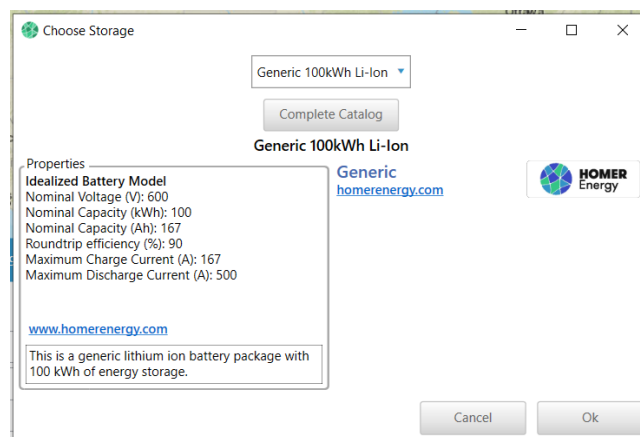


Fig. 17 Descripció de la bateria Ió-Li genèrica de 100kWh (HOMER Grid)

Es defineixen bateries amb una capacitat nominal de 100 kWh (o 167Ah) amb un voltatge nominal de 600 V i un corrent màxim de descàrrega de 500A, o el que és el mateix, una potència màxima de 300 kW. L'eficiència de càrrega i descàrrega es considera del 90% (round trip efficiency) i la vida útil de 154.000 kWh (calculat pel programa).

Pel que fa al cost, s'estima que el cost de les cèl·lules de la bateria es troba al voltant dels 100 €/kWh [7]. A aquest, se li ha de sumar el cost dels armaris, el dels sistemes de refrigeració, els EMS (Energy management System) i BMS (battery management System), els costos de transport i els d'instal·lació i el de la seva posterior retirada un cop vençuda la seva vida útil. El pes d'aquestes partides, acostuma a ser el doble del cost de les cèl·lules, per la qual cosa s'estimarà un cost inicial total de 200 €/kWh. Finalment, el cost d'operació i manteniment s'ha fixat en 7,5 € per kWh i any [16].

A continuació es mostra la corba de capacitat, que en models comercials acostuma a oferir el fabricant:

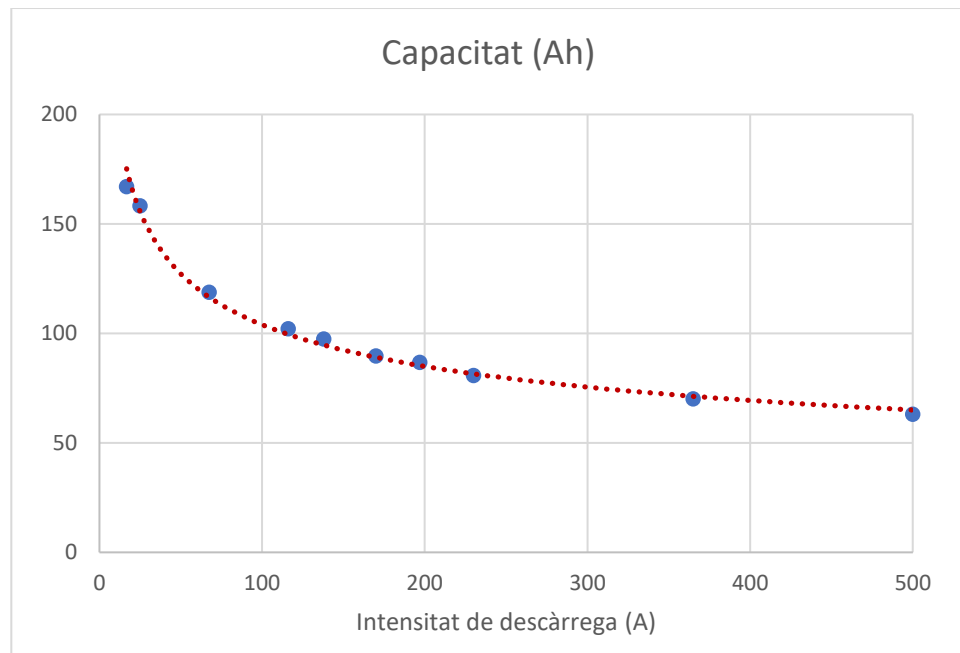


Fig. 18 Corba de Capacitat vs. Intensitat

Tal com mostra la Fig. 16, en treballar en un rang de descàrrega sempre inferior al 80%, podem assumir que el voltatge de la bateria es manté constant durant tota l'operació. Per la qual cosa, la corba de la capacitat (en kWh) respecte a la potència és la següent:

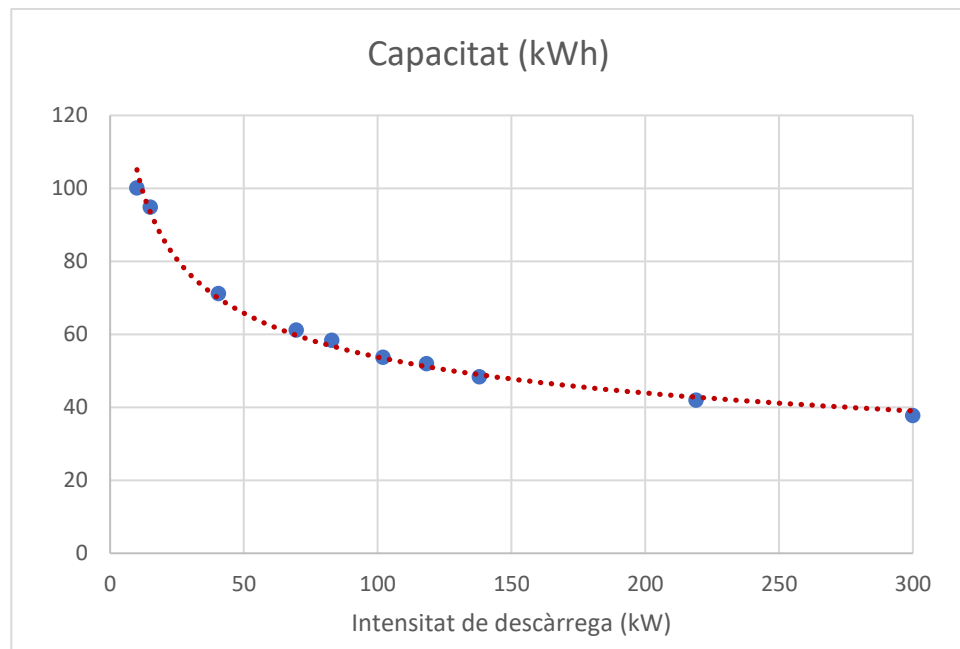


Fig. 19 Corba de Capacitat vs. Potència de descàrrega

Tal com ja s'ha mencionat, les bateries hauran d'aportar durant 15 min una càrrega que podrà ser de fins al 50% de la potència que s'estava subministrant en el moment d'activació, sempre que la potència total no superi la potència màxima de la planta.

$$E_{injected} = P_{PV} \cdot 50\% \cdot 15min \cdot 1h/60min \quad (Eq. 4)$$

El càlcul més desfavorable, es trobarà en la situació en la qual la potència de la planta sigui 2/3 la potència màxima. En aquest cas, l'energia que caldrà injectar amb les bateries serà de 16.667 kWh, o cosa que és equivalent, una potència mitjana de 16.667 kW durant una hora. Com aquesta energia s'haurà d'injectar en només 15 minuts, es necessitaria una capacitat de:

$$E_{injected} = 16.667 \text{ kW} \cdot \frac{15min}{60min} \cdot 1h = 4.167 \text{ kWh} \quad (Eq. 5)$$

La capacitat doncs, haurà de ser com a mínim de 4.167 kWh. Tot i això, les descàrreges profundes de les bateries, fan disminuir la vida útil dràsticament (Fig. 20). Per aquesta raó, dimensionarem la bateria per a arribar a una descàrrega màxima del 80% (DOD), sent finalment la capacitat necessària:

$$E_{bateria} = 4.167 \frac{kWh}{0,8} = 5208,3 \text{ kWh} \quad (Eq. 6)$$

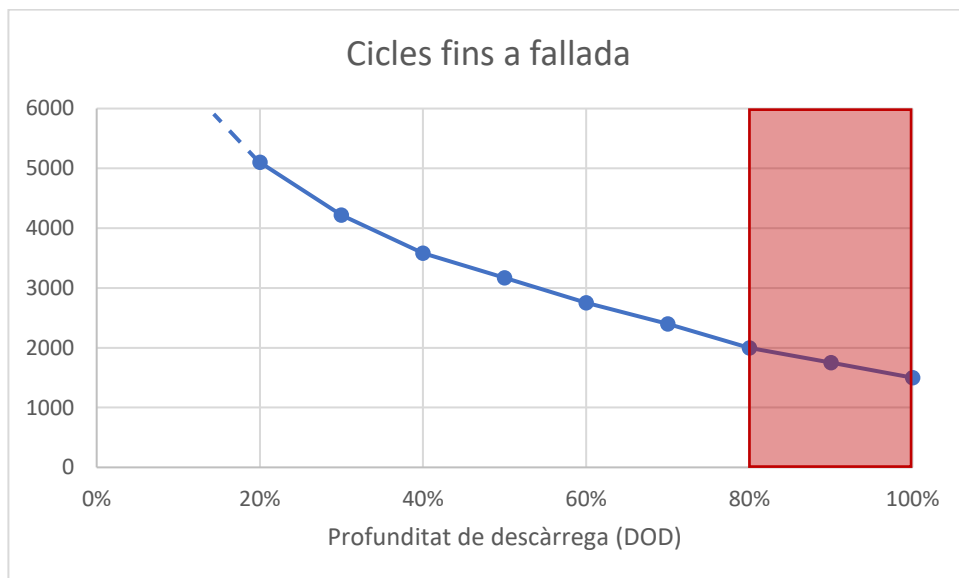


Fig. 20 Cicles fins a fallada vs. Profunditat de descàrrega

5.6.5. Càrrega (MRPFL-U)

Com ja s'ha mencionat anteriorment, se suposa que es produeix un episodi de caiguda de potència mensualment, a l'hora de màxima producció energètica, i que haurà d'aportar durant 15 min una càrrega constant. Per poder-ho fer i que el programa no utilitzi l'energia generada per subministrar aquesta càrrega, es desplaça la càrrega unes determinades hores depenent del cas, quan ja és de nit i la planta no produeix electricitat, per forçar que aquesta energia provingui de les bateries. Les simulacions es realitzaran per al valor d'injecció màxima descrit abans, 50% de la potència en el moment inicial. En ser aquest un servei d'obligat compliment, el *shortage* (els moments en què no es pot arribar a subministrar la càrrega completament) es considerarà que ha de ser zero.

Primerament es realitza l'estudi amb un temps de mostreig d'una hora, interval al qual s'acostumen a realitzar els estudis de simulació d'aquesta naturalesa. En fixar una potència per una hora, és indiferent fixar energia o potència perquè el programa ho considerarà de la mateixa manera, per la qual cosa es tracten les dades per a realitzar diferents simulacions per fixar en cada cas o bé la potència o bé la capacitat que la bateria pot subministrar.

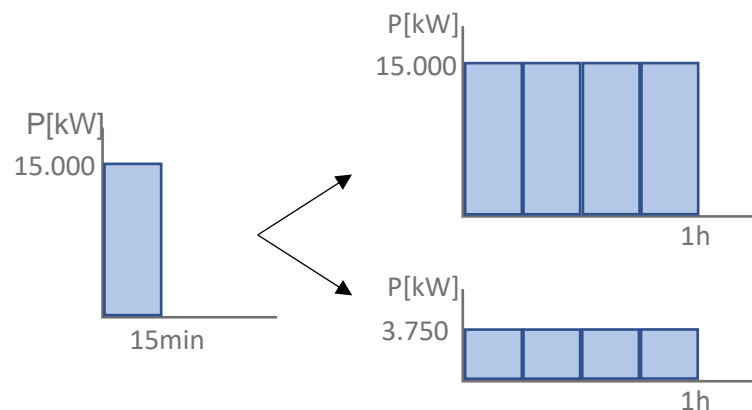


Fig. 21 Modelització de la injecció de potència

A més, HOMER simula aquestes càrregues unint els punts establerts, situats a meitat de l'hora de consum, resultant en aquest cas resulta en un perfil triangular amb màxim a meitat de l'hora establerta.

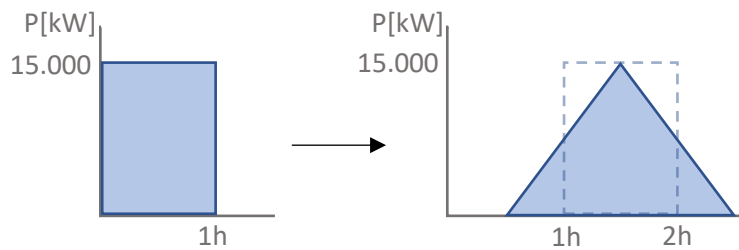


Fig. 22 Modelització del perfil de la potència

Es decideix realitzar diferents simulacions per trobar la millor forma de modelitzar aquesta càrrega.

5.7. Simulació horària

Comencem les simulacions amb l'increment de potència màxim que haurà de poder subministrar la planta (50%). Per aquest valor, es realitzaran diferents simulacions per poder discutir posteriorment com definir el perfil de la càrrega per aquest cas.

5.7.1. SIMULACIÓ 1

La primera simulació es realitza definit la càrrega com una injecció de la potència requerida (16.667 kW en el cas més desfavorable) durant una hora per analitzar l'entrega de potència (Fig. 23).

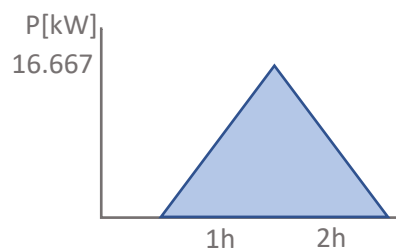


Fig. 23 Perfil de la potència injectada

En el gràfic següent (Fig. 24), s'observa el moment de la injecció de potència, la qual com ja s'ha mencionat ha estat desplaçada 6 hores per forçar el consum de l'electricitat de la bateria.

