

Treball de Fi de Grau

MEMÒRIA

ANÀLISI DE LA SENSIBILITAT DEL RENDIMENT
D'INSTAL·LACIONS DE PV EN RELACIÓ AL COST
D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA



Autora: Sílvia Moreno García

Tutor: Jordi Olivella Nadal

Convocatòria: Juny 2020

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

La creixent demanda d'energia, els preus elevats del petroli i la preocupació pels impactes ambientals han fet augmentar el desenvolupament d'energies renovables com l'energia eòlica, solar, oceànica, biomassa i geotèrmia en les últimes dècades. L'energia solar és una de les que més està triomfant dins dels recursos renovables. Aquest tipus d'energia és de naturalesa variable i conté fluctuacions, les quals es poden pal·liar mitjançant l'ús de sistemes d'emmagatzematge d'energia. Tot i així, el cost de les bateries i la seva vida útil limitada són greus inconvenients en el mercat actual.

Amb aquest escenari de fons, aquest treball pretén estudiar la viabilitat econòmica d'instal·lar un sistema fotovoltaic domèstic amb possibilitat d'emmagatzematge, preveient tant una disminució en els preus actuals dels sistemes d'emmagatzematge com la imminent creació de nous sistemes amb prestacions millorades. Aquest estudi duu a terme una simulació modelant un sistema domèstic de plaques solars amb sistema d'emmagatzematge, optimitzant la potència fotovoltaica instal·lada i la capacitat de les bateries en funció del VAN. A més a més, s'estudien la taxa d'autoconsum directe, la taxa d'autoconsum i el grau d'autosuficiència en funció dels preus de la bateria. Per últim es realitza un anàlisi de sensibilitat dels resultats en funció dels costos d'instal·lació i de manteniment del sistema.

S'extreuen les següents conclusions: si els preus de les bateries continuen disminuint, la perspectiva per a la generació d'energia solar en els habitatges domèstics és molt bona, i pot considerar-se una mesura transcendental en la transició energètica prevista en els pròxims anys. Els habitatges poden arribar a tenir un grau d'autosuficiència superior al 80% en aquells països on la radiació solar és elevada. També és molt important destacar que aquests sistemes d'energies renovables tenen un impacte ambiental en part negatiu i que s'ha de seguir innovant i creant noves tecnologies per aconseguir arribar al mínim impacte mediambiental negatiu possible, en tots els aspectes.

Com a resultat directe de les conclusions del treball, es recomana invertir en noves i més assequibles formes d'emmagatzematge d'energia, ja que es considera un tipus de tecnologia clau dins de l'objectiu de la transició energètica.

Índex

Resum	2
1 Glossari	6
2 Introducció	8
2.1 Objectius	9
2.2 Estat de l'art	10
2.3 Abast del projecte	10
2.4 Metodologia	11
3 Elements d'una instal·lació domèstica	12
3.1 Sistemes fotovoltaics	13
3.1.1 Panells solars	14
3.2 Sistemes d'emmagatzematge	15
3.2.1 Tipus de bateries i propietats	16
3.2.2 Visió de futur	18
3.3 Inversor	19
4 Generació d'electricitat a Europa	21
4.1 Preu de l'electricitat	21
4.2 Venda d'electricitat global	23
5 Modelització	25
5.1 Formulació del problema i identificació del model	25
5.2 Dades del sistema	25
5.2.1 Paràmetres tècnics	27
5.2.2 Paràmetres econòmics	29
5.3 Escenaris del model	32
5.4 Construcció del model tecno-econòmic	34
5.4.1 Mòdul de càlcul d'autoconsum	35
5.4.2 Mòdul de càlcul dels indicadors econòmics	37
5.4.3 Mòdul d'optimització de sistemes d'emmagatzematge i PV	38
5.4.4 Mòdul Z: Anàlisi de futur	39
6 Programa de simulació	40
6.1 Funcionament	42

6.2	Fórmules	49
6.2.1	Càlcul de les dades energètiques fotovoltaïques	49
6.2.2	Càlcul de les dades energètiques d'emmagatzematge	49
6.2.3	Càlculs indicadors energètics	50
6.2.4	Càlculs indicadors econòmics	50
7	Resultats experimentals	51
7.1	Potència fotovoltaïca i capacitat de la bateria	51
7.2	Indicadors econòmics	52
7.3	Indicadors energètics	54
7.4	Comparació dels resultats amb altres estudis	56
8	Anàlisi de sensibilitat del model	58
8.1	Potència fotovoltaïca i capacitat de la bateria	58
8.2	Indicadors econòmics	60
8.3	Indicadors energètics	63
9	Impacte mediambiental	66
10	Costos associats al projecte	67
	Conclusions	68
	Bibliografia	71
A	Plec tècnic de característiques d'una placa solar	74
B	Model de regressió per a preus de bateries	76
C	Codi dels programes	78
D	Glossari dels programes	84
E	Índex de figures	87

1 Glossari

Transició energètica: Canvi cap a una economia sostenible mitjançant l'energia renovable, l'eficiència energètica i el desenvolupament sostenible, amb l'objectiu final d'abolir el carbó, l'energia nuclear i altres recursos no naturals.

Abreviatures

- **AC/DC:** Corrent alterna / Corrent contínua
- **BAT:** Bateries
- **FIT:** Feed-in Tariff, mecanisme polític dissenyat per accelerar la inversió en tecnologies d'energies renovables oferint contractes a llarg termini als productors d'energia renovable.
- **IVA:** Impost sobre el Valor Afegit
- **PMP:** Preu Mig Ponderat, preu calculat com a mitjana del preu del kWh diari durant tot el període de facturació.
- **PV:** Energia solar fotovoltaica
- **PVGIS:** Photovoltaic Geographical Information System
- **UE:** Unió Europea
- **VAN:** Valor Actual Net
- **EUA:** Estats Units d'Amèrica

Nomenclatura

- C = Capacitat d'una bateria [kWh]
- C_{bat} = Cost de la bateria [€]
- C_i = Cost d'instal·lació [€]
- C_{inv} = Cost de l'inversor [€]
- $C_{in,t}$ = Flux de caixa entrant en el període t [€]
- $C_{out,t}$ = Flux de caixa sortint en el període t [€]
- C_{pv} = Cost del sistema fotovoltaic [€]

- i = Taxa interna de retorn anual [%]
- I_0 = Inversió inicial [€]
- P_{liti} = Preu de les bateries d'ions de liti [€]
- P_{plom} = Preu de les bateries d'àcid de plom [€]
- q_{pvc} = Taxa d'autoconsum [%]
- q_{pvcd} = Taxa d'autoconsum directe [%]
- q_s = Grau d'autosuficiència [%]
- TE = terme d'energia [€/ kWh]

2 Introducció

Tots els descobriments i invencions que s'estan produint en les últimes dècades en el món de les energies renovables tenen com a objectiu comú substituir l'ús de combustibles fòssils com el carbó, el gas natural i el petroli. Aquest tipus de fòssils provoquen de retruc vessaments de petroli que maten la diversitat de vida aquàtica, produeixen gasos d'efecte hivernacle i l'escalfament global, entre d'altres. Les destruccions mediambientals són cada cop més greus a escala mundial. És urgent que l'ésser humà pugui fer front als problemes ambientals i energètics. El desenvolupament de fonts renovables de cada país depèn en gran mesura de les activitats polítiques i econòmiques orientades als negocis de millora ambiental. Inevitablement, en el futur caldrà construir una societat tenint en compte l'ecologia global, és a dir, una societat en què el desenvolupament econòmic es relacioni estretament i directament amb activitats ecològiques com els moviments de reducció de carboni i d'estalvi energètic.

Ens trobem immersos en una transició energètica, en la que es preveu un canvi estructural en els sistemes de generació i emmagatzemament de l'energia. Tot i així, segons el full de ruta creat per l'organització IRENA, l'energia renovable ha de créixer a un ritme sis vegades major a l'actual perquè el món comenci a complir els objectius marcats en l'Acord de París [1].

S'espera que les fonts d'energia fotovoltaïques continuïn augmentant les pròximes dècades, impulsades per la disminució dels costos dels sistemes solars. L'increment de les economies d'escala, les cadenes de subministrament més competitives i les millores tecnològiques continuaran reduint els costos de l'energia solar. En concret, s'ha previst 20% de la demanda d'electricitat d'Europa sigui abastida per fonts solars al 2030 [2].

L'emmagatzematge de l'energia en bateries es considera un mitjà eficaç per reduir la intermitència de l'electricitat generada pels sistemes solars fotovoltaïcs. Tanmateix, actualment encara no està clar quan i en quines condicions es podrà operar rendiblement l'emmagatzematge en sistemes domèstics.

El creixement en els últims anys de la indústria de les bateries amb la introducció de nous sistemes d'emmagatzematge ha donat lloc a la necessitat de crear i optimitzar nous materials per satisfer les exigències del mercat. Així mateix, continua augmentant la demanda de novetats en membranes separadores, la millora en el rendiment dels materials actuals i també la identificació de nous materials amb alta esperança de vida [3].

Amb aquest escenari de fons, aquest treball pretén estudiar la viabilitat econòmica d'implementació d'un sistema fotovoltaic domèstic amb possibilitat d'emmagatzematge, preveient tant una disminució en els preus actuals dels sistemes d'emmagatzematge com la creació futura de nous sistemes amb prestacions millorades. S'aposta per les bateries d'emmagatzematge d'electricitat en sistemes de generació fotovoltaica domèstica com a element clau per a l'èxit de la sostenibilitat global. Per a estudiar aquest escenari es partirà d'altres estudis del mateix àmbit.

Cada avenç en aquest camp és un pas cap a l'alimentació energètica global a partir d'energies renovables. Per aquesta raó, a la Universitat Politècnica de Catalunya s'ofereixen múltiples propostes d'estudis relacionats amb les energies renovables. Aquesta idea en particular va ser presentada pel tutor del treball, Jordi Olivella Nadal, el qual proposa estudiar l'impacte que poden tenir les bateries a les instal·lacions fotovoltaïques domèstiques. Els dispositius d'emmagatzematge d'energia són un element clau per resoldre la problemàtica horària dels sistemes fotovoltaics, i per aquesta raó és interessant com aquests sistemes poden augmentar el grau d'autosuficiència d'un habitatge.

2.1 Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és estudiar la viabilitat econòmica d'implantar sistemes fotovoltaics amb emmagatzematge d'energia en habitatges de consum domèstic i clima europeu, en funció de l'evolució del preu de les bateries. De la mateixa manera, es pretén estudiar la taxa d'autoconsum i el grau d'autosuficiència d'un habitatge que fa ús de bateries. A més a més, es realitza un anàlisi de sensibilitat de la rendibilitat d'aquestes instal·lacions en funció dels paràmetres més incerts del model.

Aquest objectiu sorgeix sota la hipòtesis d'una futura disminució dels preus de les bateries, recolzada en dos pilars. Per una banda, en els últims anys s'ha observat un abaratiment de les tecnologies d'emmagatzematge domèstic ja existents degut a la baixada de preu dels seus components i processos de fabricació. Per altra banda, el cicle de vida de les tecnologies actuals d'emmagatzematge està arribant a la seva màxima eficiència i s'estan enfocant els esforços en el desenvolupament de noves tecnologies més eficients i que es presenten més econòmiques.