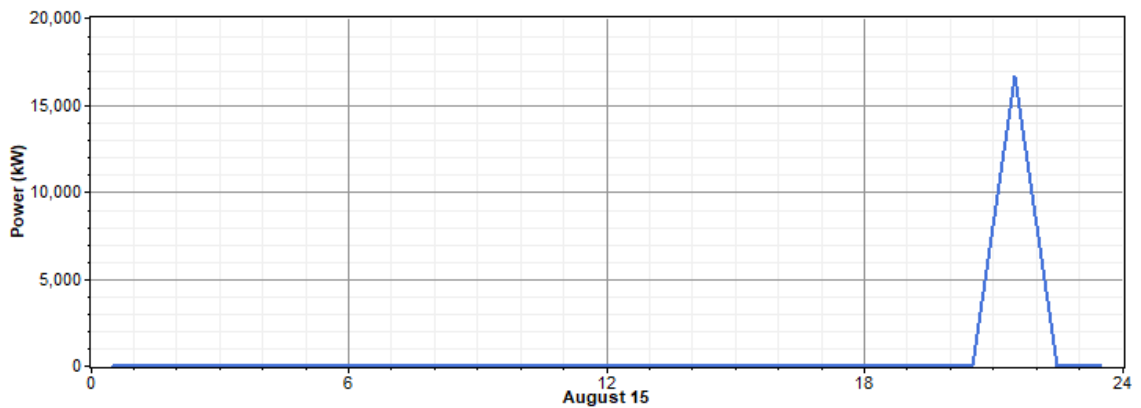


Fig. 24 Potència injectada a HOMER

Tal com mostra la gràfica de la injecció de potència, i mencionat anteriorment, HOMER modelitza la càrrega com una rampa ascendent-descendent amb una duració total de 2h. Per la qual cosa, l'àrea d'aquesta (l'energia), és precisament $P * 2h/2 = P * 1h$ [kWh].

| | PV (kW) | 100LI | Conv. (kW) | Disp. Strgy | Grid (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. |
|--|---------|-------|------------|-------------|-----------|-----------------|------------------------|----------------|--------------|------------|
| | 500... | 279 | 50... | CC | 0 | \$ 2,790,000 | -2,782,028 | \$ -32,773,654 | -14.3... | 1.00 |

Fig. 25 Resultat de HOMER

Per aquest cas, HOMER exposa la necessitat d'incorporar 279 bateries, les quals es descarregaran per sota del 40%. La vida útil serà màxima (15 anys).

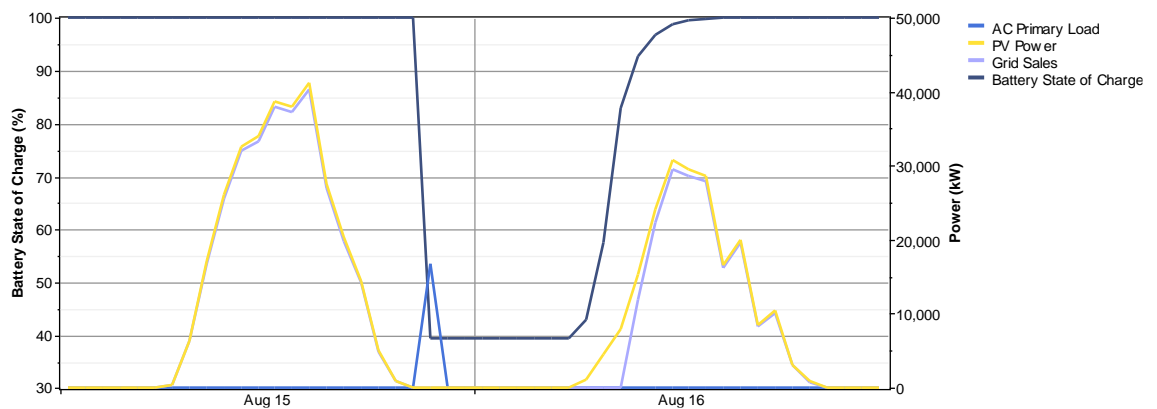


Fig. 26 Potència injectada vs. Càrrega de les bateries

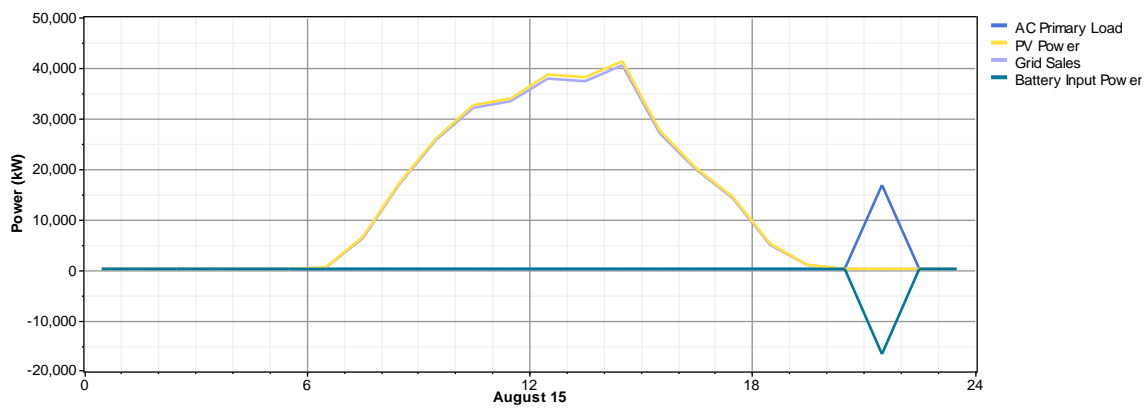


Fig. 27 Potència subministrada per la planta

| Càrrega | Valor | Unitats |
|--------------------------|------------|---------|
| MRPFL-U | 178.387 | kWh/any |
| Xarxa | 86.185.536 | kWh/any |
| Total | 86.363.920 | kWh/any |
| Bateries | Valor | Unitats |
| Nº Bateries | 279 | |
| Voltatge del bus | 600 | V |
| Capacitat nominal | 27.956 | kWh |
| Capacitat nominal usable | 22.365 | kWh |
| Vida útil | 43.033.100 | kWh |
| | 15 | anys |
| Energia in | 202.254 | kWh/any |
| Energia out | 182.028 | kWh/any |
| Pèrdues | 20.226 | kWh/any |

Taula 4 Valors de la simulació

5.7.2. SIMULACIÓ 2

La segona simulació es realitza dimensionant la càrrega com una injecció d'un quart de la potència instantània durant una hora, per estudiar el nombre de bateries mínim per cobrir

les demandes de capacitat. D'aquesta forma, s'aconseguirà la capacitat requerida realment, però subministrada en una hora.

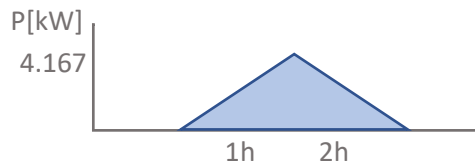


Fig. 28 Perfil de la potència injectada

En el gràfic següent, s'observa el moment de la injecció de potència, també desplaçat 6 hores per forçar el consum de l'electricitat de la bateria.

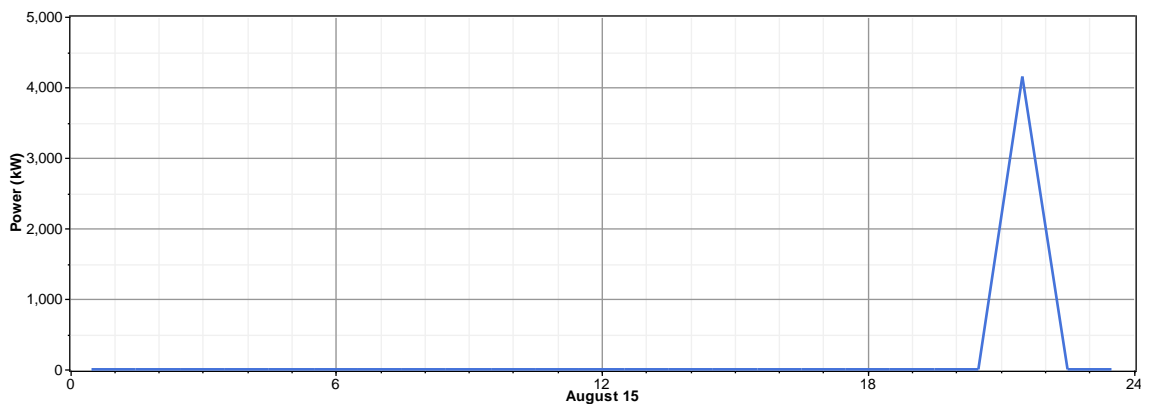


Fig. 29 Potència injectada a HOMER

| | PV (kW) | 100LI | Conv. (kW) | Disp. Strgy | Grid (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. |
|--|---------|-------|------------|-------------|-----------|-----------------|------------------------|----------------|--------------|------------|
| | 500... | 70 | 50... | CC | 0 | \$ 700,000 | -2,999,661 | \$ -37,645,740 | -66.1... | 1.00 |

Fig. 30 Resultat de HOMER

En aquest cas, el nombre de bateries requerides serà de 70, que es descarregaran també fins al 40%. La vida útil d'aquestes també serà de 15 anys.

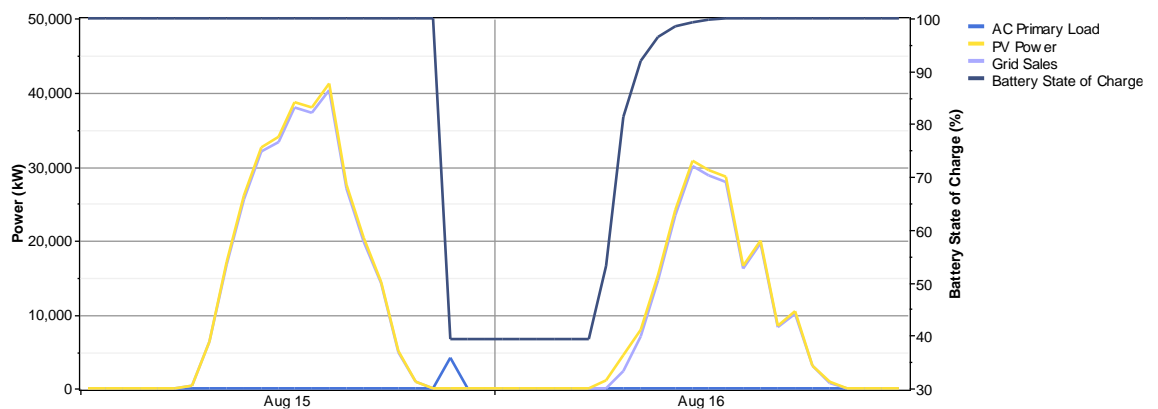


Fig. 31 Potència injectada vs. Càrrega de les bateries

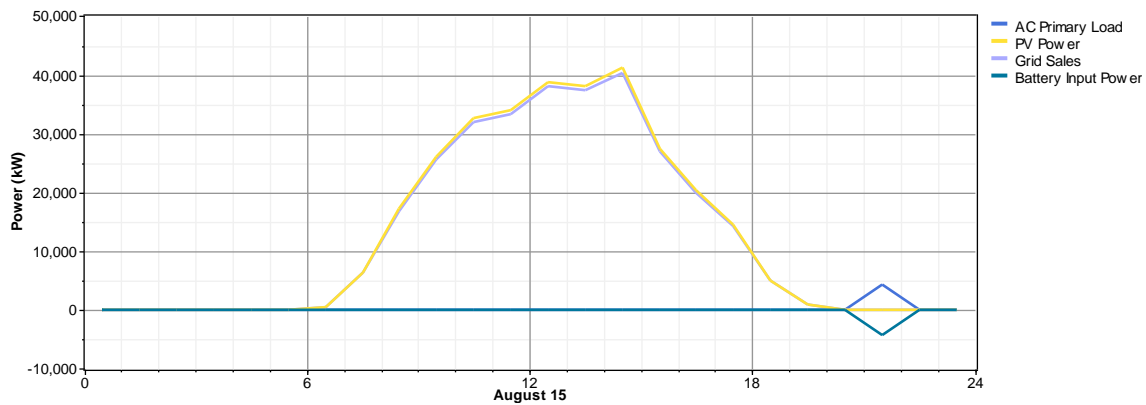


Fig. 32 Potència subministrada per la planta

| Càrrega | Valor | Unitats |
|--------------------------|------------|---------|
| MRPFL-U | 44.530 | kWh/any |
| Xarxa | 86.334.264 | kWh/any |
| Total | 86.378.792 | kWh/any |
| Bateries | Valor | Unitats |
| Nº Bateries | 70 | |
| Voltatge del bus | 600 | V |
| Capacitat nominal | 7.014 | kWh |
| Capacitat nominal usable | 5.611 | kWh |
| Vida útil | 10.796.835 | kWh |
| | 15 | anys |
| Energia in | 50.488 | kWh/any |
| Energia out | 45.439 | kWh/any |
| Pèrdues | 5.049 | kWh/any |

Taula 5 Valors de la simulació

5.7.3. SIMULACIÓ 3

Finalment, l'última simulació la realitzem definint la injecció de potència requerida durant una hora, i durant l'hora posterior, una injecció la meitat de gran, amb l'objectiu de mantenir

una potència mitjana més propera a 16.667 kW, sense augmentar massa les necessitats de capacitat.

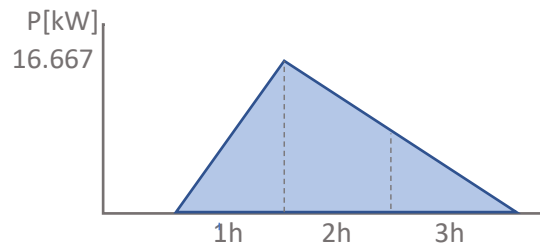


Fig. 33 Perfil de la potència injectada

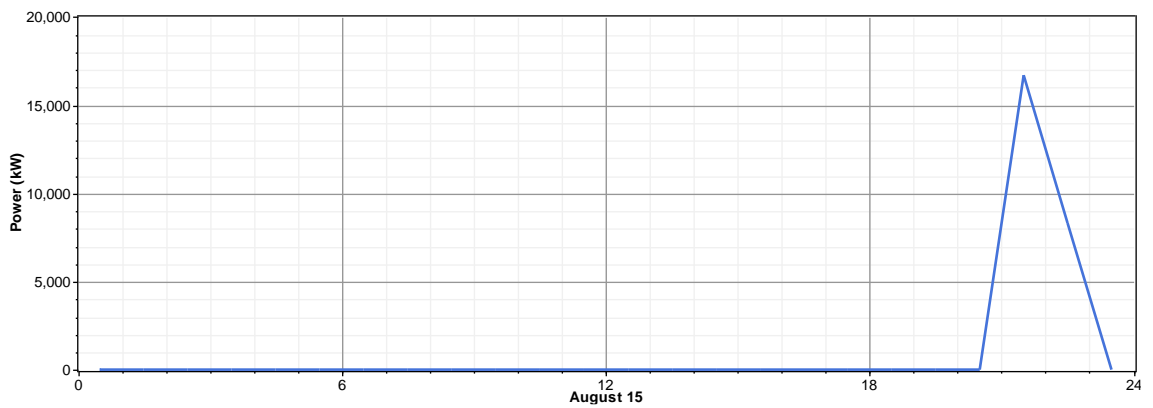


Fig. 34 Potència injectada a HOMER

| | PV (kW) | 100LI | Conv. (kW) | Disp. Strgy | Grid (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. |
|--|---------|-------|------------|-------------|-----------|-----------------|------------------------|----------------|--------------|------------|
| | 500... | 317 | 50... | CC | 0 | \$ 3,170,000 | -2,739,773 | \$ -31,853,498 | -9.308 | 1.00 |

Fig. 35 Resultat de HOMER

En aquesta última simulació el resultat obtingut és de 317 bateries, les quals arribaran al nivell de càrrega mínim del 20%. Tot i això, la vida útil d'aquest sistema també serà en aquest cas de 15 anys.

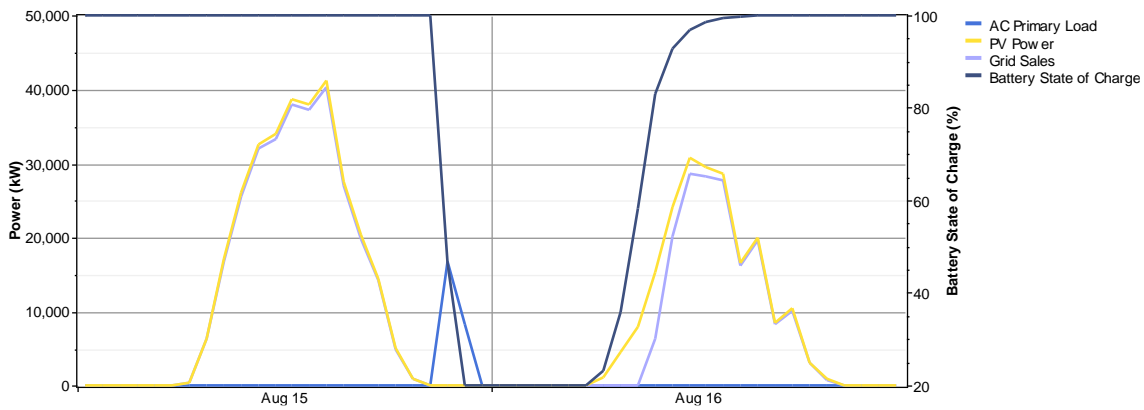


Fig. 36 Potència injectada vs. Càrrega de les bateries

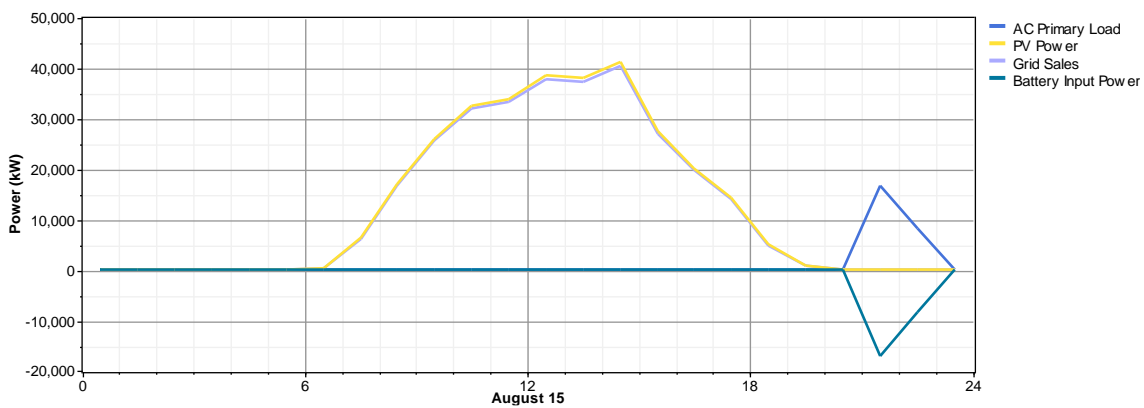


Fig. 37 Potència subministrada per la planta

| Càrrega | Valor | Unitats |
|--------------------------|------------|---------|
| MRPFL-U | 267.694 | kWh/any |
| Xarxa | 86.086.304 | kWh/any |
| Total | 86.354.000 | kWh/any |
| Bateries | Valor | Unitats |
| Nº Bateries | 317 | |
| Voltatge del bus | 600 | V |
| Capacitat nominal | 31.763 | kWh |
| Capacitat nominal usable | 25.411 | kWh |
| Vida útil | 48.894.240 | kWh |
| | 15 | anys |

| | | |
|-------------|---------|---------|
| Energia in | 303.508 | kWh/any |
| Energia out | 273.157 | kWh/any |
| Pèrdues | 30.351 | kWh/any |

Taula 6 Valors de la simulació

5.7.4. Anàlisi dels resultats

Un cop realitzades les simulacions, comparem les solucions obtingudes amb els requeriments inicials que ha de complir el sistema.

| | | Simulació 1 | Simulació 2 | Simulació 3 |
|--------------------|---------|-------------|-------------|-------------|
| Nº Bateria | - | 279 | 70 | 317 |
| MRPFL-U | kWh/any | 178.387 | 44.530 | 267.694 |
| Cap. Nom. | kWh | 27.956 | 7.014 | 31.763 |
| Cap. Usable | kWh | 22.365 | 5.611 | 25.411 |
| Vida útil | kWh | 43.033.100 | 10.796.835 | 48.894.240 |
| | anys | 15 | 15 | 15 |
| Energia in | kWh/any | 202.254 | 50.488 | 303.508 |
| Energia out | kWh/any | 182.028 | 45.439 | 273.157 |
| Pèrdues | kWh/any | 20.226 | 5.049 | 30.351 |

Taula 7 Comparativa dels valors de les simulacions

Com es pot observar a la Taula 7, la simulació amb un requeriment de bateries més gran és la tercera, la qual necessita una capacitat d'emmagatzematge molt superior als anteriors. Pel que fa a la vida útil, tots tindran una vida útil màxima, i fins i tot en el cas de la simulació 3, en la que es produeixen descàrregues profundes, la vida no es veu escurçada.

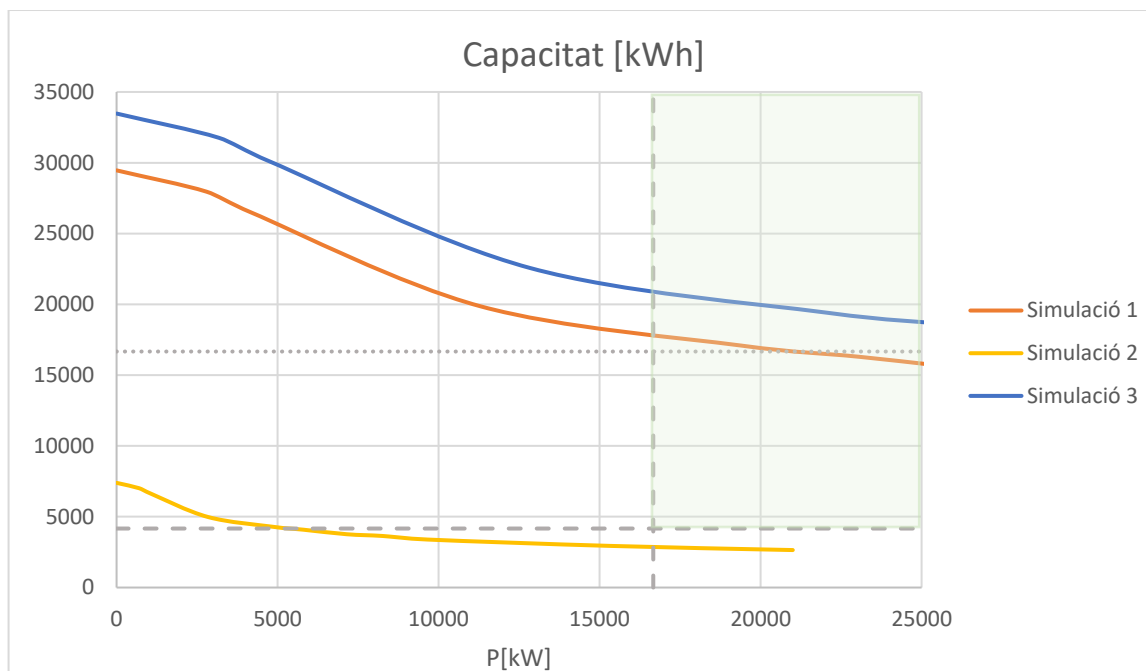


Fig. 38 Corbes de Capacitat vs. Potència de les solucions trobades

A la Fig. 38 es mostren les corbes de capacitat vs. potència dels sistemes descrits anteriorment. Les línies discontinües marquen els requeriments imposats per la normativa: una capacitat de 4.166 kWh i una potència de 16.667 kW. La línia de punts, mostra la potència fixada en forma de capacitat (a la simulació de HOMER) a l'haver de mantenir-la durant una hora. Finalment, el quadre verd marca la regió de solucions factibles.

Com podem observar, totes les configuracions trobades són capaces de subministrar la capacitat requerida. En canvi, per la magnitud de la potència que es necessita subministrar en un lapse molt petit de temps, la simulació 2 no aconsegueix oferir una solució que pugui complir amb les necessitats.

Les simulacions 1 i 3 estan clarament sobredimensionades. Per tant no podem donar aquestes simulacions per bones. Per aquesta raó, es repetiran les simulacions, aquest cop fixant el període de mostreig de 15 minuts, per tal d'ajustar d'una forma més precisa la càrrega.

5.8. Simulació quinze-minutal

En aquesta segona part de les simulacions, es repeteix l'estudi realitzat anteriorment, aquest cop amb un període de mostreig de 15 minuts. De la mateixa forma, es proposen

diferents perfils de càrrega per poder arribar a definir d'una forma més precisa el comportament requerit pel sistema.

5.8.1. SIMULACIÓ 1

La primera simulació es realitza definint la càrrega com la injecció necessària durant quinze minuts, per analitzar l'entrega de potència. En aquest cas, la potència màxima és de 16.667 kW (Fig. 39).

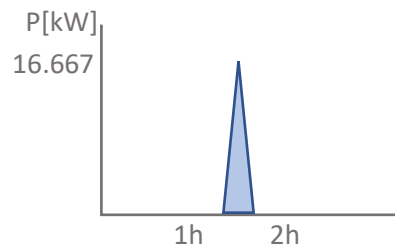


Fig. 39 Perfil de la potència injectada

En el gràfic següent, s'observa el moment de la injecció de potència, la qual com ja s'ha mencionat ha estat desplaçada 6 hores per forçar el consum de l'electricitat de la bateria.

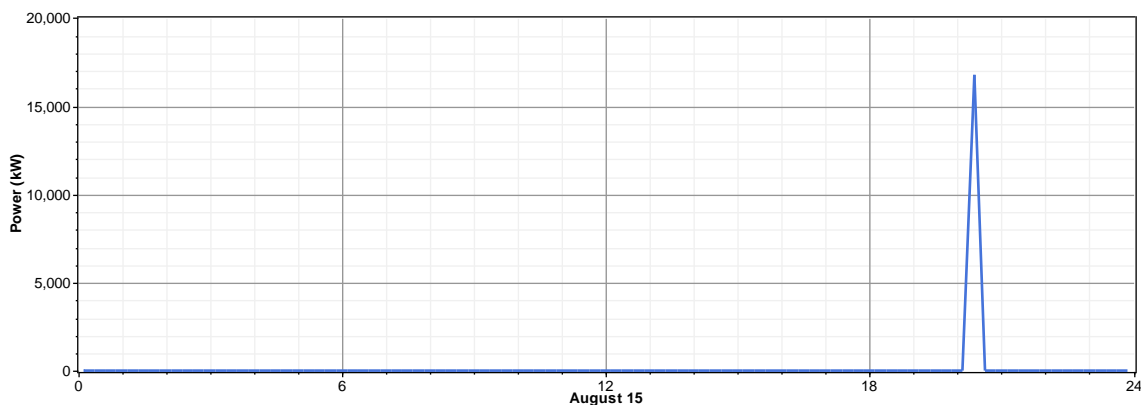


Fig. 40 Potència injectada a HOMER

| | PV (kW) | 100LI | Conv. (kW) | Disp. Strgy | Grid (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. |
|--|---------|-------|------------|-------------|-----------|-----------------|------------------------|----------------|--------------|------------|
| | 500... | 102 | 50... | CC | 0 | \$ 2,040,000 | -2,877,698 | \$ -34,746,640 | -60.0... | 1.00 |

Fig. 41 Resultat de HOMER

Per aquest cas, HOMER exposa la necessitat d'incorporar 102 bateries, les quals mantindran sempre el seu nivell de càrrega per sobre del 58%. La vida útil de les bateries, tal com ha succeït anteriorment, és màxima (15 anys).