En conclusió, la intenció principal del treball és aportar un granet de sorra dins el context de desenvolupament energètic sostenible en el que ens trobem immersos.

2.2 Estat de l'art

Dins del marc de la transició energètica, moltes universitats i centres de recerca s'han enfocat a estudiar les fonts d'energia renovables i les seves aplicacions. El desplegament de tecnologies d'energies renovables ha augmentat en les darreres dècades a tot el món. En concret, les tecnologies de generació fotovoltaica (PV) s'han convertit en un dels sistemes de generació d'electricitat renovables més populars. Com a tal, és fonamental una avaluació adequada de la competitivitat dels costos i la rendibilitat dels sistemes d'autoconsum per promoure la transició d'edificis autosuficients energètics dependents de la xarxa. En un futur previsible, s'espera que el creixement de l'energia solar fotovoltaica continuï, ja que múltiples nacions participen en estratègies de descarbonització que es basen en energies renovables per mitigar el canvi climàtic.

Diversos treballs s'han enfocat al disseny de sistemes PV, per satisfer la creixent demanda de producció fotovoltaica, considerant l'impacte de diferents components de mòduls i cèl·lules, així com de les variables econòmiques. Alguns dels sectors d'estudi són el dimensionament més rendible d'una instal·lació fotovoltaica en funció dels perfils de consum de l'habitatge [4], la viabilitat de la inversió en sistemes fotovoltaics residencials a diferents regions com Portugal [5], Anglaterra [6], Itàlia [7] o Iran [8], o l'optimització de sistemes fotovoltaics amb emmagatzematge a partir d'un model [8], [9], [10]. Tot i centrant-se en diferents aspectes, la gran part dels estudis actual conclouen que actualment ja és òptim i rendible implementar sistemes fotovoltaics en aquells països amb irradiacions solars relativament elevades. Pel que fa a l'emmagatzematge, es descriu com a un factor imprescindible en les instal·lacions futures tot i que actualment, encara no està clar quan i en quines condicions pot funcionar de manera rendible en sistemes fotovoltaics residencials sense suport dels governs.

Finalment, els estudis actuals s'enfoquen en la viabilitat econòmica i energètica actual en funció de diferents paràmetres. D'altres estudis busquen els el rendiment dels mòduls fotovoltaics a partir de diferents models d'optimització. La diferència que aquest treball pretén aportar en el camp és l'estudi de la viabilitat econòmica **en funció de la disminució del preu de les bateries**.

2.3 Abast del projecte

El projecte se centrarà en l'estudi de la rendibilitat econòmica i no pretén endinsar-se en aspectes tècnics sobre el sistema elèctric de la instal·lació. Tampoc no pretén comparar a fons les diferents tecnologies existents i en desenvolupament de sistemes d'emmagatzematge.

D'altra banda, l'estudi es focalitzarà en instal·lacions d'autoconsum connectades a xarxa (i no aïllades) de menys de 10 kW de potència instal·lada.

2.4 Metodologia

En primer lloc es descriuen els components d'una instal·lació domèstica habitual, emfatitzant-ne tres més rellevants: Els mòduls solars, els sistemes d'emmagatzematge i els inversors. En relació amb els sistemes d'emmagatzematge, s'aprofundeix en algunes tecnologies actuals i s'explica les perspectives de futur que es preveuen per a aquestes tecnologies, sobre les quals es recolza la hipòtesis inicial d'aquest projecte (secció 3).

A continuació, es fa una breu explicació sobre la situació dels mercats d'electricitat i les polítiques que es poden trobar arreu del món, i més concretament a Europa i Espanya (secció 4).

El següent punt que es tracta és la definició del model de simulació (secció 5). Dins d'aquesta secció s'hi troben la descripció dels escenaris de generació solar i consum de l'habitatge que s'estudien. Tot seguit, es descriu el programa escrit amb *Python*, usat per a dur a terme la simulació (secció 6).

Després es retraten els resultats obtinguts a la simulació, mitjançant gràfiques que indiquen la potència fotovoltaica i la capacitat de la bateria que maximitzen el VAN en un període de 25 anys, així com també s'estudien diferents indicadors econòmics i energètics (secció 7). Per completar els resultats es realitza una anàlisi de sensibilitat del model davant de dos dels paràmetres que depenen en gran mesura de la situació geogràfica i l'estat del mercat: els costos de manteniment i d'instal·lació (secció 8). També es comparen els resultats amb d'altres estudis.

Per últim, es realitza un estudi de possibles impactes ambientals dels sistemes de generació solar amb emmagatzematge (secció 9) i es fa un recopilatori de les conclusions que es poden extreure d'aquest projecte.

3 Elements d'una instal·lació domèstica

Una instal·lació domèstica acostuma a contenir els següents elements:

1. Càrregues DC/AC de l'habitatge que consumeix l'energia
2. Components fotovoltaics
3. Components d'emmagatzematge
4. Inversors
5. Altres elements elèctrics: proteccions, reguladors de càrrega , cablejat i elements de control dels sistema

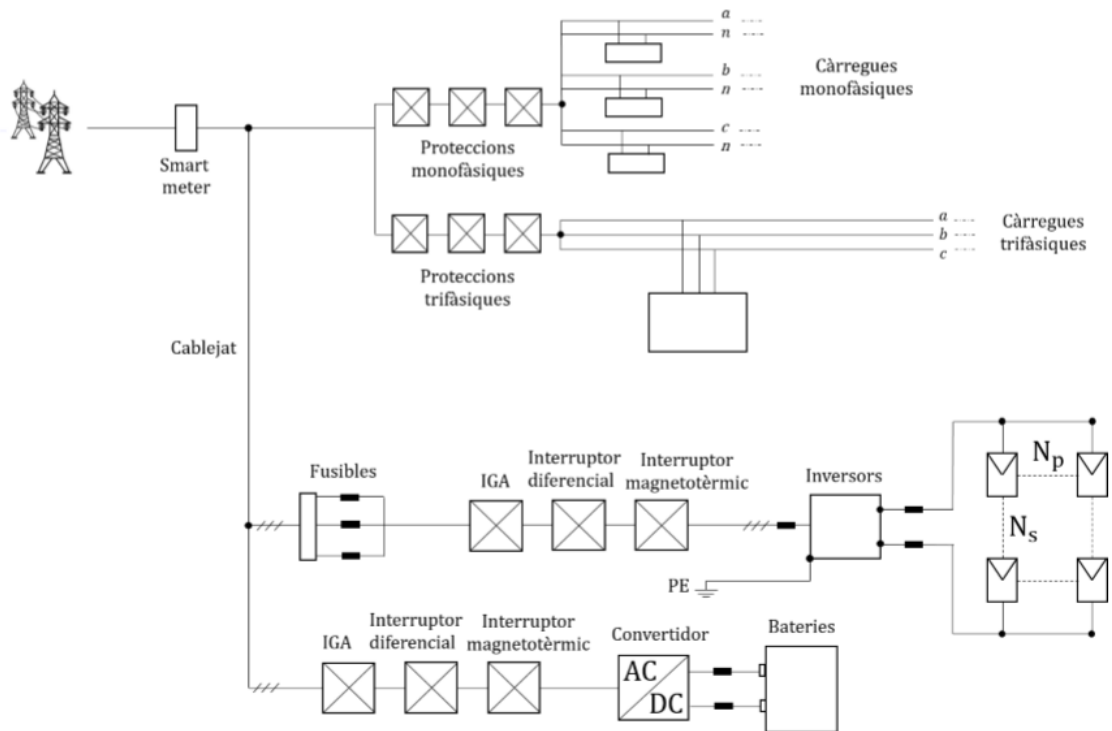


Figura 1: Esquema elèctric general d'una instal·lació domèstica.

3.1 Sistemes fotovoltaics

Actualment, l'energia solar s'utilitza a tot el món i és cada cop més popular per generar electricitat o escalfar i dessalar aigua. Les instal·lacions solars fotovoltaïques es poden combinar per a proporcionar electricitat a escala comercial, o bé disposar-se en configuracions més petites per a instal·lacions d'ús personal, com és el cas d'aquest estudi. D'aquesta manera, s'està permetent als consumidors produir energia per a les seves pròpies necessitats i alimentar l'excedent d'energia a la xarxa. És un benefici per a les economies avançades i el món en desenvolupament, on el desplegament pot accelerar la transició energètica, proporcionar electricitat moderna i millorar la vida de milions de persones.

L'ús d'aquesta tecnologia ha augmentat en gran mesura en els últims anys. Això mateix s'observa a Figura 2, que mostra les tendències de capacitat instal·lada en el món en els darrers anys.

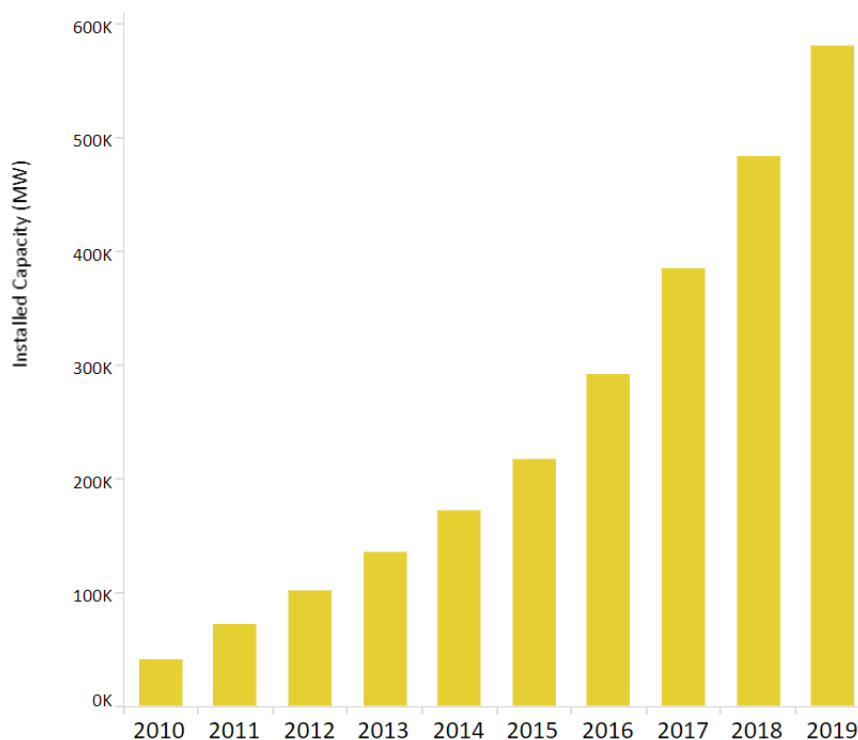


Figura 2: Tendències de capacitat solar instal·lada en el món en els darrers anys [11].

A més a més, el cost de la fabricació de plaques solars s'ha reduït de forma espectacular en l'última dècada, cosa que les fa no només assequibles, sinó sovint la forma d'electricitat més barata. A la Figura 3 s'observa el gràfic de l'evolució dels cost en funció de la tecnologia de la cel·la fotovoltaïca. Es preveu que en un futur continuï baixant el preu de les tecnologies actuals i es dissenyin noves tecnologies més eficients i més econòmiques.