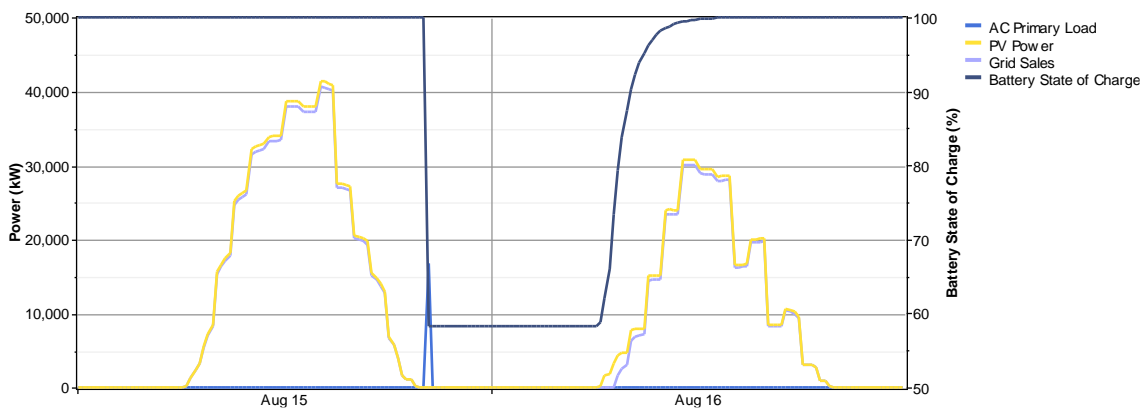


Fig. 42 Potència injectada vs. Càrrega de les bateries

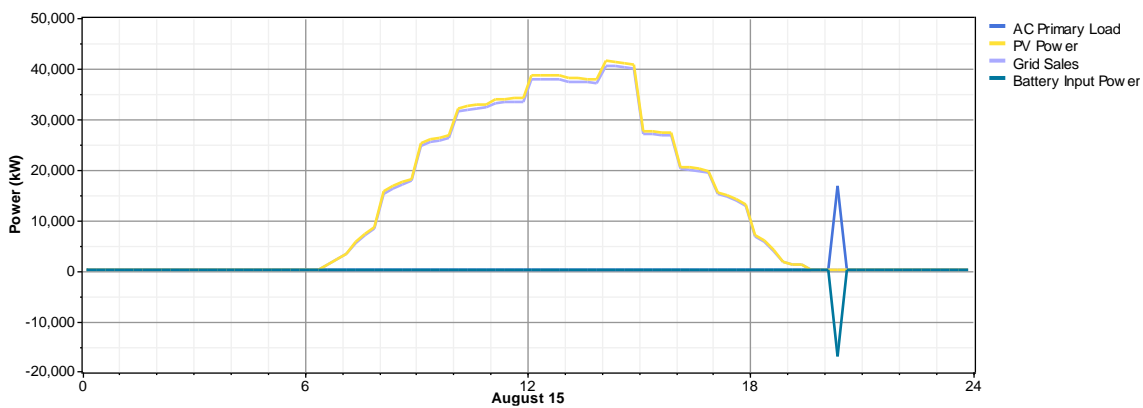


Fig. 43 Potència subministrada per la planta

| Càrrega | Valor | Unitats |
|--------------------------|------------|---------|
| MRPFL-U | 45.260 | kWh/any |
| Xarxa | 84.727.544 | kWh/any |
| Total | 84.772.800 | kWh/any |
| Bateries | Valor | Unitats |
| Nº Bateries | 102 | |
| Voltatge del bus | 600 | V |
| Capacitat nominal | 10.220 | kWh |
| Capacitat nominal usable | 8.176 | kWh |
| Vida útil | 15.732.531 | kWh |

| | | |
|-------------|--------|---------|
| | 15 | anys |
| Energia in | 51.316 | kWh/any |
| Energia out | 46.184 | kWh/any |
| Pèrdues | 5.132 | kWh/any |

Taula 8 Valors de la simulació

5.8.2. SIMULACIÓ 2

A la segona simulació, es defineix una càrrega el doble de la requerida, per tal d'obtenir una potència mitjana del període igual a la potència requerida.

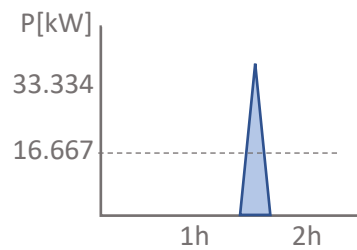


Fig. 44 Perfil de la potència injectada

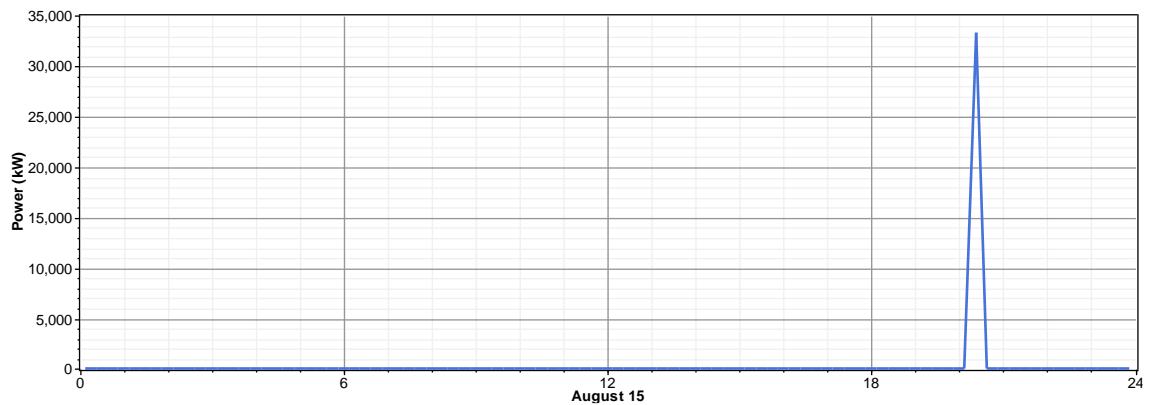


Fig. 45 Potència injectada a HOMER

La solució en aquest cas és de 203 bateries, i la vida útil d'aquestes de 15 anys. El nivell de càrrega sempre se situarà per sobre del 67%, assegurant així la salut de la bateria.

| | PV (kW) | 100LI | Conv. (kW) | Disp. Strgy | Grid (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. |
|--|---------|-------|------------|-------------|-----------|-----------------|------------------------|----------------|--------------|------------|
| | 500... | 203 | 50... | CC | 0 | \$ 4,060,000 | -2,746,494 | \$ -31,049,406 | -26.9... | 1.00 |

Fig. 46 Resultat de HOMER

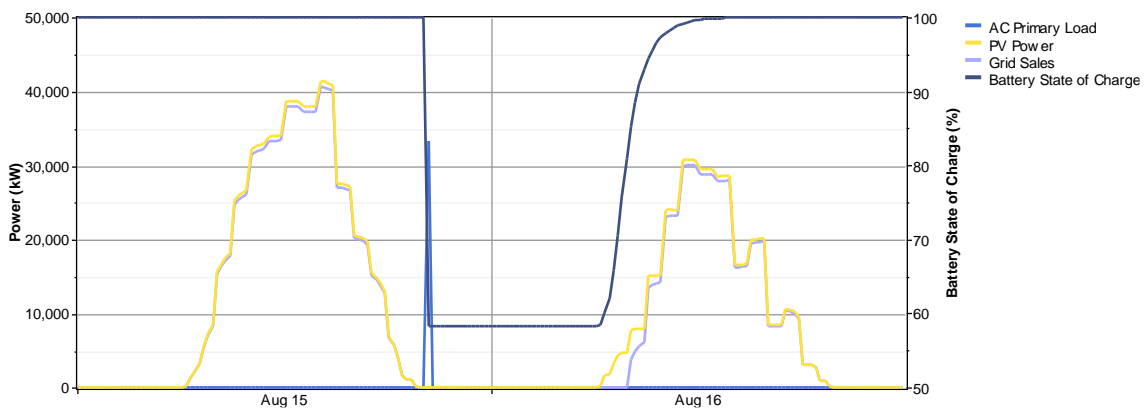


Fig. 47 Potència injectada vs. Càrrega de les bateries

| Càrrega | Valor | Unitats |
|--------------------------|------------|---------|
| MRPFL-U | 90.155 | kWh/any |
| Xarxa | 84.677.664 | kWh/any |
| Total | 84.767.816 | kWh/any |
| Bateries | Valor | Unitats |
| Nº Bateries | 203 | |
| Voltatge del bus | 600 | V |
| Capacitat nominal | 20.341 | kWh |
| Capacitat nominal usable | 16.272 | kWh |
| Vida útil | 31.310.822 | kWh |
| | 15 | anys |
| Energia in | 102.216 | kWh/any |
| Energia out | 91.995 | kWh/any |
| Pèrdues | 10.222 | kWh/any |

Taula 9 Valors de la simulació

5.8.3. SIMULACIÓ 3

A la tercera simulació, es defineix la injecció de la potència requerida durant 30 min, per forçar que la potència sigui igual a l'establerta durant 15 minuts seguits.

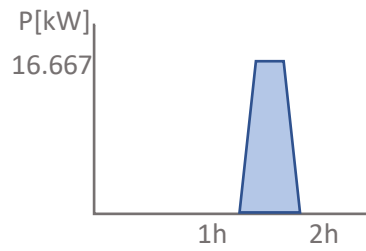


Fig. 48 Perfil de la potència injectada

La solució d'aquesta simulació (Fig. 49), mostra que són necessàries 173 bateries per cobrir aquesta demanda. Aquestes, mantindran el seu nivell de càrrega per sobre del 51%, tenint una vida útil de 15 anys.

| | PV (kW) | 100LI | Conv. (kW) | Disp. Strgy | Grid (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. |
|--|---------|-------|------------|-------------|-----------|-----------------|------------------------|----------------|--------------|------------|
| | 500... | 173 | 50... | CC | 0 | \$ 3,460,000 | -2,784,934 | \$ -32,140,800 | -27.8... | 1.00 |

Fig. 49 Resultat de HOMER

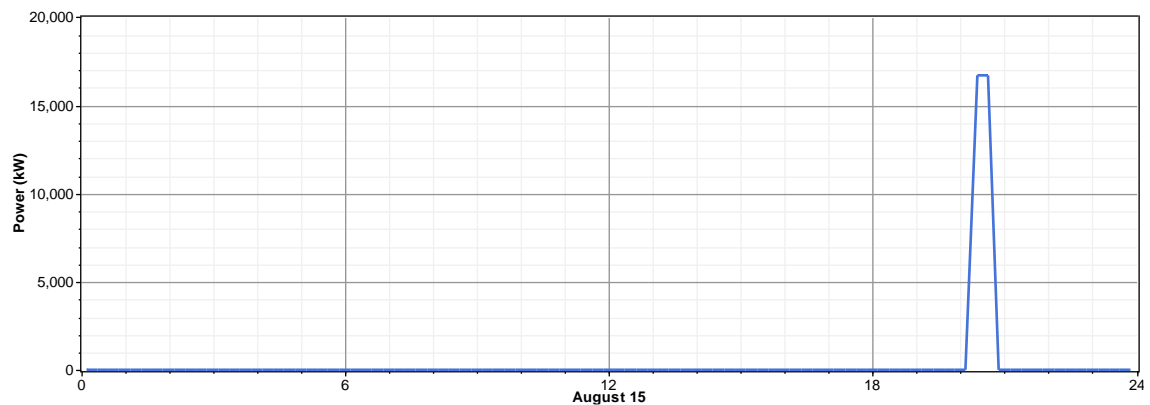


Fig. 50 Potència injectada a HOMER

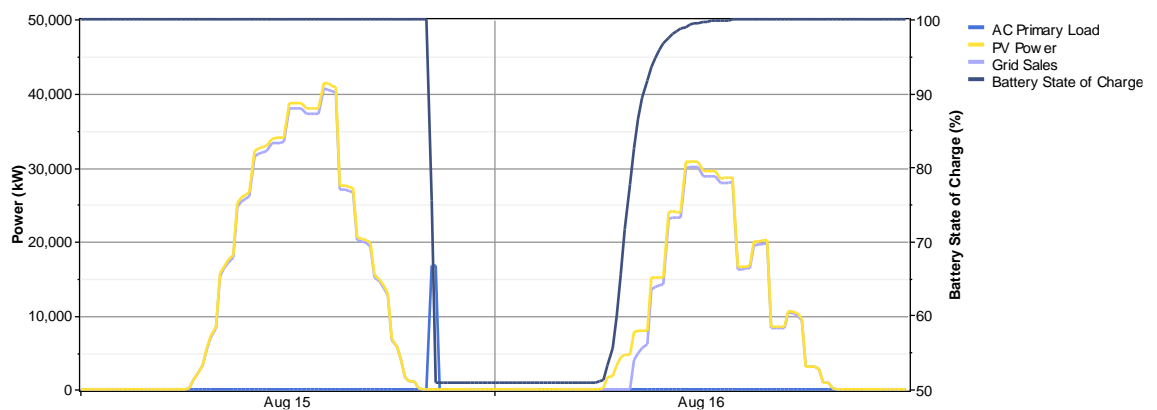


Fig. 51 Potència injectada vs. Càrrega de les bateries

| Càrrega | Valor | Unitats |
|--------------------------|--------------|----------------|
| MRPFL-U | 90.139 | kWh/any |
| Xarxa | 84.677.688 | kWh/any |
| Total | 84.767.824 | kWh/any |
| Bateries | Valor | Unitats |
| Nº Bateries | 173 | |
| Voltatge del bus | 600 | V |
| Capacitat nominal | 17.335 | kWh |
| Capacitat nominal usable | 13.868 | kWh |
| Vida útil | 26.683.606 | kWh |
| | 15 | anys |
| Energia in | 102.198 | kWh/any |
| Energia out | 91.978 | kWh/any |
| Pèrdues | 10.220 | kWh/any |

Taula 10 Valors de la simulació

5.8.4. SIMULACIÓ 4

Finalment, l'última simulació es realitza definint un perfil de càrrega que segueix la potència requerida durant els primers quinze minuts, i un mig de la càrrega requerida en els quinze minuts posteriors. D'aquesta forma aconseguim incrementar la potència mitjana del període, amb un menor augment de la capacitat necessària.