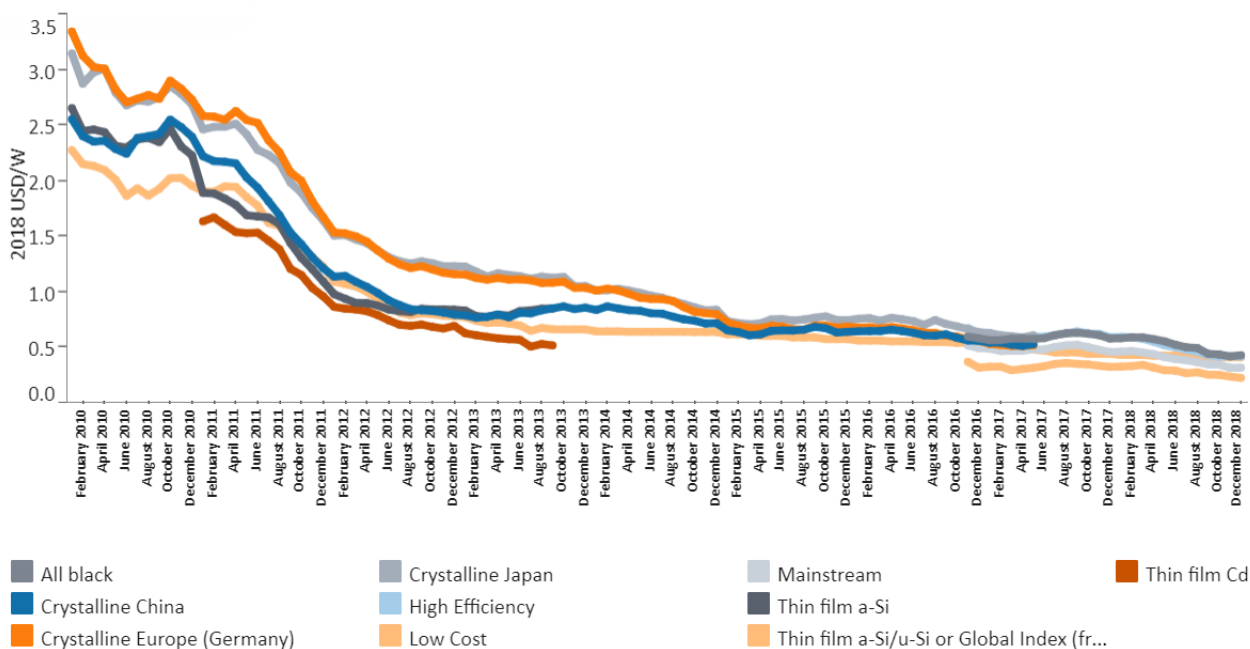


Figura 3: Gràfic de l'evolució del cost de l'energia solar en funció de la tecnologia de la cèl·la, durant el període 2010-2018 [11].

3.1.1 Panells solars

Les plaques solars aprofiten la radiació que produeix el sol per convertir-la en energia elèctrica. El seu funcionament es basa en les cèl·lules fotovoltaïques formades per materials semiconductors que s'exciten al rebre radiació solar i generen canvis de potencial entre els seus extrems. Les cèl·lules fotovoltaïques s'acoblen en mòduls fotovoltaïcs i així es proporciona una tensió nominal més alta als terminals del panell. Quan s'aplica la tensió es genera un corrent continu que passa a un regulador que s'ocupa d'eliminar el soroll i transmetre un potencial constant. Abans de passar a la instal·lació el corrent passa per diversos inversors.

Els panells solars tenen una vida útil aproximada de 25-30 anys [11] i disposen de diverses característiques en funció del tipus de material emprat en la fabricació.

Els panells fotovoltaïcs més utilitzats en el mercat actual estan fets de **silici** i en funció del tipus de cèl·la es divideixen en: **monocristal·lins**, **poli cristal·lins** i **amorfs**. Aquestes tres tecnologies són les que destaquen sobre la resta i s'instal·len en el 90% dels sistemes fotovoltaïcs actuals.

De les tres opcions, els panells formats per cèl·lules de silici monocristal·lí, són els de major rendiment (13-17%), encara que la seva producció es la més complexa, ja que requereix més temps i consum d'energia en la seva fabricació, i també la més cara. Per contra, els panells de silici amorf,

són simples de fabricar i més barats que els altres dos, presenten forma de làmina prima de silici, que es diposita sobre una altra làmina de vidre, de metall o de plàstic però el rendiment és molt menor (6-8%).

En termes generals, els panells policristal·lins són els que generalment es recomanen per a les cases domèstiques ja que tenen un preu raonable, no tan elevat com els monocristal·lins, i una eficiència raonable també, no tan baixa com en el cas dels de capa fina. No obstant això, si la llar té problemes d'espai o es troba en una zona amb temperatura excessivament altes s'ha d'optar pels panells monocristal·lins ja que requereixen poca superfície i funcionen millor que els policristal·lins a altes temperatures. Per l'altre banda, si la casa té molta superfície disponible els panells de capa fina serien una bona opció.

S'escullen les plaques de **silici policristal·lins** per a dur a terme la simulació, ja que presenten una bona relació qualitat-preu i en aquest estudi no es tenen en compte restriccions d'espai ni temperatures de funcionament excessivament altes.

En concret, s'escull un model que suposa una bona opció en el mercat actual i que té unes característiques semblants a la majoria de plaques del mateix tipus, la placa Talesun de 270 W. Les seves característiques principals es troben a la taula a continuació. A l'Annex A s'hi troba el plec tècnic.

Nom	Eficiència	Dimensions [m]	Preu [€]	Potència nominal [W]
Panell Solar 270W Talesun Policristal·lí [12]	16,5%	1,65 x 0,992	138,61	270

3.2 Sistemes d'emmagatzematge

Els sistemes fotovoltaics domèstics depenen directament del recurs natural solar. Això suposa un gran desavantatge per aquest tipus d'energia. Per una banda, no és capaç de subministrar energia durant hores de poca radiació solar o nocturnes i per l'altre, és capaç de generar pics d'energia molt grans en un espai temporal reduït, els quals poden arribar a cobrir i sobrepassar la demanda de càrrega, generant energia sobrant. Gràcies a la millora de les tecnologies d'emmagatzematge i a la disminució dels costos, la instal·lació d'un sistema de bateries sembla una solució prometedora.

Una bateria consisteix en una o més cèl·lules electroquímiques connectades elèctricament que emmagatzemen energia química en els seus dos elèctrodes, l'ànode i el càtode. D'aquesta mane-

ra, la bateria converteix l'energia química en energia elèctrica en descàrrega. Existeixen bateries primàries i secundàries. Una bateria **primària** aporta energia elèctrica fins que s'escot la seva energia química, després ja no és d'utilitat. Una bateria **secundària**, també anomenada bateria recarregable o acumulador, pot restablir la seva energia química gastada mitjançant l'aplicació d'un corrent de càrrega en una direcció oposada a la del corrent de descàrrega. En instal·lacions PV s'usen bateries secundàries.

Actualment s'utilitzen les següents bateries: Les bateries d'àcid de plom s'utilitzen sovint en sistemes d'energia renovable. Les bateries de liti, tot i que més cares que l'àcid de plom, són cada cop més assequibles i poden tenir una vida molt més llarga. Les bateries de ferro níquel són més difícils de trobar i són menys eficients que les de plom-àcid o les d'ions de liti, però tenen una vida molt llarga. Les bateries de flux (brom de zinc i vanadi redox) i les bateries de volants d'inèrcia es poden utilitzar en sistemes d'energia renovable, però són complexes i cares.

Concretament, en aquest treball s'estudia la implementació de bateries d'àcid de plom (les més usades en les instal·lacions solars domèstiques) i de liti (com a alternativa amb menys impacte mediambiental i més nova).

3.2.1 Tipus de bateries i propietats

L' **àcid de plom** és una tecnologia comprovada i actualment més barata, però que requereix un manteniment regular i no dura tant.

Les **bateries de liti** són una tecnologia de bateries amb una vida útil més llarga i una eficiència més elevada, però amb un cost unes 3,5 vegades més elevat [9].

A continuació s'exposen les propietats generals que defineixen una bateria i es comparen amb els dos tipus de bateries que s'usen en aquest estudi:

- **Vida útil**

La vida útil de les bateries no es mesura en termes d'anys, sinó de cicles que poden realitzar. La vida útil d'una bateria secundària és el nombre de cicles de descàrrega / càrrega que pot suportar abans de perdre el 20% de la seva capacitat. Cal tenir en compte que una bateria en una casa de vacances pot passar per 100 cicles en 4 anys, mentre que la mateixa bateria pot passar per més de 300 cicles en un any en una residència a temps complet. La bateria que només ha passat 100 cicles estarà en millor estat.

Tot i així, fent un ús regular de la bateria, Si la capacitat del banc de bateries és prou gran i l'ús és baix , la durada de la bateria hauria de ser d'almenys 10 anys [13].

- **Eficiència [%]**

L'eficiència és l'energia elèctrica gastada en descàrrega dividida per l'energia elèctrica guanyada en càrrega. Les bateries de liti són més eficients. Les bateries d'àcid de plom només són d'un 80-85% eficients segons el model i l'estat. En canvi, l'eficiència de les bateries de liti és més del 95%.

- **Densitat energètica [Wh / L]**

La densitat energètica és l'energia específica (energia partida pel pes) que és capaç d'emmagatzemar una cel·la. Depèn del voltatge de la cel·la i de la càrrega total per quilogram que es transporta entre els elèctrodes. La densitat energètica de les bateries de liti és molt superior a les de plom-àcid, el que significa que tenen més capacitat d'emmagatzematge en menys espai, però pel contrari pesen menys pel mateix volum.

- **Profunditat de descàrrega**

La profunditat de descàrrega es refereix a quanta capacitat global s'utilitza abans de recarregar la bateria. Per exemple, si s'utilitza una quarta part de la capacitat de la bateria, la profunditat de descàrrega seria del 25%. Les bateries no es descarreguen completament sinó que tenen una profunditat de descàrrega recomanada. Més enllà d'aquest punt, s'arrisca negativament la seva vida útil.

Les bateries d'àcid de plom només han de passar fins a un 50% de profunditat de descàrrega. En canvi, les bateries de liti poden suportar descàrregues profundes del 80% o més. Això significa que essencialment tenen una capacitat útil més gran[14].

- **Capacitat [Ah]**

La capacitat d'una bateria és la quantitat d'electricitat que pot emmagatzemar durant la càrrega i durant la descàrrega. Si una bateria té, per exemple, una capacitat de 100 Ah, significa que teòricament pot donar un corrent de 10 A durant,10 h, o d'1 A durant 100 h, etc. En realitat això no és així pel fet que, entre altres coses, com més ràpidament es descarrega una bateria, més energia es perd per la resistència interna. Per aquest motiu la capacitat de

càrrega se sol donar referida a un temps estàndard de descàrrega, i per a un voltatge final determinat. En aquest estudi la capacitat s'expressa en kWh per a un voltatge de 24 V i per a C100.

La bateria d'àcid de plom proporciona una descàrrega ràpida de cel·les i és relativament barata. Aquesta bateria ha dominat el mercat de les bateries recarregables, però el Pb és pesat i la densitat d'energia pràctica de la bateria és només del 25% de la seva limitada teòrica.

3.2.2 Visió de futur

El futur de la tecnologia de les bateries és un tema d'intensa discussió tant a l'àmbit acadèmic com a la indústria. Els investigadors coincideixen en que la tendència és cap a la disminució de costos i el desenvolupament de noves tecnologies que millorin les propietats dels sistemes d'emmagatzematge.

Actualment, la investigació sobre bateries se centra en dues àrees tecnològiques diferents: les bateries d'ions de liti i les bateries *post-liti*, que es troben a l'etapa de recerca.

Les bateries de liti disponibles actualment aconseguixen densitats d'energia relativament altes i tenen una durada de diversos milers de cicles de càrrega / descàrrega. Tot i això, si bé es poden reduir encara més els costos mitjançant composicions i fabricació de materials optimitzades, la densitat d'energia assolible pot arribar aviat al seu límit fisicoquímic. A més a més de la mateixa manera que els combustibles fòssils, el liti també prové de l'excavació de terra, cosa que significa que aviat pot arribar al seu límit. En vista d'aquestes limitacions, la demanda de rendiments encara millors, especialment densitats energètiques més elevades i menors costos, ha desencadenat investigacions sobre noves tecnologies amb ions de sodi, liti-sofre, liti-aire i bateries d'oxigen-liti. Actualment, aquestes tecnologies estan en fase de recerca [15].

A la Figura 4 s'observa un gràfic on s'hi troben alguns exemples de tecnologies actuals i en període de recerca. La visió general que se'n pot treure és la gran quantitat de noves tecnologies que segueixen aflorant i investigant-se i la tendència a baixar de preu.

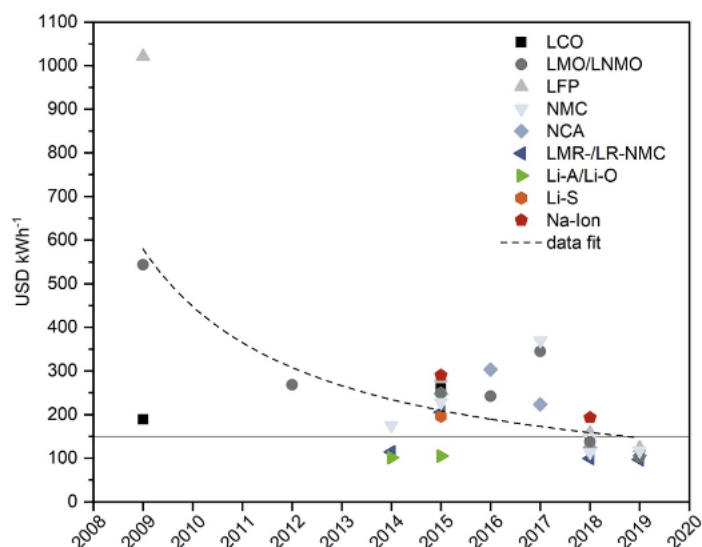


Figura 4: Gràfic del desenvolupament del cost de les bateries agrupat per tecnologia catòdica. Cada punt de dades representa el valor mitjà anual per tecnologia[15].

En conclusió, la conscienciació dels grans beneficis socials que es poden derivar de les noves tecnologies de bateries està promovent una **àmplia activitat de recerca** que promet un desenvolupament continuat i una **disminució dels costos dels sistemes d'emmagatzematge**.

3.3 Inversor

En qualsevol sistema basat en PV, l'inversor és un component crític responsable del control del flux d'electricitat entre els mòduls, la bateria, les càrregues i la xarxa. Una instal·lació domèstica pot constar de:

- Un inversor solar, per connectar els panells solars fotovoltaics (PV). És un tipus de convertidor elèctric que converteix la sortida de corrent continu d'un panell solar fotovoltaic en un corrent altern que pot ser alimentat en una xarxa elèctrica comercial o utilitzat per una xarxa elèctrica local, fora de xarxa. Els inversors d'energia solar tenen funcions especials adaptades per al seu ús amb matrius fotovoltaiques, incloent el seguiment del punt de màxima potència i la protecció del sistema.
- Un inversor per les bateries, per convertir l'energia de la bateria a 230 V AC (potència de la xarxa) i viceversa.

Hi ha diverses opcions diferents de connexionat dels inversors en sistemes fotovoltaics amb emmagatzematge (s'ha consultat amb un expert sobre el tema):

- Opció 1: 2 convertidors DC/DC + 2 inversors independents (el DC/DC en algun cas es podria eliminar)
 - PV+DC/DC1+DC/AC1
 - BAT+DC/DC2+DC/AC2

- Opció 2: 2 convertidors DC/DC + 1 inversor (en aquest cas, el DC/AC és el mateix).
 - PV+DC/DC1+DC/AC
 - BAT+DC/DC2+DC/AC

En aquest estudi es considera l'Opció 2, amb la qual només és necessari **un inversor**. Els convertidors DC/DC s'englobaran amb els costos de la resta de la instal·lació, ja que el seu preu és relativament baix comparat amb el de l'inversor.

4 Generació d'electricitat a Europa

Europa presenta una gran quantitat d'energies renovables i en els últims anys s'ha convertit en líder en impulsar el desplegament de tecnologies renovables. Els esforços per augmentar la sostenibilitat dels sistemes energètics a Europa continuen, amb objectius d'energia renovable establerts per a tots els països europeus i l'objectiu dels membres de la Unió Europea (UE) d'esdevenir “el número u mundial en renovables”, segons el president de la Comissió Europea, Jean -Claude Juncker.

La UE ha adoptat objectius per aconseguir una quota del 32% d'energies renovables en el consum d'electricitat al 2030 [11].

4.1 Preu de l'electricitat

El preu de l'energia a la UE depèn d'una sèrie de condicions d'oferta i demanda molt diverses, incloent-hi la situació geopolítica, la combinació d'energia nacional, la diversificació d'importacions, els costos de xarxa, els costos de protecció del medi ambient, les condicions meteorològiques severes o els impostos. Els preus es decideixen al mercat majorista de forma diària. El gran gruix, més del 40%, és la part regulada. Respon als peatges de transport i distribució i altres impostos, com el de l'electricitat i l'IVA [16].

Cada mercat utilitza tarifes diferents. A Espanya per exemple, existeix el mercat regulat i el mercat lliure. En el mercat regulat s'hi poden trobar tarifes per hores o tarifes PMP, en canvi en el mercat lliure és l'empresa comercialitzadora qui estableix el preu de la llum que cregui convenient per a cadascuna de les seves tarifes i és el client qui tria la tarifa que més li convingui. Per aquesta raó, en aquest estudi s'aposta per utilitzar el **valor de preu mitjà per kWh a la UE per a dur a terme la simulació**.

A la Figura 5 s'hi poden observar els preus de l'electricitat a la segona meitat del 2019. Entre els més elevats s'hi troben Dinamarca (0,2924 €/kWh), Alemanya (0,2873 €/kWh) i Bèlgica (0,2860 €/kWh). Els preus més baixos de l'electricitat es van situar a Bulgària (0,0958 €/kWh), Hongria (0,1097 €/kWh) i Lituània (0,1254 €/kWh). S'ha de tenir en compte que els preus presentats en aquesta figura **inclouen impostos**, taxes i IVA per als consumidors domèstics.

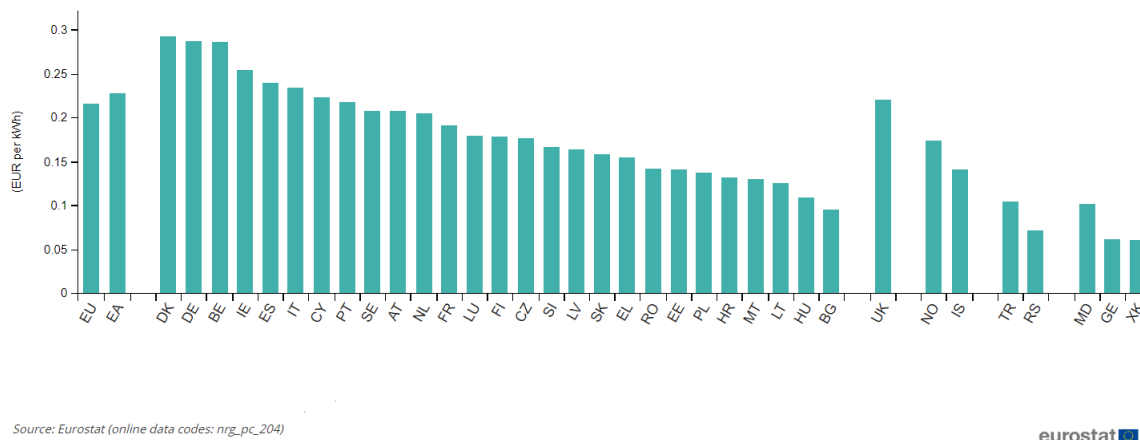


Figura 5: Preu de l'electricitat (amb impostos) per als consumidors domèstics, segon semestre del 2019, [€/kWh] [17].

És interessant estudiar les variacions de preus en els últims anys. A la Figura 6 s'hi observa l'evolució dels preus de l'electricitat a la UE i altres països d'Europa. El preu sense impostos va augmentar lleugerament més ràpid que la taxa d'inflació general (PIB) fins al segon semestre del 2013, quan va ser de 0,1338 €/kWh. No obstant això, des del 2014 es va mantenir bastant estable i es situa ara en 0,1280 €/kWh, lleugerament inferior al preu del primer semestre del 2008 ajustat per a la inflació. Per contra, el pes dels impostos ha augmentat contínuament del 31,2% el 2008 al 40,7% el 2019. Com a conseqüència, el preu total dels consumidors domèstics, és a dir, tots els impostos, va ser substancialment superior (15%) en la segona meitat de El 2019 que el primer semestre del 2008 es va ajustar a la inflació [17].

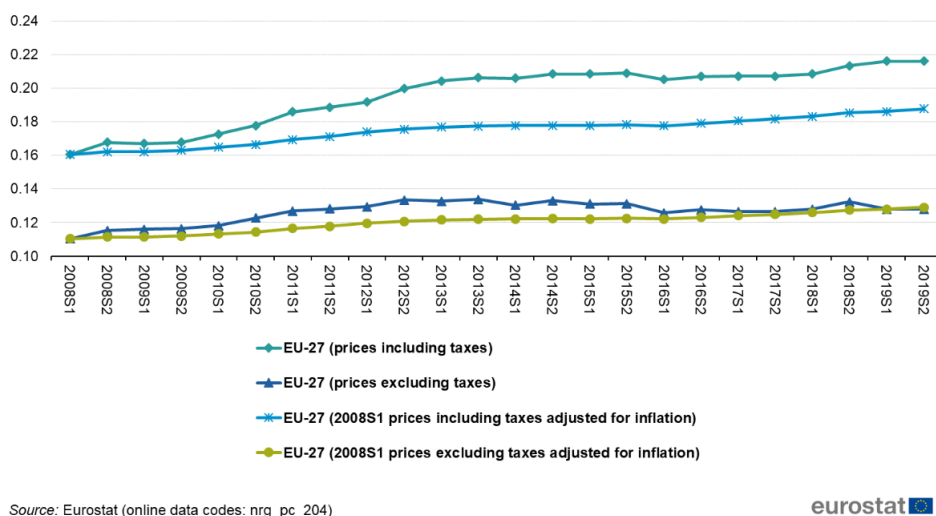


Figura 6: Evolució dels preus d'electricitat per als consumidors domèstics durant el període 2008-2019 [€/kWh] [17].