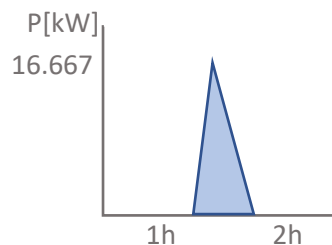


Fig. 52 Perfil de la potència injectada

La solució de HOMER (Fig. 53), realitza un dimensionament del sistema de dues bateries, les quals sempre es mantindran per sobre del 46% de càrrega. La vida útil també serà de 15 anys en aquest cas.

| | PV (kW) | 100LI | Conv. (kW) | Disp. Strgy | Grid (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. |
|--|---------|-------|------------|-------------|-----------|-----------------|------------------------|----------------|--------------|------------|
| | 500... | 122 | 50... | CC | 0 | \$ 2,440,000 | -2,851,189 | \$ -34,007,760 | -39.4... | 1.00 |

Fig. 53 Resultat de HOMER

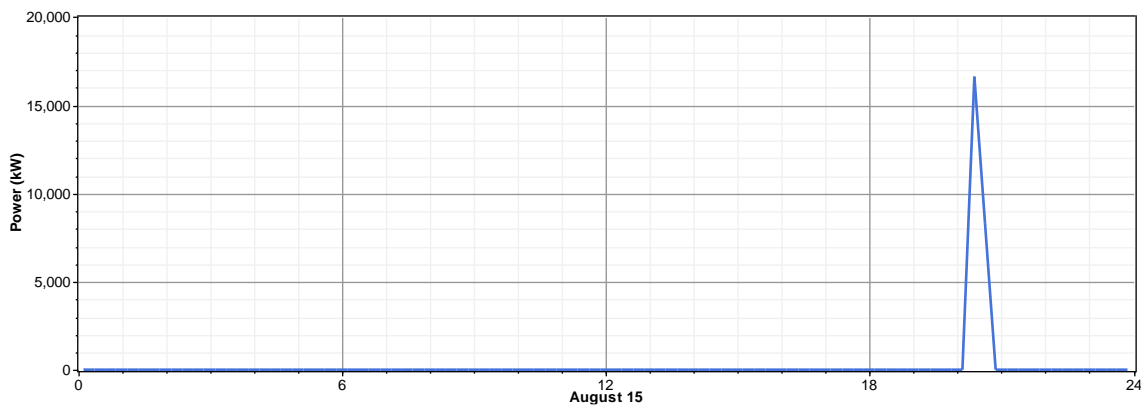


Fig. 54 Potència injectada a HOMER

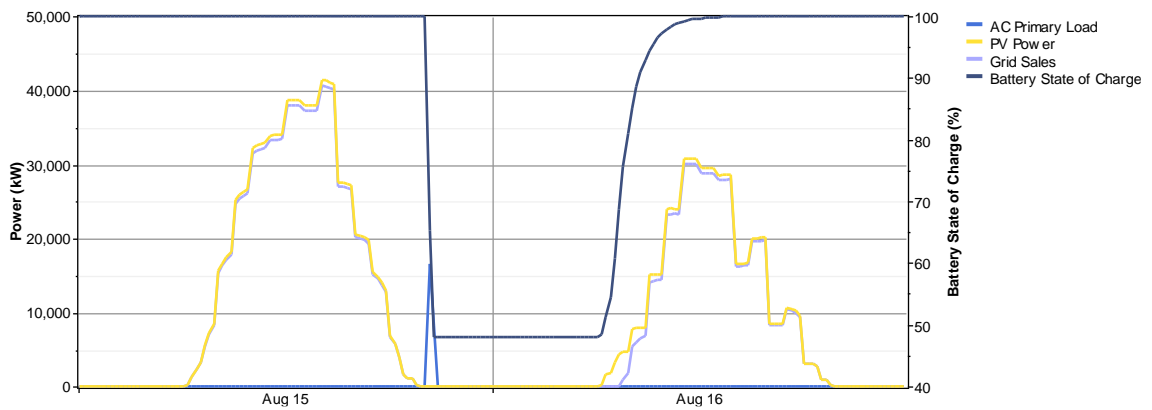


Fig. 55 Potència injectada vs. Càrrega de les bateries

| Càrrega | Valor | Unitats |
|-------------|------------|---------|
| MRPFL-U | 67,490 | kWh/any |
| Xarxa | 84,702,848 | kWh/any |
| Total | 84,770,336 | kWh/any |
| Bateries | Valor | Unitats |
| Nº Bateries | 122 | |

| | | |
|--------------------------|------------|---------|
| Voltatge del bus | 600 | V |
| Capacitat nominal | 12.224 | kWh |
| Capacitat nominal usable | 9.780 | kWh |
| Vida útil | 18.817.340 | kWh |
| | 15 | anys |
| Energia in | 76.520 | kWh/any |
| Energia out | 68.868 | kWh/any |
| Pèrdues | 7.652 | kWh/any |

Taula 11 Valors de la simulació

5.8.5. Anàlisi dels resultats

A continuació s'analitzen els resultats de les simulacions realitzades amb els requeriments imposats per la normativa.

| | | Simulació 1 | Simulació 2 | Simulació 3 | Simulació 4 |
|-------------------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Nº Bateries | - | 102 | 203 | 173 | 122 |
| MRPFL-U | kWh/any | 45.260 | 90.155 | 90.139 | 67.490 |
| Cap. Nom. | kWh | 10.220 | 20.341 | 17.335 | 12.224 |
| Cap. Nom. Usable | kWh | 8.176 | 16.272 | 13.868 | 9.780 |
| Vida útil | kWh | 15.732.531 | 31.310.822 | 26.683.606 | 18.817.340 |
| | anys | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Energia in | kWh/any | 51.316 | 102.216 | 102.198 | 76.520 |
| Energia out | kWh/any | 46.184 | 91.995 | 91.978 | 68.868 |
| Pèrdues | kWh/any | 5.132 | 10.222 | 10.220 | 7.652 |

Taula 12 Comparativa dels valors de les simulacions

La Taula 12 compara els resultats de les simulacions realitzades. S'observa que en tots els casos, tot i descarregar les bateries a una intensitat molt superior a la nominal, s'aconsegueix mantenir la vida de la bateria fins als 15 anys, en ser el nombre de cicles realitzats molt petit.

A la Fig. 56 s'hi representen les corbes de capacitat vs. potència de totes les solucions trobades. Es pot observar que totes les solucions són capaces de subministrar la potència necessària, sent la simulació 1 (amb 102 bateries), l'opció que millor s'hi ajusta. Per aquest motiu, se selecciona la simulació 1 per a realitzar l'anàlisi econòmica.

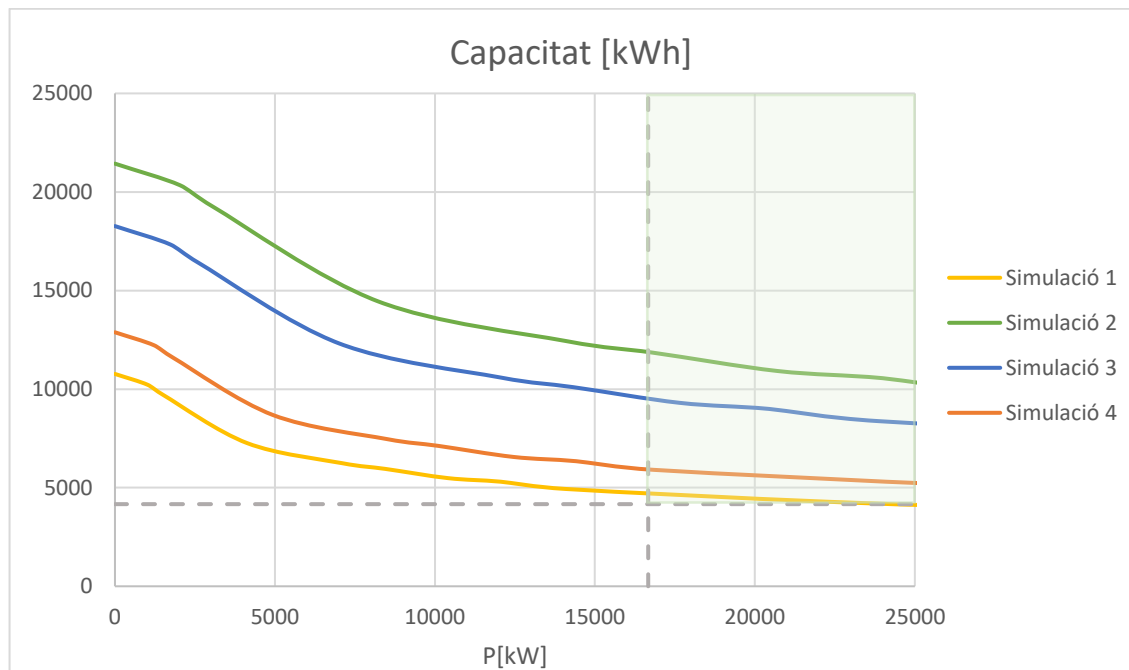


Fig. 56 Corbes de Capacitat vs. Potència de les solucions trobades

5.9. Anàlisi econòmica

L'anàlisi econòmica de la instal·lació, es realitza per determinar la seva viabilitat respecte a l'alternativa (la gestió de la producció amb reserva de potència). Com per a tots els casos la vida útil de les bateries és de 15 anys, es realitza l'estudi econòmic per aquest lapse de temps.

Calculem la retribució de la venda de l'energia generada per la central, amb les dades del mercat diari, suposant que es ven tota l'energia disponible, obtenint una retribució total de 3.042.028 €/any. Se suposa que el benefici respecte a l'alternativa (reservar potència), és la retribució que es deixa de cobrar en el cas de reservar potència, restant l'energia que entra a la bateria i serà consumida per a resoldre caigudes de freqüència. Tal com es pot observar a la Fig. 57, on s'exemplifica la potència injectada per la planta, l'estratègia de

reserva de potència ha de deixar de comercialitzar la tercera part de l'energia que surt de l'inversor. En canvi, la injecció de potència amb sistema de bateries, permet la venda de tota l'energia produïda.

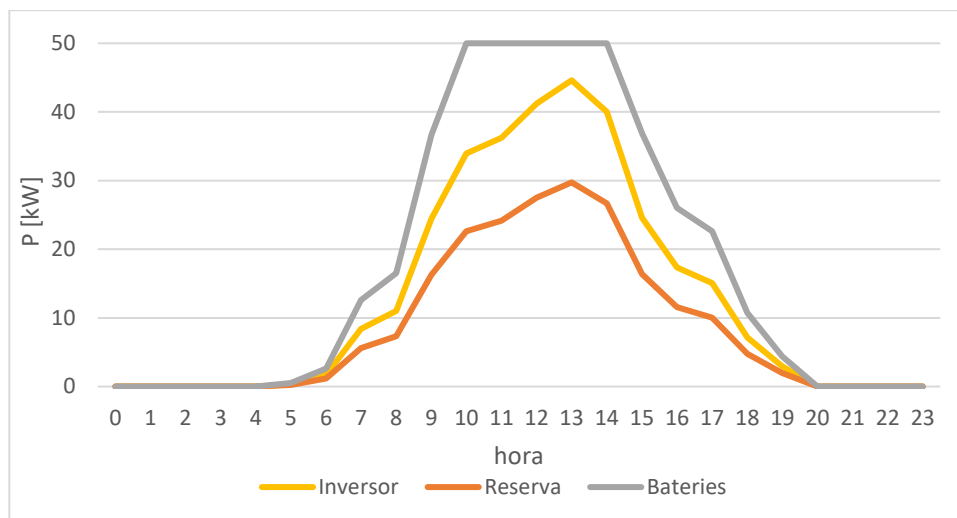


Fig. 57 Comparació de les potències segons sistemes alternatius de MRPFL-U

La inversió inicial està constituïda pel cost de les bateries (incloent-hi la seva instal·lació i altres sistemes de suport mencionats anteriorment) que és de 20.000 €/u, i com a cost fix anual, el cost d'operació i manteniment (7,5 €/kWh·any).

S'estudia la implementació d'un sistema de 102 bateries (el resultat de la simulació 1). A la Taula 13 es mostren els valors emprats:

| | | |
|------------------|-------------|-------|
| Inversió inicial | 2.040.000 € | € |
| Benefici Anual | 1.013.408 € | €/any |
| Cost O&M | 76.500 € | €/any |

Taula 13 Valors econòmics

La inversió inicial és aproximadament el doble del benefici anual, per la qual cosa serà un projecte clarament rendible en poc temps. El cost d'operació i manteniment és petit, representant anualment un 3,75% amb relació a la inversió inicial i un 7,5% respecte al benefici anual.