Tenint en compte les dades exposades, en aquest estudi s'utilitza un preu de **0,1280 €/kWh** (preu a principis de 2020), el qual inclou impostos. A més a més, veient que els preus s'han mantingut relativament estables des del 2013 (augmentant lleugerament si es té en compte la inflació), **no es considera un augment o disminució del preu.**

4.2 Venda d'electricitat global

El sector energètic està canviant molt ràpidament. No només estan canviant les tecnologies, les empreses i els drets de propietat, sinó que també es produeixen canvis fonamentals en el paradigma de la regulació del sector energètic. Fa cinquanta anys, les empreses energètiques estatals mantenen els drets de monopoli en la producció, el transport i el subministrament d'energia. Durant les últimes dècades, el mercat energètic ha canviat ràpidament des de la generació centralitzada fins a consumidors d'energia que també es converteixen en productors [18].

El mètode més usat de venda d'electricitat és l'anomenat balanç net de l'electricitat (FIT en anglès), el qual és un mecanisme de política dissenyat per accelerar la inversió en tecnologies d'energies renovables oferint contractes a llarg termini als productors d'energia renovable. Permet abocar a la xarxa elèctrica l'excés produït per un sistema d'autoconsum amb la finalitat de poder fer ús d'aquest excés en un altre moment. D'aquesta manera, la companyia elèctrica que proporcioni l'electricitat quan la demanda sigui superior a la producció de sistema d'autoconsum, descomptarà en el consum de la xarxa de la factura, els excessos abocats a la mateixa.

En els últims anys, a causa del creixent auge de petites instal·lacions d'energia renovable, l'autoconsum amb balanç net ha començat a ser regulat en diversos països del món, sent una realitat en països com Alemanya, Holanda, Portugal, Grècia, Itàlia, Dinamarca, Japó, Austràlia, Estats Units, Canadà i Mèxic, entre d'altres.

Per posar-ne un exemple, el govern alemany va introduir la *Llei sobre les energies renovables* al 1990. Això va fer que els propietaris d'instal·lacions d'energies renovables tinguessin garantit un preu superior al mercat per kWh per la potència que van alimentar a la xarxa durant un període de vint anys. Amb la reforma posterior, aquesta ha estat substituïda per un sistema de subhastes per a instal·lacions noves amb una mida determinada [19].

Als Estats Units, com a part de la *Llei de Política Energètica* de 2005, totes les operadores han d'oferir FIT, a requeriment dels seus clients.

També és un tema present en les legislacions del Parlament Europeu, el qual estableix els drets dels ciutadans per produir, consumir, vendre i emmagatzemar energia renovable [20].

Com que aquest és un tema que es desenvolupa dia rere dia, s'ha decidit treballar amb els escenaris que es presenten actualment a un dels països de la UE, Espanya. Es va publicar un decret (RD 244/2019) el passat 2019 que estipulava els següents escenaris de xarxes d'autoconsum: [21]:

- **Autoconsum sense excedents.** Són instal·lacions que necessiten un equip antiabocament que garanteixi que no s'aboquin els excedents d'energia a la xarxa. La seva tramitació administrativa és mínima.
- **Autoconsum amb excedents.** Són aquelles instal·lacions que en certs moments enviaran energia solar a la xarxa elèctrica, per exemple un habitatge sense activitat en hores centrals del dia. Dins d'aquesta modalitat es distingeixen dos blocs importants:
 - **Modalitat amb excedents aollits a compensació.** En aquesta modalitat la comercialitzadora elèctrica compensarà en la nostra factura elèctrica l'energia abocada a la xarxa. A aquesta modalitat podran acollir els habitatges i les indústries amb potències instal·lades inferiors a 100 kW.
 - **Modalitat amb excedents no aollida a compensació simplificada.** Aquestes instal·lacions són aquelles, en principi majors de 100 kW, els excedents seran bolcats a la xarxa però en règim de venda, no de compensació. El preu de l'energia abocada serà el que disposa la legislació d'instal·lacions generadores d'electricitat.

L'objecte d'aquest estudi són els habitatges domèstics, connectats a la xarxa. Es considera que aquests habitatges són del tipus *Autoconsum amb excedents, modalitat amb excedents aollits a compensació*. Aquest escenari no contempla intercanvi de diners, és a dir, no es pot superar o exigir una compensació més enllà del que es consumeixi de la xarxa. D'aquesta manera només es pot fer servir com una variable de participació en el sistema energètic, però no com un negoci de generació.

Actualment, depenent de la companyia elèctrica i de la tarifa, els preus de venda d'electricitat a la xarxa a Espanya es troben sobre uns **6 cèntims d'euro per kWh** [22]. S'usarà aquest terme de l'energia per a dur a terme l'estudi, però s'ha de tenir en compte que aquesta suposició està sotmesa a probables variacions en el futur.

5 Modelització

5.1 Formulació del problema i identificació del model

L'emmagatzematge de les bateries es considera generalment un mitjà eficaç per reduir la intermitència d'electricitat generada pels sistemes fotovoltaics (PV) solars. Tanmateix, actualment encara no està clar quan i en quines condicions es pot operar de forma rendible l'emmagatzematge de la bateria en sistemes fotovoltaics residencials sense suport de la política. L'objectiu d'aquest model de simulació és investigar la viabilitat econòmica de l'emmagatzematge de bateries per a PV domèstic a Europa en diferents escenaris futurs de preus dels sistemes d'emmagatzematge.

El model que s'implementa és discret, els esdeveniments es simularan de forma discreta (resolució horària), evitant així l'ús d'eines matemàtiques més complexes.

5.2 Dades del sistema

A les seccions posteriors, s'explica el disseny i els paràmetres d'entrada del model tecno-econòmic. Seguint la generació lògica representada a Fig. 1, primer es descriu la disposició del sistema i els límits. A continuació, es presenten els paràmetres tècnics i econòmics d'entrada del model, inclosos els escenaris de consum que s'utilitzen. Més endavant, es proporciona una explicació detallada dels diferents mòduls del model i s'analitzen les interaccions per produir els resultats de la simulació. Les sortides del model i l'anàlisi de sensibilitat que es realitza es descriuen posteriorment.

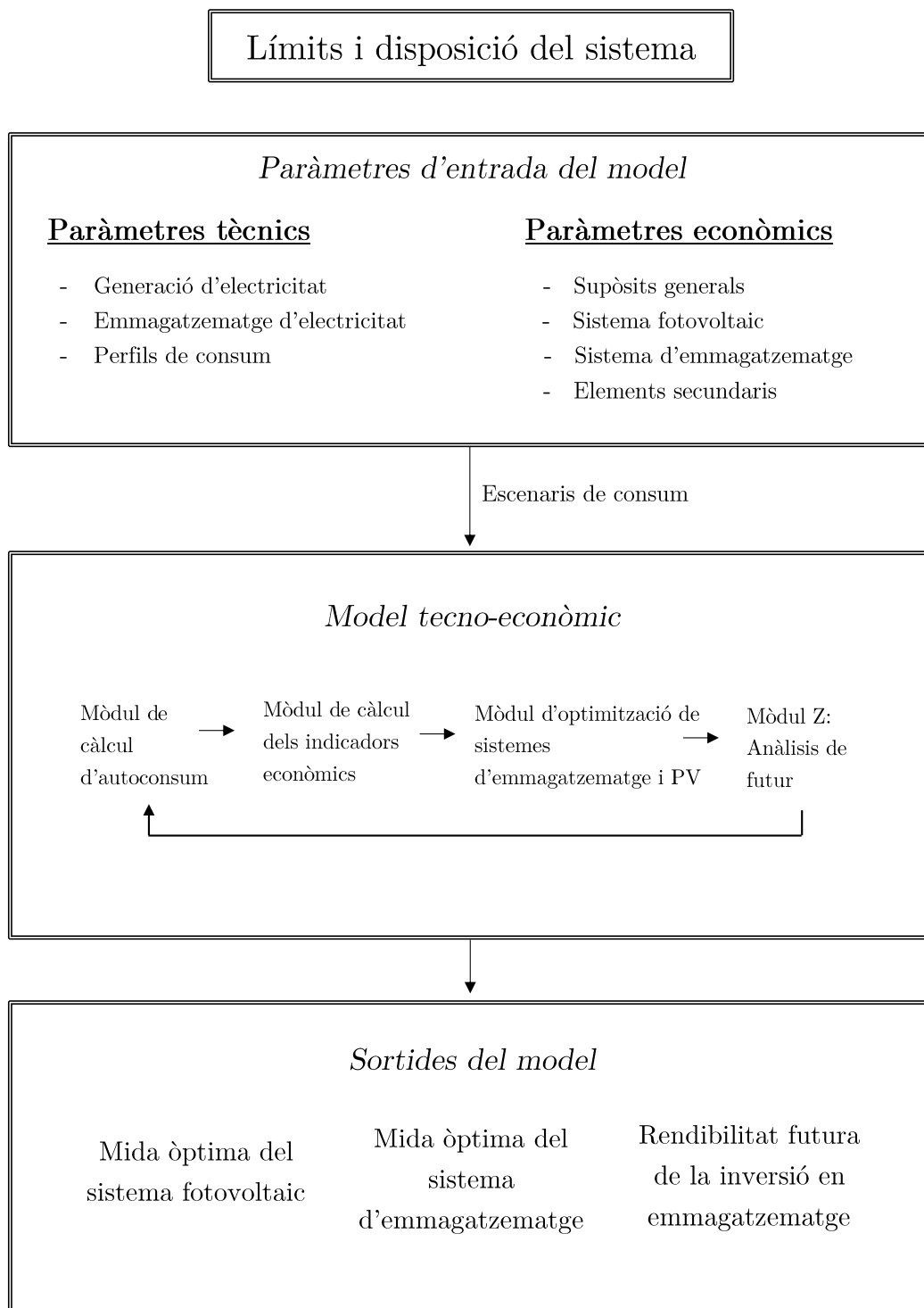


Figura 7: Esquema lògic de la secció 5.

5.2.1 Paràmetres tècnics

Els paràmetres tècnics es divideixen en tres categories: generació d'electricitat, emmagatzematge d'electricitat i càrrega elèctrica. A continuació, es discuteix per separat cada una de les categories.

- **Generació d'electricitat**

La generació solar d'un sistema fotovoltaic depèn de diversos factors:

- Irradiació solar
- La temperatura ambient i superficial de les plaques
- Inclinació de les plaques
- Orientació de les plaques
- Característiques tècniques i de rendiment de les plaques
- Pèrdues del sistema degudes a pèrdues al cablejat, inversors de potència, brutícia (de vegades neu) als mòduls, etc.

En aquest estudi s'empra el programa Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), que extreu la informació de la base de dades de radiació solar PVGIS-SARAH, de l'any 2016 (any més actual pel qual es proporcionen dades).

S'introdueixen els següents paràmetres:

1. Localització global:

- Clima continental humit: **Berlín**
- Clima temperat mediterrani: **Barcelona**

2. **Muntatge fix.** Aquest tipus de sistemes fotovoltaics tenen els seus mòduls muntats en una posició fixa, que no canvia durant el dia ni durant l'any. Aquest és el tipus de sistema fotovoltaic més comú.

3. PVGIS calcularà la inclinació i l'orientació / l'azimut dels mòduls fotovoltaics que proporcionen la màxima producció d'energia durant tot l'any. Això suposa que el muntatge dels mòduls fotovoltaics es manté fix durant tot l'any. Sovint els terrats no tenen la possibilitat d'aconseguir la inclinació i orientació òptimes, de manera que en trauran un rendiment entre 0,8 i 0,95.