Finalment, calculem el flux de caixa (CF) de la inversió, i calculem el flux de caixa acumulat i l'actualització anual dels dos valors per una taxa d'interès de $i=0,05$ [17].

| any | CF (€) | Σ CF (€) | $CF/(i + 1)^n$ (€) | $\Sigma CF/(i + 1)^n$ (€) |
|-----|----------------|-----------------|--------------------|---------------------------|
| 0 | - 2.040.000,00 | - 2.040.000,00 | - 2.040.000,00 | - 2.040.000,00 |
| 1 | 936.907,68 | - 1.103.092,32 | 892.293,03 | - 1.050.564,11 |
| 2 | 936.907,68 | - 166.184,64 | 849.802,89 | - 150.734,36 |
| 3 | 936.907,68 | 770.723,05 | 809.336,08 | 665.779,55 |
| 4 | 936.907,68 | 1.707.630,73 | 770.796,27 | 1.404.872,03 |
| 5 | 936.907,68 | 2.644.538,41 | 734.091,68 | 2.072.065,04 |
| 6 | 936.907,68 | 3.581.446,09 | 699.134,94 | 2.672.530,22 |
| 7 | 936.907,68 | 4.518.353,78 | 665.842,80 | 3.211.109,67 |
| 8 | 936.907,68 | 5.455.261,46 | 634.136,00 | 3.692.335,69 |
| 9 | 936.907,68 | 6.392.169,14 | 603.939,05 | 4.120.449,22 |
| 10 | 936.907,68 | 7.329.076,82 | 575.180,04 | 4.499.417,40 |
| 11 | 936.907,68 | 8.265.984,51 | 547.790,52 | 4.832.949,95 |
| 12 | 936.907,68 | 9.202.892,19 | 521.705,25 | 5.124.514,73 |
| 13 | 936.907,68 | 10.139.799,87 | 496.862,15 | 5.377.352,36 |
| 14 | 936.907,68 | 11.076.707,55 | 473.202,05 | 5.594.490,01 |
| 15 | 936.907,68 | 12.013.615,24 | 450.668,61 | 5.778.754,34 |

Taula 14 Fluxos de caixa

A la Taula 14, s'observa que el tercer període del flux de caixa acumulat ja es troba en xifres positives. El període de retorn, és només de 2 anys i 3 mesos. Al ser inferior que la vida útil de la bateria, podem afirmar que aquesta inversió serà rendible i es recuperarà la inversió en poc més de dos anys.

5.10. Estudi analític de la simulació

Un cop analitzats els resultats de les simulacions, es decideix realitzar un estudi analític que permeti definir la injecció de forma detallada, utilitzant un temps de mostreig menor (1 minut). S'estudiarà les necessitats de capacitat i potència per a poder complir les proves de REE necessàries per a certificar el funcionament d'aquest servei auxiliar, en el moment més desfavorable de l'any.

En tot moment es busca el nombre de bateries mínim per complir tant amb la potència com amb la capacitat, i mantenint un estat de càrrega mínim del 20%.

5.10.1. Assaig US2F2: $s_2=2\%$ i $\Delta f_1=0,2$ Hz

Aquest assaig es realitza amb un estatisme del 2% i una banda morta de 0,2 Hz. En aquest assaig, el control de la potència que haurà de subministrar la bateria estarà governada de la forma següent:

$$Si f < 49,8Hz i P_{tot} < 50MW \rightarrow \frac{\Delta P}{P_{ref}} (\%) = 100 \cdot \frac{|49,8-f|}{0,02 \cdot 50} \quad (Eq. 7)$$

En aquest cas, són necessàries 56 bateries, que podran oferir una capacitat nominal usable de 4.480 kWh i una potència màxima de 16.800 kW. Com es pot observar a la Taula 15, la potència màxima condiona un nombre de bateries més elevat que la capacitat.

| Bateria | | Requeriments | |
|---------|------------|--------------|-------------|
| Pmàx | 16.800 kW | P | 16.667 kW |
| C(Pmàx) | 1780,2 kWh | C | 1.361,1 kWh |

Taula 15 Característiques de la bateria vs. requeriments del sistema

| Hora | P _{inv} [kW] | F[Hz] | ΔP[%] | P _{inj} [kW] | P _{tot} [kW] | E _{inj} [kWh] | C _{bat} [kWh] | C _{bat} [%] |
|-------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 11:45 | 33333 | 49,9 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 5.600 | 100% |
| 11:46 | 33333 | 49,7 | 10% | 3333,3 | 36666 | 55,6 | 5.544 | 99% |
| 11:47 | 33333 | 49,6 | 20% | 6666,6 | 40000 | 111,1 | 5.433 | 97% |
| 11:48 | 33333 | 49,5 | 30% | 9999,9 | 43333 | 166,7 | 5.267 | 94% |
| 11:49 | 33333 | 49,4 | 40% | 13333 | 46666 | 222,2 | 5.044 | 90% |
| 11:50 | 33333 | 49,35 | 45% | 15000 | 48333 | 250,0 | 4.794 | 86% |
| 11:51 | 33333 | 49,3 | 50% | 16667 | 50000 | 277,8 | 4.517 | 81% |
| 11:52 | 33333 | 49,9 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 4.517 | 81% |
| 11:53 | 33333 | 49,3 | 50% | 16667 | 50000 | 277,8 | 4.239 | 76% |
| 11:54 | 33333 | 50 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 4.239 | 76% |

Taula 16 Execució de l'assaig US2F2

Pel que fa la capacitat de les bateries, aquesta arribarà a un nivell de càrrega del 76%.

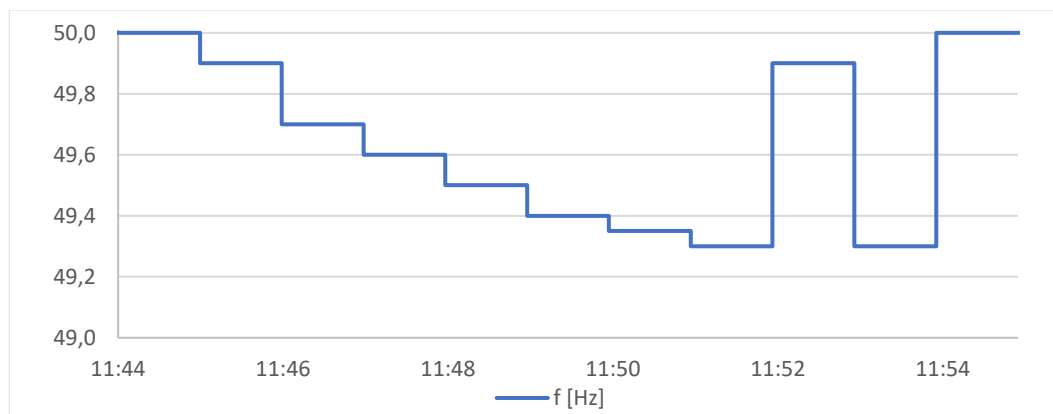


Fig. 58 Variació de la freqüència durant l'anàlisi

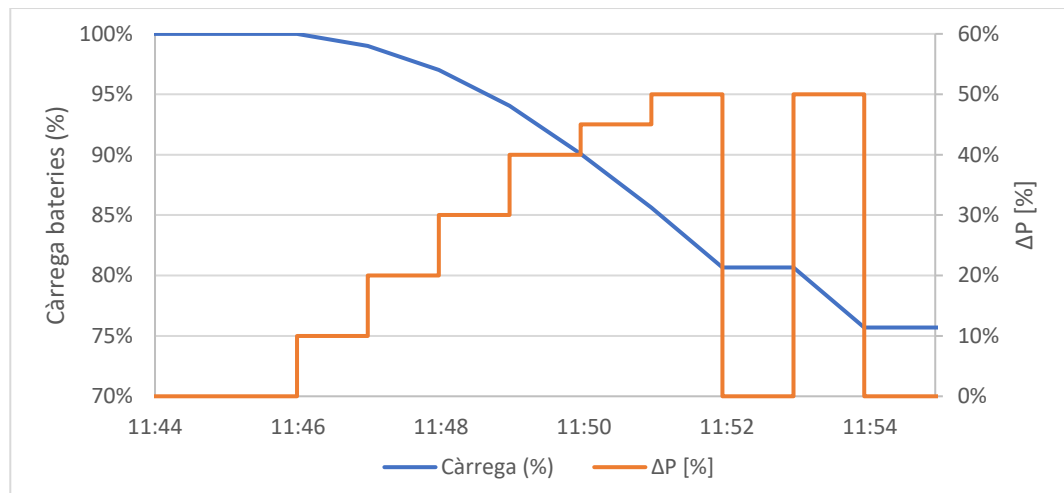


Fig. 59 Descàrrega del sistema de bateries vs. increment de potència

5.10.2. Assaig US2F5: $s_2=2\%$ i $\Delta f_1=0,5\text{Hz}$

En aquest segon assaig, es realitza amb un estatisme també del 2% però aquest cop amb una banda morta de 0,5 Hz. El control de la potència que haurà de subministrar la bateria estarà governada de la forma següent:

$$\text{Si } f < 49,5\text{Hz i } P_{tot} < 50\text{MW} \rightarrow \frac{\Delta P}{P_{ref}} (\%) = 100 \cdot \frac{|49,5-f|}{0,02 \cdot 50} \quad (\text{Eq. 8})$$

En aquest cas també seran necessàries 56 bateries. Com es pot observar a la Taula 17, la potència màxima podrà injectar amb la potència requerida, i la capacitat serà també superior a l'energia necessària.

| Bateria | | Requeriments | |
|----------------------|------------|--------------|-------------|
| P _{màx} | 16.800 kW | P | 16.667 kW |
| C(P _{màx}) | 1780,2 kWh | C | 1.361,1 kWh |

Taula 17 Característiques de la bateria vs. requeriments del sistema

| Hora | P _{inv} [kW] | f[Hz] | ΔP[%] | P _{inj} [kW] | P _{tot} [kW] | E _{inj} [kWh] | C _{bat} [kWh] | C _{bat} [%] |
|-------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 11:45 | 33333 | 49,6 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 5.600 | 100% |
| 11:46 | 33333 | 49,4 | 10% | 3333,3 | 36666 | 55,6 | 5.544 | 99% |
| 11:47 | 33333 | 49,3 | 20% | 6666,6 | 40000 | 111,1 | 5.433 | 97% |
| 11:48 | 33333 | 49,2 | 30% | 9999,9 | 43333 | 166,7 | 5.267 | 94% |
| 11:49 | 33333 | 49,1 | 40% | 13333 | 46666 | 222,2 | 5.044 | 90% |
| 11:50 | 33333 | 49,05 | 45% | 15000 | 48333 | 250,0 | 4.794 | 86% |
| 11:51 | 33333 | 49 | 50% | 16667 | 50000 | 277,8 | 4.517 | 81% |
| 11:52 | 33333 | 49,9 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 4.517 | 81% |
| 11:53 | 33333 | 49 | 50% | 16667 | 50000 | 277,8 | 4.239 | 76% |
| 11:54 | 33333 | 50 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 4.239 | 76% |

Taula 18 Execució de l'assaig US2F5

Com mostra la Taula 18, la càrrega de la bateria arribarà fins al 76%.

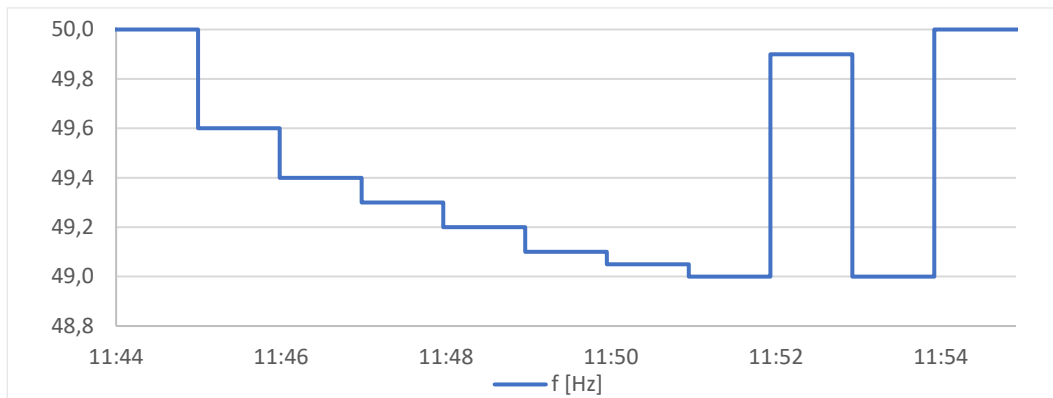


Fig. 60 Variació de la freqüència durant l'anàlisi

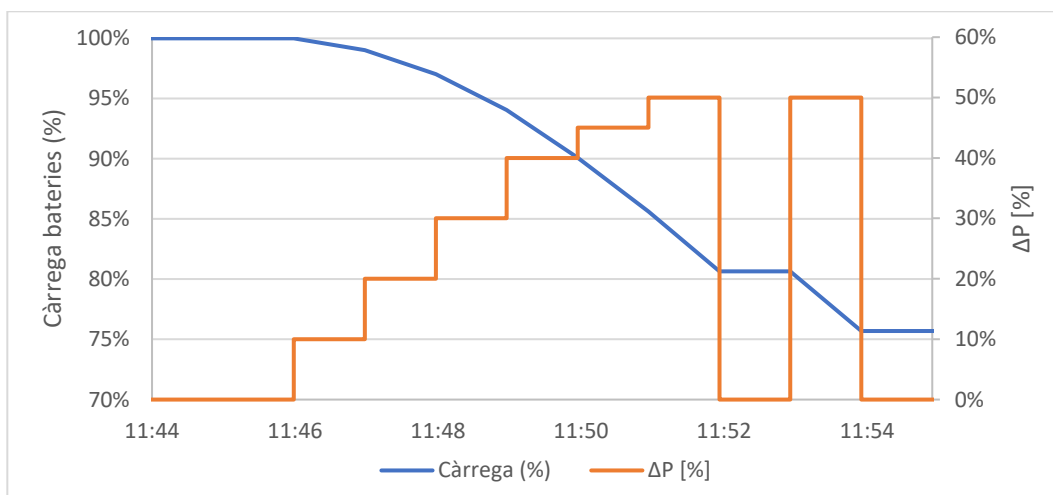


Fig. 61 Descàrrega del sistema de bateries vs. increment de potència

5.10.3. Assaig US12F2: s2=12% i Δf1=0,2 Hz

El tercer assaig es realitza amb un estatisme del 12% i s'activarà a partir dels 49,8 Hz (banda morta de 0,2 Hz). El control de la potència en aquest cas, estarà regit per:

$$Si f < 49,8Hz i P_{tot} < 50MW \rightarrow \frac{\Delta P}{P_{ref}} (\%) = 100 \cdot \frac{|49,8-f|}{0,12 \cdot 50} \quad (Eq. 9)$$