4. S'incorporen les característiques de la placa escollida:

- (a) Cèl·lules cristal·lines de silici
- (b) Potència PV màxima instal·lada [kWp]. S'obté del plec tècnic de característiques de les plaques (Annex A).
- (c) Pèrdues del sistema. Es dona un valor predeterminat del 14% per a les pèrdues totals [23].

Finalment, el programa proporciona un fitxer en format *.csv*, que conté un recopilatori dels supòsits seleccionats, els angles òptims d'inclinació i orientació i les dades de generació horària durant l'any seleccionat per a 1 kWp de potència instal·lada.

• Emmagatzematge d'electricitat

Com s'ha exposat a la secció 3.2, s'escullen com a opcions possibles les bateries d'**àcid de plom** i les de **liti**, com a tecnologia d'emmagatzematge del model.

En comparació amb altres tecnologies de bateries, les bateries d'àcid de plom tenen una vida útil curta i una baixa densitat d'energia i potència. Tot i això, actualment, per la seva elevada fiabilitat, la baixa descàrrega i els baixos costos d'inversió i manteniment, són la tecnologia dominant en aplicacions domèstiques.

A llarg termini, l'àcid plom es podria substituir per les bateries de liti que posseeixen millors característiques d'envelliment i una major eficiència energètica. Actualment, però, les bateries d'ions de liti es mantenen en una fase de desenvolupament i son bastant més cares que les de plom-àcid.

• Perfils de consum

S'utilitzen perfils de càrrega estàndard per al consum elèctric amb una resolució horària. Es fa ús del programa de simulació de perfils de consum Load Profile Generator [24].

Es defineixen **tres perfils de consum** simulant un perfil de consum baix, moderat i elevat, dins del marc d'habitatge domèstic. Les característiques dels tres perfils són les següents:

- **Perfil de consum baix:** Es simula l'estil de vida d'una persona soltera amb feina, amb hàbits d'estalvi energètic.

- **Perfil de consum moderat:** Es simula l'estil de vida d'una parella amb feina.
- **Perfil de consum elevat:** Es simula l'estil de vida d'una família amb dos fills, els dos pares aturats i sense hàbits d'estalvi energètic.

5.2.2 Paràmetres econòmics

A continuació, es presenten els paràmetres d'entrada econòmica del model. Es revisen alguns supòsits generals i discuteix els supòsits sobre els costos del sistema fotovoltaic, el sistema d'emmagatzematge i els preus d'altres elements de la instal·lació. És important tenir en compte que, tot i que s'ha realitzat una recerca d'estudis anteriors i dades de mercat per identificar els valors d'entrada del model, sovint el ventall de valors possibles continua sent relativament ampli.

Més endavant, es realitzarà una anàlisi de sensibilitat per comprovar la robustesa del canvi contra el model en els altres paràmetres d'entrada.

- **Supòsits generals**

- Com es modela una casa a Europa, s'escull l'euro com a moneda. S'utilitza un tipus d'interès del 0,01 anual.
- Per a la col·locació de les plaques, s'utilitza la inclinació i orientació òptimes. (secció 5.2.1)
- El preu de l'energia es calcula segons el preu mig del kWh a Europa al 2020. (secció 4.1)
- No es contempla cap limitació de superfície.

- **Sistema fotovoltaic**

Els costos del sistema fotovoltaic recauen en els mòduls solars, i depenen del preu per W_p que es consideri. En aquest cas, utilitzant les característiques del mòdul descrites a l'apartat 3.1, s'utilitzarà un preu de $0,48 \text{ €/}W_p$. Aquest número concorda amb els valors generals que s'utilitzen en estudis de perfil tècnic [9] ($0,75 \text{ €/}W_p$) [5] ($0,35 \text{ €/}W_p$).

- **Sistema d'emmagatzematge**

El cost d'implementació d'un sistema d'emmagatzematge és funció principalment de la **capacitat de la bateria** i del **temps de descarrega** d'aquesta. Per a instal·lacions fotovoltaïques per a l'autoconsum, els valors de temps de descarrega oscil·len entre C100 i C120, els quals proporcionen

bateries de dimensions necessàries per a durar durant 3 i 6 dies, depenent de la instal·lació.

Per aquesta raó, es calculen les funcions de preu en funció de la capacitat fixant un temps de descarrega de C100, pels dos tipus de bateries a les que es fa referència en aquest estudi, mitjançant un estudi de preus. Per a l'obtenció de les funcions, es crea una base de 64 dades extretes de tres botigues amb molta experiència el sector fotovoltaic i una gran varietat de productes:

- Autosolar
- Monsolar
- Tecnosolab

S'obtenen els models de regressió per ambdós tipus de bateries. Els càlculs de les rectes de regressió al mercat actual es troben a l'Annex B.

Per a les bateries de plom àcid s'obté la regressió lineal següent:

$$P_{plom} = 15,09 + 109,1 \cdot C; \quad P \text{ en } [\text{€}]; \quad C \text{ en } [\text{kWh}] \quad (1)$$

Per a les bateries de liti s'obté la regressió lineal següent:

$$P_{liti} = \begin{cases} -835,4 + 1201 \cdot C, & \text{si } C > 0,7 \\ 0, & \text{altres casos} \end{cases}; \quad P \text{ en } [\text{€}]; \quad C \text{ en } [\text{kWh}] \quad (2)$$

• Elements secundaris de la instal·lació

Atès que els costos dels elements d'una instal·lació domèstica poden variar en funció de molts factors com són el fabricant, país de procedència, qualitat de l'element o del treball, s'ha decidit fer una cerca d'algunes de les empreses de proximitat amb més renom en la venda d'aquest tipus d'elements, juntament amb estudis recents.

– Costos d'instal·lació : 1200 €

Els costos d'instal·lació inclouen costos del cablejat, mà d'obra, estructura de suport de les plaques solars, proteccions, comptador bidireccional i la legalització i inscripció de la instal·lació a l'òrgan de legalització pertinent. Aquests costos són molt susceptibles a la instal·lació i al mercat ([10] (800 €) [25] (\approx 1800 €)), per aquesta raó s'ha optat per

escollir un valor aproximat de 1200 €, el qual s'ha considerat una bona aproximació.

Hi ha dos tipus de manteniment per a qualsevol tipus d'instal·lació: el manteniment preventiu i el manteniment correctiu.

– **Costos de manteniment preventiu** : 50 €/any

El manteniment preventiu són les operacions d'inspecció visual i verificació d'actuacions que aplicades a la instal·lació han de permetre mantenir dins de límits acceptables les condicions de funcionament, prestacions, protecció i durabilitat de la mateixa. Si el manteniment el du a terme una empresa especialitzada pot costar al voltant de 300 €[26]. Tot i així aquest manteniment, que s'ha de fer una o dues vegades a l'any, el pot fer el mateix propietari de les plaques. [27]. Per aquesta raó es considera raonable un manteniment especialitzat cada 5 anys, el que genera una mitja de 50 €/any.

– **Costos de manteniment correctiu**

El manteniment correctiu són totes les operacions de substitució necessàries per assegurar que el sistema funcioni correctament durant la seva vida útil. Per comptabilitzar els costos de manteniment correctiu s'han de tenir en compte els cicles de vida dels elements del sistema, 25 en el cas de les plaques solars, i 10 en el cas de les bateries i els inversors.

– **Inversor**: $0,64€/W_p$ [9]

La potència subministrada per les plaques és l'aspecte que més influeix amb diferència a l'hora de determinar el preu de l'inversor. Per aquesta raó el preu de l'inversor depèn directament dels W_p de la instal·lació fotovoltaica

5.3 Escenaris del model

Es tenen en compte dos escenaris de generació (*secció 5.2.1, Generació d'electricitat*) i tres perfils de consum (*secció 5.2.1, Perfils de Consum*). D'aquesta manera s'estudien els **sis escenaris** següents:

Perfil de generació / Perfil de consum	Clima continental humit	Clima temperat mediterrani
Consum domèstic baix	Escenari 1.1	Escenari 1.2
Consum domèstic moderat	Escenari 2.1	Escenari 2.2
Consum domèstic alt	Escenari 3.1	Escenari 3.2

Les caracteritzacions de cada consum i generació s'observen a les següents taules:

Perfil de consum	kWh anuals
Consum domèstic baix	1.743,84
Consum domèstic moderat	4.260,00
Consum domèstic alt	6.888,23

Perfil de generació	kWh anuals / kWp
Clima continental humit (Berlín)	1.000,24
Clima temperat mediterrani (barcelona)	1.546,03

En els gràfics representats a les Figures 8, 9, 10 i 11 s'hi representen els tres consums i les dues generacions possibles, per a dos dies sencers, representatius de l'estació freda i la càlida. Aquestes figures estan ideades per a poder comprendre adequadament els escenaris.

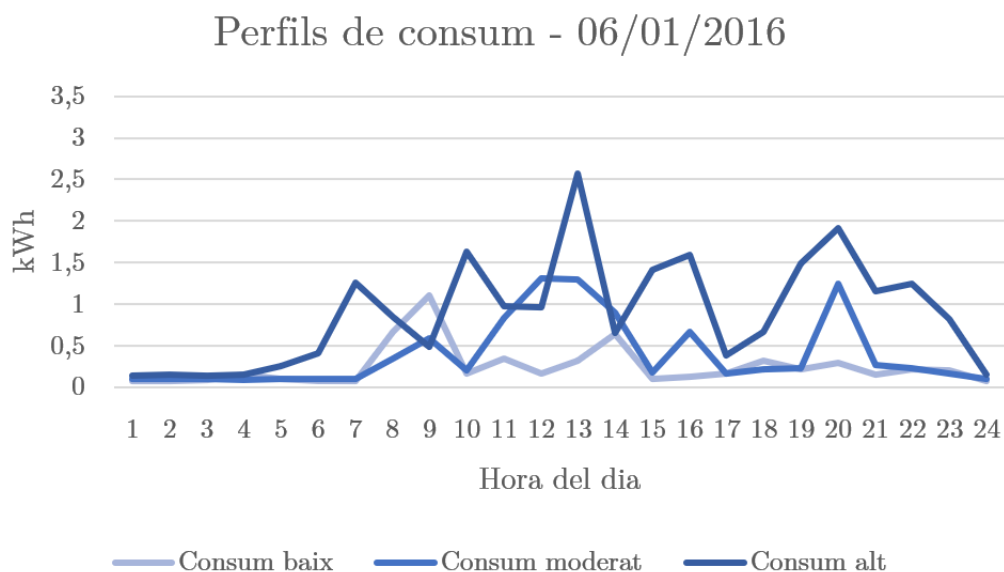


Figura 8: Gràfic d'exemple de la distribució del consum durant un dia d'hivern.

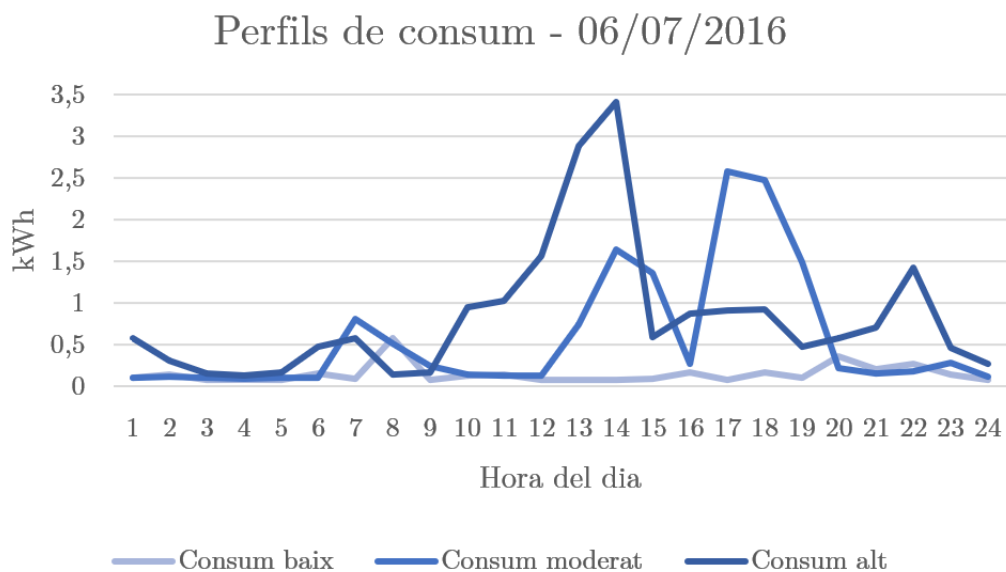


Figura 9: Gràfic d'exemple de la distribució del consum durant un dia d'estiu.

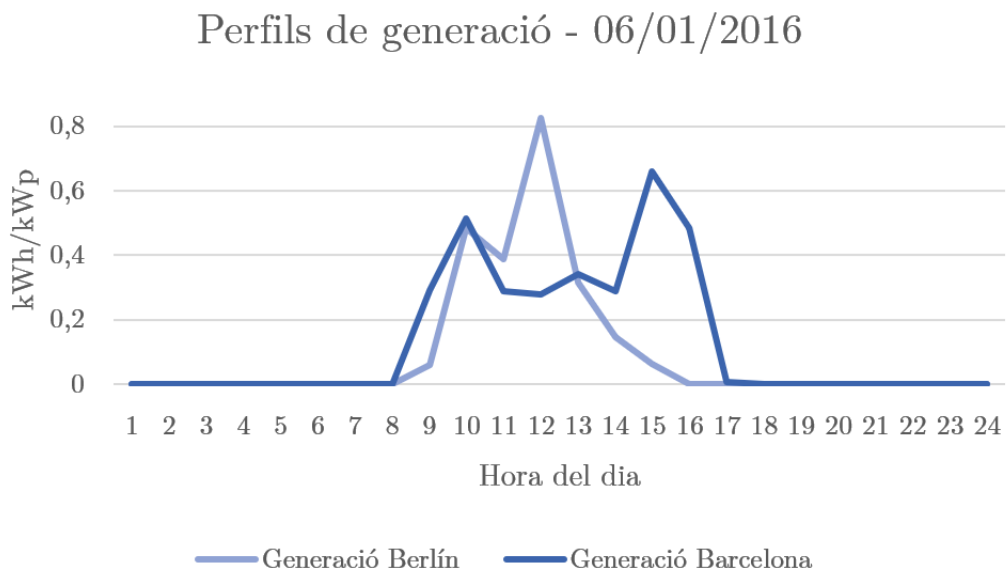


Figura 10: Gràfic d'exemple de la distribució de la generació per kWp instal·lat durant un dia d'hivern.

Perfils de generació - 06/07/2016

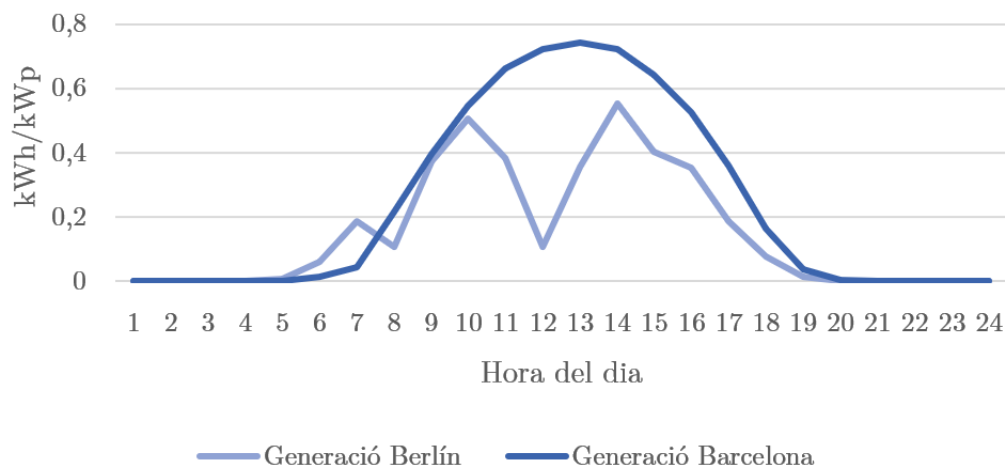


Figura 11: Gràfic d'exemple de la distribució de la generació per kWp instal·lat durant un dia d'estiu.

5.4 Construcció del model tecno-econòmic

El primer pas és presentar els indicadors energètics i econòmics en els que es basa l'optimització.

- **Indicadors energètics**

1. **Taxa d'autoconsum directe:** Descriu la quantitat d'energia PV que es pot consumir localment amb un sistema fotovoltaic com a percentatge respecte a la generació solar total. [4]
2. **Taxa d'autoconsum:** Defineix la quantitat d'energia PV que es pot consumir localment amb un sistema PV i una bateria addicional en percentatge respecte a la generació solar total.[modul]
3. **Grau d'autosuficiència:** Descriu quina part de la demanda de càrrega pot cobrir la generació solar local. La taxa d'autosuficiència es pot calcular com la relació de l'energia PV auto consumida amb la demanda de càrrega total.[4]

- **Indicadors econòmics**

1. Valor actualitzat net o **VAN:** Valor present d'un determinat nombre de fluxos de caixa futura, originats per una inversió
2. Període de retorn o **payback:** Base de temps que es tardarà en recuperar la inversió inicial mitjançant els fluxos de caixa.

Les seccions següents descriuen el processament els valors en el model per generar els resultats. En primer lloc, es presenten els mòduls de tres models (1) el mòdul de càlcul d'autoconsum, (2) el mòdul de càlcul dels indicadors econòmics i (3) mòdul d'optimització de sistemes d'emmagatzematge i PV. Per últim es descriu el (4) mòdul Z: Anàlisi de futur.

5.4.1 Mòdul de càlcul d'autoconsum

Com a base per als càlculs econòmics, en un primer pas es calculen els tres indicadors energètics. Se suposa que cada vegada que la demanda d'electricitat durant el dia pot reduir-se per la generació simultània d'electricitat del sistema fotovoltaic, la casa consumeix electricitat pròpia . L'excident d'energia elèctrica s'envia a l'emmagatzematge de la bateria, que té prioritat sobre la injecció a la xarxa. Si la bateria aconsegueix el màxim estat de càrrega, l'excident d'electricitat es ven a la xarxa. En els períodes en què l'energia solar no és suficient per subministrar les càrregues i la bateria s'esgota, es consumeix electricitat de la xarxa pública

Per a un consum d'electricitat determinat, els tres indicadors depenen directament de la mida del sistema fotovoltaic i de la mida de l'emmagatzematge de la bateria. En el model, l'autoconsum es calcula simulant els fluxos d'electricitat del sistema durant l'any amb resolució horària.

Per a dur a terme la **simulació energètica** es necessari recrear les **variables energètiques** a partir de les dades de consum (dels diferents perfils d'estudi) i de generació (proporcionades pel PVGIS):

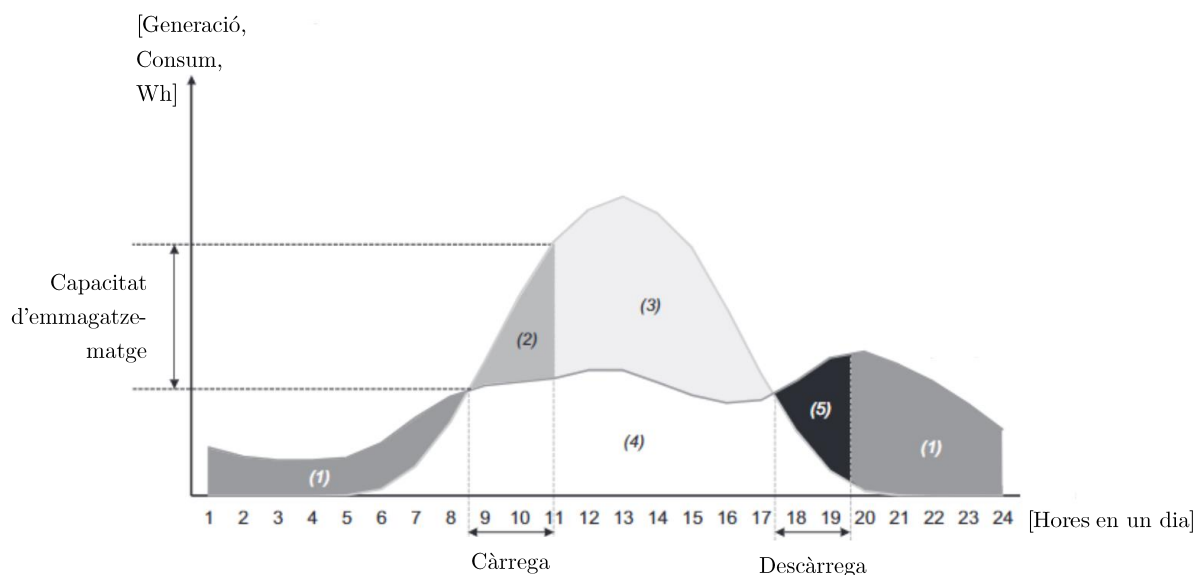


Figura 12: Gràfic d'exemple de la distribució de la generació i el consum diari

- **Energia generada** (2)+(3)+(4): Quantitat d'energia generada pel sistema fotovoltaic
- **Energia consumida PV** (4): Quantitat d'energia generada pel sistema fotovoltaic consumida directament.
- **Energia emmagatzemada a les bateries** (2): Quantitat d'energia generada en excés pel sistema fotovoltaic i que és emmagatzemada a les bateries.
- **Energia consumida bateries** (5): Quantitat d'energia que es consumeix de les bateries.
- **Energia consumida** (4)+(5): Quantitat d'energia generada del sistema fotovoltaic consumida directament o emmagatzemada prèviament a les bateries.
- **Energia injectada a la xarxa** (3): Quantitat d'energia generada pel sistema fotovoltaic i que excedeix les necessitats de càrrega i de capacitat de la bateria. Aquesta energia és injectada a la xarxa sense produir cap pèrdua.
- **Energia comprada a la xarxa** (1): Quantitat d'energia consumida de la xarxa

Les **condicions inicials energètiques** del model són les següents: Es considera que la primera hora de simulació la bateria es troba en el seu estat de càrrega.

A més a més s'ha de tenir en compte que el model assumeix una profunditat de descàrrega de la bateria del 80%.