En aquest cas seran necessàries només 41 bateries, que seran necessàries per a cobrir els requisits del sistema, amb una capacitat nominal de 4.100 kWh.

| Bateria | | Requeriments | |
|---------|-----------|--------------|-----------|
| Pmàx | 12.300 kW | P | 12.222 kW |
| C(Pmàx) | 1304 kWh | C | 815 kWh |

Taula 19 Característiques de la bateria vs. requeriments del sistema

| Hora | P_{inv} [kW] | f [Hz] | ΔP [%] | P_{inj} [kW] | P_{tot} [kW] | E_{inj} [kWh] | C_{bat} [kWh] | C_{bat} [%] |
|-------|----------------|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 11:45 | 33333 | 49,9 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 4.100 | 100% |
| 11:46 | 33333 | 49,2 | 10% | 3333,3 | 36666 | 55,6 | 4.044 | 99% |
| 11:47 | 33333 | 48,6 | 20% | 6666,6 | 40000 | 111,1 | 3.933 | 96% |
| 11:48 | 33333 | 48 | 30% | 9999,9 | 43333 | 166,7 | 3.767 | 92% |
| 11:49 | 33333 | 47,6 | 37% | 12222 | 45555 | 203,7 | 3.563 | 87% |
| 11:50 | 33333 | 49,9 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 3.563 | 87% |
| 11:51 | 33333 | 49 | 13% | 4444,4 | 37777 | 74,1 | 3.489 | 85% |
| 11:52 | 33333 | 47,6 | 37% | 12222 | 45555 | 203,7 | 3.285 | 80% |
| 11:53 | 33333 | 50 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 3.285 | 80% |

Taula 20 Execució de l'assaig US12F2

La bateria es descarregarà només fins al 80%, assegurant d'aquesta manera la bona salut de la bateria.

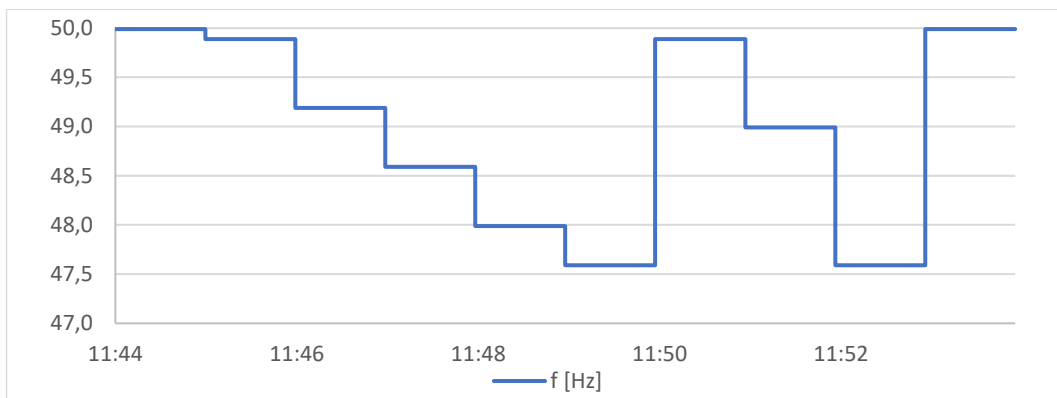


Fig. 62 Variació de la freqüència durant l'anàlisi

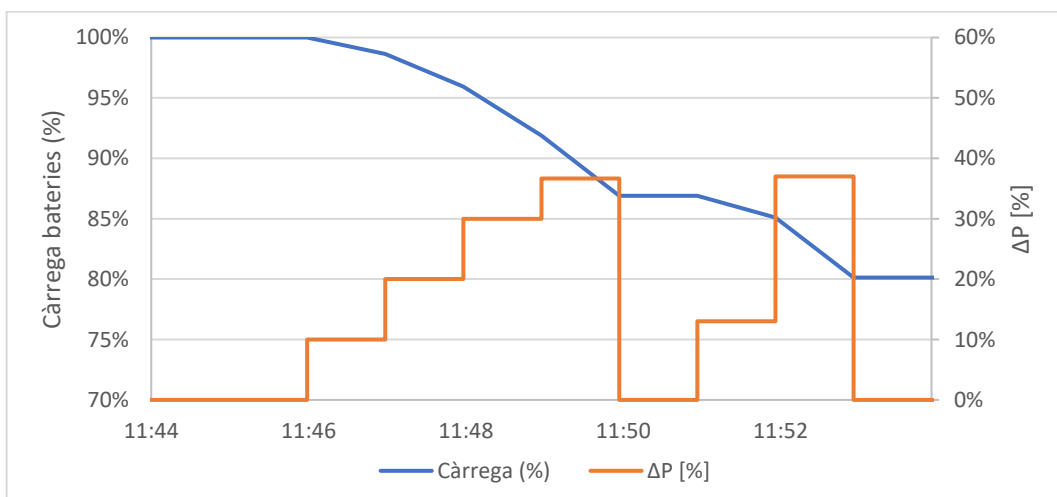


Fig. 63 Descàrrega del sistema de bateries vs. increment de potència

5.10.4. Assaig US12F5: s₂=12% i Δf1=0,5 Hz

A l'últim assaig, serà realitzat amb un estatisme del 12% i activarà el servei a partir dels 49,5 Hz (banda morta de 0,5 Hz). El control de la potència en aquest cas, estarà regit per:

$$Si f < 49,8Hz i P_{tot} < 50MW \rightarrow \frac{\Delta P}{P_{ref}} (\%) = 100 \cdot \frac{|49,8-f|}{0,12 \cdot 50} \quad (Eq. 10)$$

El nombre de bateries necessàries d'aquest assaig serà de només 36 unitats, amb una capacitat nominal de 3.600 kWh.

| Bateria | | Requeriments | |
|---------|-----------|--------------|-----------|
| Pmàx | 10.800 kW | P | 10.555 kW |
| C(Pmàx) | 1.144 kWh | C | 602 kWh |

Taula 21 Característiques de la bateria vs. requeriments del sistema

| Hora | P _{inv} [kW] | f[Hz] | ΔP[%] | P _{inj} [kW] | P _{tot} [kW] | E _{inj} [kWh] | C _{bat} [kWh] | C _{bat} [%] |
|-------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 11:45 | 33333 | 49,6 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 3.600 | 100% |
| 11:46 | 33333 | 49,2 | 5% | 1666,6 | 35000 | 27,8 | 3.572 | 99% |
| 11:47 | 33333 | 48,6 | 15% | 4999,9 | 38333 | 83,3 | 3.489 | 97% |
| 11:48 | 33333 | 48 | 25% | 8333,3 | 41666 | 138,9 | 3.350 | 93% |
| 11:49 | 33333 | 47,6 | 32% | 10555 | 43888 | 175,9 | 3.174 | 88% |
| 11:50 | 33333 | 49,9 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 3.174 | 88% |
| 11:51 | 33333 | 47,6 | 32% | 10555 | 43888 | 175,9 | 2.998 | 83% |
| 11:52 | 33333 | 50 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 2.998 | 83% |
| 11:53 | 33333 | 50 | 0% | 0 | 33333 | 0 | 2.998 | 83% |

Taula 22 Execució de l'assaig US12F5

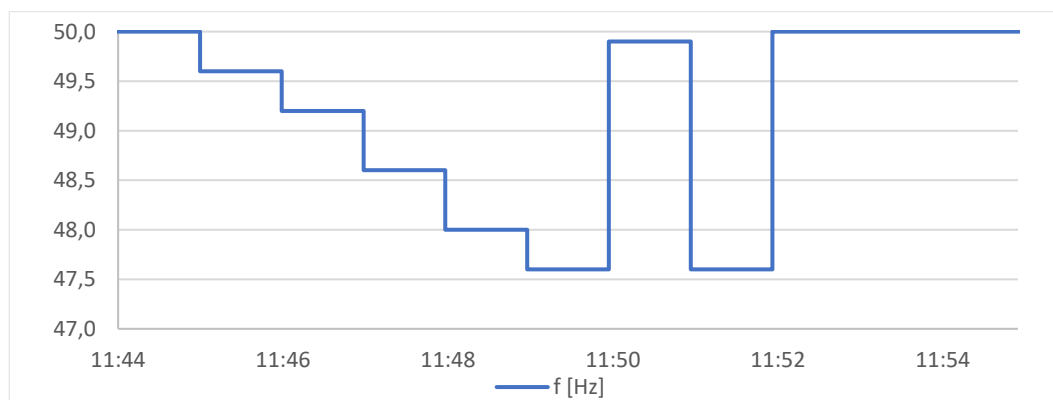


Fig. 64 Variació de la freqüència durant l'anàlisi

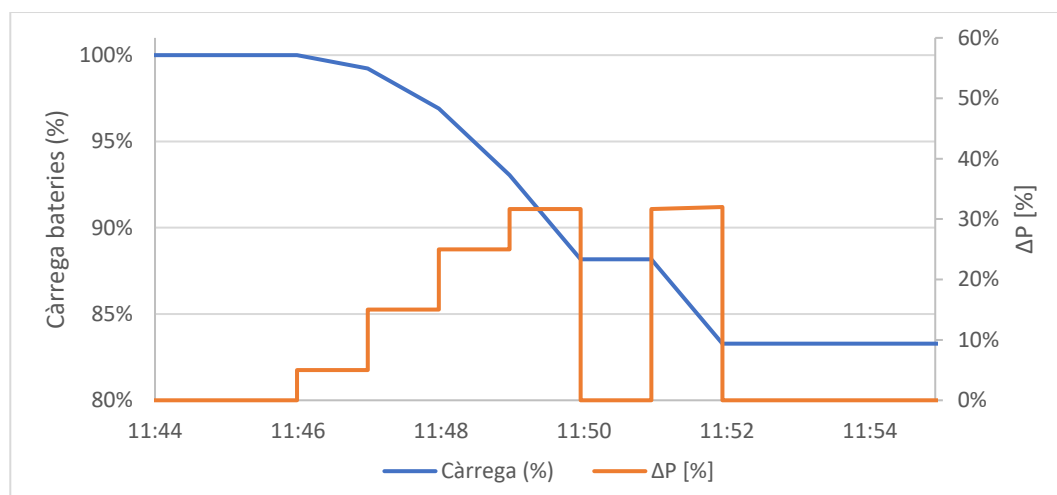


Fig. 65 Descàrrega del sistema de bateries vs. increment de potència

5.10.5. Anàlisi dels resultats

| Assaig | Estatisme | Banda morta | Bateries |
|--------|-----------|-------------|----------|
| US2F2 | 2% | 0,2 Hz | 56 |
| US2F5 | 2% | 0,5Hz | 56 |
| US12F2 | 12% | 0,2 Hz | 41 |
| US12F5 | 12% | 0,5 Hz | 36 |

Taula 23 Resultats dels assaigs

Com es pot observar, les proves US2F2 i US2F5, són les que requeriran un nombre més gran de bateries (ambdues 56 bateries). En tots els casos la dimensió del sistema de bateries vindrà condicionada per la intensitat màxima (o potència màxima) que s'haurà de subministrar.

Cal tenir en compte que en tots els casos, es treballa amb la capacitat nominal de la bateria. Tot i això, aquesta no serà una capacitat real, ja que depenent de la intensitat a què es descarrega la bateria, la capacitat varia (model cinètic de descàrrega).

Els assaigs més desfavorables han estat el US2F2 i el US2F5, per la qual cosa considerarem necessàries 56 bateries per aquesta central elèctrica.

5.10.6. Anàlisi econòmica

Es realitza l'estudi econòmic per a un sistema de 56 bateries, seguint els mateixos passos que a l'apartat 5.9. A la Taula 24 es mostren els costos i beneficis que s'empren per a la realització de l'estudi del flux de caixa.

| | | |
|--------------|-----------|-------|
| Bateries | 1.120.000 | € |
| Benef. Anual | 1.013.818 | €/any |
| O&M | 42.000 | €/any |

Taula 24 Valors econòmics

En aquest cas, s'observa que el cost de la instal·lació és del mateix ordre de magnitud que els beneficis anuals, per la qual cosa aquesta serà una inversió amb un període de retorn d'aproximadament un any. A continuació, es calcula el flux de caixa (CF) de la inversió, el flux de caixa acumulat i l'actualització anual d'ambdós valors per una taxa d'interès de $i=0,05$ [17].

| any | CF | $\sum CF$ | $CF/(i+1)^n$ | $\sum CF/(i+1)^n$ |
|-----|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| 0 | - 1.120.000,00 | - 1.120.000,00 | - 1.120.000,00 | - 1.120.000,00 |
| 1 | 971.817,73 | - 148.182,27 | 925.540,70 | - 141.125,97 |
| 2 | 971.817,73 | 823.635,46 | 881.467,33 | 747.061,64 |
| 3 | 971.817,73 | 1.795.453,20 | 839.492,70 | 1.550.979,98 |
| 4 | 971.817,73 | 2.767.270,93 | 799.516,85 | 2.276.640,64 |
| 5 | 971.817,73 | 3.739.088,66 | 761.444,62 | 2.929.673,80 |
| 6 | 971.817,73 | 4.710.906,39 | 725.185,35 | 3.515.350,88 |
| 7 | 971.817,73 | 5.682.724,12 | 690.652,72 | 4.038.605,94 |
| 8 | 971.817,73 | 6.654.541,85 | 657.764,49 | 4.504.055,86 |
| 9 | 971.817,73 | 7.626.359,59 | 626.442,37 | 4.916.019,39 |
| 10 | 971.817,73 | 8.598.177,32 | 596.611,79 | 5.278.535,01 |
| 11 | 971.817,73 | 9.569.995,05 | 568.201,70 | 5.595.377,90 |
| 12 | 971.817,73 | 10.541.812,78 | 541.144,48 | 5.870.075,81 |
| 13 | 971.817,73 | 11.513.630,51 | 515.375,69 | 6.105.924,08 |
| 14 | 971.817,73 | 12.485.448,24 | 490.833,99 | 6.305.999,79 |
| 15 | 971.817,73 | 13.457.265,98 | 467.460,95 | 6.473.175,03 |

Taula 25 Fluxos de caixa

A la Taula 25, s'observa que el flux de caixa acumulat (i també l'actualitzat), és positiu a partir del segon període. Es calcula el temps de retorn que resulta ser de només 1 any i 2 mesos, molt inferior als 15 anys de vida útil de la bateria, per la qual cosa es pot afirmar que és una inversió molt rendible.

6. Conclusions

En aquest estudi s'ha dimensionat un sistema de bateries per suplir el servei auxiliar del control de freqüència en episodis de caiguda de potència, a una planta fotovoltaïca de gran escala. De la realització d'aquest treball, se'n poden extreure les conclusions següents:

- L'estabilitat de la freqüència de la xarxa europea, fa que l'alternativa d'emprar un sistema de bateries per al MRPFL-U, sigui l'opció més viable econòmicament. En xarxes on els episodis de caiguda de freqüència es produeixen de forma molt habitual, caldria tornar a realitzar l'estudi per estudiar com canvia la vida útil de les bateries, i determinar si aquesta és l'opció més adequada.
- El temps de mostreig d'una hora, que acostuma a ser suficient en el dimensionament de plantes elèctriques, no ho és per al dimensionament de sistemes auxiliars de la xarxa, que acostumen a tenir durades inferiors.
- Les bateries més adequades per a les injeccions en MRPFL-U, han de poder subministrar una gran potència durant un lapse de temps molt curt (de l'ordre dels minuts), sense requerir una gran capacitat.

També, se n'extreuen altres més generals en relació al sistema elèctric:

- Els avenços tecnològics en el camp de les energies renovables, apunten a un futur amb generadors renovables més autònoms i flexibles, que garanteixin xarxes més robustes i netes, imprescindibles per a la descarbonització del sistema elèctric.
- Si l'alternativa de reserva de la capacitat de producció, s'establís de forma preferent en el mercat, el preu de l'energia es podria veure perjudicat pel fet de reduir-se l'oferta d'energies "barates" al mercat.

6.1. Perspectives futures

L'elaboració del present treball, obre possibles vies de recerca per aprofundir en aspectes concrets de l'ús de bateries en plantes fotovoltaïques de gran escala, per donar servei auxiliar en caigudes de freqüència.

- Observant que en tots els casos, la vida útil de les bateries sempre es manté en el seu màxim, es podria estudiar el disseny d'un algoritme de gestió de bateries, per aconseguir més flexibilitat a la planta.
- Analitzar les diferents tecnologies d'emmagatzematge en bateries, per determinar si les bateries de liti són realment la millor opció.

7. Impacte ambiental

A continuació es realitza l'impacte ambiental tant de la realització del projecte com de la seva execució.

7.1. Impacte ambiental de la instal·lació

A continuació s'estudiarà l'impacte ambiental de la instal·lació, des de la perspectiva de l'estalvi d'emissions que es produeix respecte a l'alternativa de reducció de la potència generada, i posteriorment des de la perspectiva de l'impacte que causa la fabricació de les bateries de liti.

7.1.1. Impacte en el mercat elèctric

Per al càlcul de l'estalvi d'emissions respecte de l'alternativa, considerem que tota l'energia que es deixa de produir, haurà de ser subministrada pel mix elèctric. L'any 2019, el mix elèctric al sistema espanyol va tenir un factor d'emissions de 0,19 tCO₂-equivalent per cada MWh produït [18]. La producció que s'hauria hagut de reservar en el sistema alternatiu, suposaria una energia de 28.836 MWh. D'aquesta manera, calculem les emissions:

$$28.836 \frac{MWh}{any} * 0,19 \frac{tCO_2-eq}{MWh} = 5.479 \frac{tCO_2-eq}{any} \quad (Eq. 11)$$

Les tones de diòxid de carboni equivalent (tCO₂-eq), s'utilitzen per comptabilitzar només les emissions directes associades a la producció d'electricitat, i té en compte tant les emissions de diòxid de carboni com les d'òxid de nitrogen, ponderant les emissions d'aquest últim segons el seu potencial d'escalfament global (GWP) [18].

7.1.2. Impacte de la fabricació de bateries de liti

La demanda de liti, ha patit en els últims temps un creixement exponencial a causa de l'auge del cotxe elèctric. Aquest creixement va fer que els preus del liti es doblesin entre 2016 i 2018, i s'espera que la producció passi de 100 GWh anuals fins als 800 GWh anuals l'any 2027.

L'extracció del liti, es realitza mitjançant la injecció d'aigua a l'interior de salines o coves de sal riques, per extreure'n una salmorra rica en liti. Aquesta barreja, conté manganès, potassi, bòrax i sals de liti. Es deixa evaporar en piscines d'evaporació, i després de 12-18 mesos, es filtren les sals per extreure'n el liti.

Es calcula que per cada kg de liti que s'extreu, s'han hagut d'emprar 1.900 m³ d'aigua. A l'anomenat triangle del liti (format per Argentina, Bolívia i Xile), regió on es troben més de

la meitat de les reserves mundials de liti, la mineria arriba a utilitzar fins al 65% de l'abastiment d'aigua disponible, com en el cas d'Atacama, a Xile. Aquest fet té un gran impacte ecològic però també social, en les comunitats locals.

A més, l'aigua utilitzada és potencialment perillosa pel seu contingut en productes químics tòxics utilitzats en el procés, com l'àcid clorhídric, que per filtració a nivells freàtics poden arribar fins als subministraments d'aigua.

El liti, també pot trobar-se en forma de roca a jaciments d'Austràlia i Nord Amèrica. Aquesta forma d'extracció, tot i tenir un consum d'aigua menor, també té un impacte majúscul. En el cas de Nevada, als Estats Units, s'ha trobat contaminació causada per una mina a més de 200 km d'aquesta [19].

Al final de la vida útil de les bateries, només una petita part es reciclen, i la resta acaben a abocadors. Tot i això, amb l'increment de demanda de cotxes elèctrics han aparegut moltes empreses de reciclatge de bateries com Li-Cycle, que assegura poder recuperar més del 95% dels materials d'aquestes, majoritàriament liti, cobalt i níquel.

7.2. Impacte ambiental del projecte

Es considera que l'impacte ambiental directe d'aquest projecte, és bàsicament energètic (elèctric), degut a la seva naturalesa teòrica. S'exposen per tant, els consums energètics realitzats durant la realització d'aquest treball.

| Consums elèctrics | | | |
|--------------------------|---------------------|------------------|----------------------|
| Càrrega | Potència (W) | temps (h) | Energia (kWh) |
| Ordinador portàtil | 65 | 300 | 19,5 |
| Tauleta | 30 | 100 | 3 |
| Il·luminació | 50 | 300 | 15 |
| Climatització | 1000 | 50 | 50 |
| Total | | | 87,5 |

Taula 26 Consums elèctrics

Amb els factors de conversió que proporciona la companyia subministradora contractada, podem calcular les emissions derivades del consum elèctric.

| | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Emissions de CO₂ | kg CO ₂ /kWh | kg CO ₂ |
| | 0,32 | 28 |
| Emissions de residu nuclear | mg/kWh | mg residu nuclear |
| | 0,57 | 49,9 |

Taula 27 Emissions derivades del consum elèctric

L'impacte ambiental de la realització d'aquest treball, implica l'emissió de 28 kg de CO₂ i uns 50 mg de residu nuclear.

8. Pressupost del projecte

En el present capítol, es calcula el pressupost del projecte. S'avaluaran econòmicament tant els costos en recursos humans com els costos de material emprat per a realitzar el treball.

Per als recursos humans, es consideren les hores necessàries per a un enginyer per a la realització del treball, que es valoren a 30 € per hora treballada.

| Concepte | Preu | Temps | Cost |
|--------------|--------|-------|-----------------|
| Enginyer | 30 €/h | 300 h | 9.000 € |
| Subtotal | | | 9.000 € |
| IVA (21%) | | | 1.890 € |
| TOTAL | | | 10.890 € |

Taula 28 Pressupost de RRHH

Seguidament, es calculen els costos dels dispositius electrònics emprats, que es valoraran segons la seva amortització i el temps d'ús que ha estat necessari.

| Concepte | Preu | Temps d'amortització | Temps d'ús | Cost |
|---------------------------|------------|----------------------|------------|----------------|
| Ordinador portàtil | 1.185,00 € | 8 anys | 5 mesos | 61,72 € |
| Tauleta | 395,00 € | 6 anys | 5 mesos | 27,43 € |
| Disc dur extern | 49,95 € | 6 anys | 5 mesos | 3,47 € |
| Total (IVA inclòs) | | | | 92,62 € |

Taula 29 Pressupost del material emprat

El cost total de la realització del projecte, és de **10.982,62 €**.

9. Bibliografia

- [1] A. Cabrera-Tobar, E. Bullich-Massagué, M. Aragüés-Peñalba, O. Gomis-Bellmunt, *Active and Reactive Power Control of a PV Generator for Grid Code Compliance*, Octubre 2019
- [2] J. Schonberger, *A single phase multi-string PV inverter with minimal bus capacitance*, 2009
- [3] A. Cabrera-Tobar, E. Bullich-Massagué, M. Aragüés-Peñalba, O. Gomis-Bellmunt, *Topologies for large scale photovoltaic power plants*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, pp. 309-319, 2016.
- [4] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2020, Executive Summary*.
- [5] IRENA, *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [6] R. Jarana, *Simulació d'una bateria de gran capacitat connectada a la xarxa per donar suport a la generació d'energia d'una planta fotovoltaica*, Juliol 2020
- [7] IRENA (International Renewable Energy Agency), *Utility-scale batteries: innovation landscape brief*. Abu Dhabi, 2019.
- [8] P. GILMAN, T. LAMBERT, *HOMER Legacy v2.68*, 2012
- [9] Q. Zhang, Y. Li, Y. Shang, B. Duan, N. Cui, c. Zhang *A Fractional-Order Kinetic Battery Model of Lithium-Ion Batteries Considering a Nonlinear Capacity*, Abril 2019
- [10] **REGLAMENT (UE) 2016/1388 DE LA COMISSIÓ del 17 d'agost de 2016 per el que s'estableix un codi de xarxa en matèria de connexió de la demanda**. [eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R1388&from=ES]
- [11] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA. *Norma técnica de supervisión de la conformidad de los módulos de generación de electricidad según el Reglamento UE 2016/631 (Versión 2)*, 3 de noviembre de 2020.
- [12] **BOE num.208, Orden TED/749/2020, de 16 de julio, por la que se establecen los requisitos técnicos para la conexión a la red necesarios para la implementación de los códigos de red de conexión. 1 d'agost de 2020** [<https://www.boe.es/eli/es/o/2020/07/16/ted749/con>]
- [13] **REGLAMENTO (UE) 2016/631 DE LA COMISSIÓ del 14 d'abril de 2016 que estableix un codi de xarxa sobre requisits de connexió de generadors de xarxa** [eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=ES]

- [14] Eduard Bullich-Massagué, Ricard Ferrer-San-José, Mònica Aragüés-Peñalba, Luis Serrano-Salamanca, Carlos Pacheco-Navas, Oriol Gomis-Bellmunt, *Power plant control in large-scale photovoltaic plants: design, implementation and validation in a 9.4 MW photovoltaic plant*, *IET Journals. IET Renewable Power Generation*, vol. 10, nº 1, pp. 50-62, 2016.
- [15] ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), *System separation in the Continental Europe Synchronous Area on 8 January 2021 – 2nd Update*, 26 de gener de 2021.
[<https://www.entsoe.eu/news/2021/01/26/system-separation-in-the-continental-europe-synchronous-area-on-8-january-2021-2nd-update/>]
- [16] I.MATHEWS, B.XU, W.HE, V.BARRETO, T.BUONASSISI, I.PETERS. *Technoeconomic model of second-life batteries for utility-scale solar considering calendar and cycle aging*, 1 de juliol de 2020.
[<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261920306395>]
- [17] NREL (National Renewable Energy Laboratory), *Current and Future Costs of Renewable Energy Project Finance Across Technologies*. Colorado (EEUU) , Juliol 2020.
- [18] REE, *Emisiones de CO2 asociadas a la generación de electricidad en España*, Març 2021
- [19] IER (Institut for Energy Reserch), *The Environmental Impact of Lithium Batteries*, Novembre 2020.
- [20] J. Á. LEIVA VILAPLANA, *Desarrollo de una metodología de estimación de potencia disponible, basada en redes neuronales artificiales, para la implementación del servicio de red under-frequency en centrales de generación fotovoltaica*, Gener 2021.

Bibliografia complementària

- [21] S. Sumathi, L. Ashok, P. Surekha, *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems.*, Green Energy and Technology, SpringerElsevier, Suïssa, 2015.
- [22] S.C.BHATTACHARYYA, Z. CHMIEL, *Analysis of off-grid electricity system at Isle of Eigg (Scotland): Lessons for developing countries*, 2014