Un cop calculades les variables energètiques del model, es calculen els tres indicadors energètics de la següent manera:

Taxa d'autoconsum directe:

$$q_{pvcd} = \frac{\text{Energia consumida PV}}{\text{Energia generada}} \cdot 100 \quad (3)$$

Taxa d'autoconsum :

$$q_{pvc} = \frac{\text{Energia consumida}}{\text{Energia generada}} \cdot 100 \quad (4)$$

Grau d'autosuficiència:

$$q_s = \frac{\text{Energia consumida}}{\text{Consum}} \cdot 100 \quad (5)$$

Les proporcions d'autoconsum serveixen com a entrada al segon mòdul del model, on es calculen els indicadors econòmics per a la llar.

5.4.2 Mòdul de càlcul dels indicadors econòmics

En aquest modul, es calculen els dos indicadors econòmics descrits anteriorment, els quals serviràn posteriorment per arribar al sistema òptim. El càlcul del VAN es mostra a continuació:

- VAN:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=0}^T \frac{C_{in,t} - C_{out,t}}{(1+i)^t}; \quad (6)$$

on

I_0 = Inversió inicial [€]

$C_{in,t}$ = Flux de caixa entrant en el període t [€]

$C_{out,t}$ = Flux de caixa sortint en el període t [€]

i = Taxa interna de retorn anual [en %]

L'expressió que calcula el I_0 és la següent:

$$I_0 = C_{pv} + C_{bat} + C_{inv} + C_i; \quad (7)$$

on

C_{pv} = Cost del sistema fotovoltaic [€]

C_{bat} = Cost de la bateria [€]

C_{inv} = Cost de l'inversor [€]

C_i = Cost d'instal·lació [€]

L'expressió que calcula el $C_{in,t}$ anual és la següent:

$$C_{in,t} = \text{Energia consumida}_t \cdot TE; \quad (8)$$

on

Energia consumida_t = Energia consumida en el període t[kWh]

TE = terme d'energia = [€/ kWh]

L'expressió que calcula el $C_{out,t}$ anual és la següent:

$$C_{out,t} = \begin{cases} C_{bat} + C_{inv}, & \text{si } t \text{ és múltiple de } 10 \\ C_{pv}, & \text{si } t \text{ és múltiple de } 25 \\ 0, & \text{altres casos} \end{cases} \quad (9)$$

5.4.3 Mòdul d'optimització de sistemes d'emmagatzematge i PV

El tercer mòdul es basa en els mòduls anteriors per trobar la mida òptima del sistema fotovoltaic i d'emmagatzematge per a la llar.

Per a un període determinat (T) i cadascun dels escenaris de consum que s'han explicat a la secció 5.2.1, es calculen els indicadors energètics i econòmics per a les següents combinacions de factors:

- 12 combinacions de potència del sistema fotovoltaic, oscil·lant entre 0 kW i 6 kW, incrementant 0,5 kW per iteració. El valor màxim es basa en la informació extreta dels articles [5] (3,45 kW), [6] (6 kW) i [7] (4,6 kW), a partir dels quals s'ha considerat agafar un número elevat ja que això no afecta negativament a l'estudi, i a viceversa podria provocar resultats equivocats.
- 30 combinacions de potència del sistema fotovoltaic, oscil·lant entre 0 kWh i 15 kWh, incrementant 0,5 kWh per iteració. El valor màxim es basa en la informació extreta dels articles [5] (9,9 kWh), [6] (6 kWh) i [7] (13,2 kWh), a partir dels quals s'ha considerat agafar un número

elevat ja que això no afecta negativament a l'estudi, i a viceversa podria provocar resultats equivocats.

Per tant, es realitza l'estudi amb 360 combinacions diferents per a cada un dels escenaris plantejats de consum, identificant el número de plaques i la mida d'emmagatzematge que maximitzen el VAN.

S'escull el VAN com a indicador econòmic ja que es tracta d'un estudi tècnic i per tant es desitja obtenir els resultats de les infraestructures a llarg termini.

5.4.4 Mòdul Z: Anàlisi de futur

La iteració dels tres primers mòduls del model permet obtenir els resultats òptims amb els preus actuals de mercat. El mòdul Z es basa en els tres mòduls anteriors per trobar la mida òptima del sistema fotovoltaic per a la llar, per a una suposició des del preu actual de les bateries iterant amb diferents disminucions de preus. D'aquesta manera, per a un període T, per a cada consum es calcula la instal·lació òptima per a una disminució del preu de les bateries concreta.

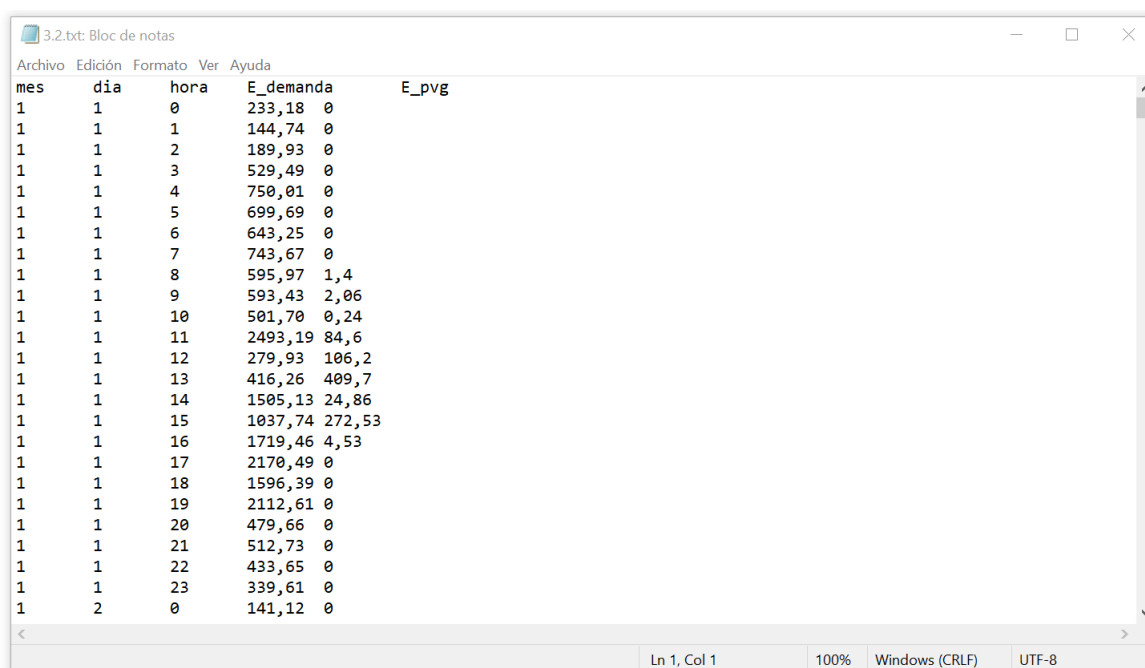
Actualment (any 2020), seguint el plantejament de les equacions 1 i 2, el preu de les bateries és de $\approx 125 \text{ €/kWh}$ de capacitat per a bateries de plom-àcid, i $\approx 365 \text{ €/kWh}$ de capacitat per a bateries de liti. En les pròximes dècades amb tota probabilitat es milloraran es tecnologies i apareixeran nous tipus de bateries i això pot **reduir molt el cost**.

En aquest mòdul es realitza l'estudi de la instal·lació òptima tenint en compte les possibles disminucions de preu de les bateries. Aquests preus oscil·len des del 365 €/kWh fins a 15 €/kWh , disminuint 10 €/kWh per iteració (35 iteracions). Per tant, es realitza l'estudi amb 12.600 combinacions diferents per a cada un dels escenaris plantejats de consum, identificant el número de plaques i la mida d'emmagatzematge que maximitzen el VAN per a cada preu de bateries.

6 Programa de simulació

Per a realitzar la simulació s'ha optat per crear un programa fent ús del llenguatge *Python*, conegut per ser un llenguatge fàcil d'interpretar i útil per a una gran varietat de situacions.

Les entrades del programa són les dades de consum i generació dels sis escenaris possibles, en format *txt*. A la Figura 13 s'hi presenta una captura d'un dels sis documents importats pel programa. El programa realitza les simulacions pertinents i exporta sis documents, també en format *txt*, amb les dades òptimes de cada escenari. A la Figura 14 s'hi observa un dels *txt* de sortida.



mes	dia	hora	E_demanda	E_pvg
1	1	0	233,18	0
1	1	1	144,74	0
1	1	2	189,93	0
1	1	3	529,49	0
1	1	4	750,01	0
1	1	5	699,69	0
1	1	6	643,25	0
1	1	7	743,67	0
1	1	8	595,97	1,4
1	1	9	593,43	2,06
1	1	10	501,70	0,24
1	1	11	2493,19	84,6
1	1	12	279,93	106,2
1	1	13	416,26	409,7
1	1	14	1505,13	24,86
1	1	15	1037,74	272,53
1	1	16	1719,46	4,53
1	1	17	2170,49	0
1	1	18	1596,39	0
1	1	19	2112,61	0
1	1	20	479,66	0
1	1	21	512,73	0
1	1	22	433,65	0
1	1	23	339,61	0
1	2	0	141,12	0

Figura 13: Captura d'un dels *txt* importats pel programa, el qual conté les dades de generació i consum de l'escenari 3.2, separades mitjançant tabulacions.

Els sis documents *txt* que s'importen contenen les següents dades:

- Número del mes, dia i hora durant un any sencer, des de l'1 de Gener a les 00:00 h.
- Dades del consum horari, en Wh, d'aquell escenari.
- Dades de la generació d'1 kWp de potència fotovoltaica instal·lada, en Wh, d'aquell escenari.

euro/kWh de la bateria	P òptima	C òptima	VAN	Payback	q_pvcd	q_pvc	q_s
365	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
355	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
345	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
335	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
325	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
315	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
305	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
295	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
285	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
275	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
265	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
255	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
245	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
235	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
225	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
215	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
205	4000	0	1617.01 16.49	50.12	50.12	45.0	
195	4000	500	1625.52 16.5	50.12	53.09	47.66	
185	4000	500	1639.15 16.48	50.12	53.09	47.66	
175	4000	500	1652.77 16.46	50.12	53.09	47.66	
165	4000	500	1666.4 16.44	50.12	53.09	47.66	
155	4000	1000	1693.04 16.42	50.12	55.51	49.83	
145	4000	1500	1726.01 16.39	50.12	57.7	51.8	
135	4000	2500	1779.59 16.35	50.12	61.81	55.49	
125	4000	3000	1854.26 16.26	50.12	63.72	57.21	

Figura 14: Captura d'un dels *txt* exportats pel programa, el qual conté els resultats de l'estudi d'optimització de l'escenari 3.2, separats mitjançant tabulacions.

Els sis documents *txt* que s'exporten contenen les següents dades:

- Preus de les bateries estudiats, en €/kWh.
- Potència fotovoltaica instal·lada per cada preu de les bateries, en Wp.
- Capacitat de la bateria per cada preu de les bateries, en Wh.
- Resultat del VAN òptim per cada preu de les bateries, en €.
- Període de retorn per a cada preu de les bateries, en anys.
- Taxa d'autoconsum directe per a cada preu de les bateries, en %.
- Taxa d'autoconsum per a cada preu de les bateries, en %.
- Grau d'autosuficiència per a cada preu de les bateries, en %.

El codi emprat per al programa es troba a l'Annex C. A més a més, per a una millor comprensió del programa, s'ha fet un glossari dels paràmetres i variables usades, on s'hi indica el nom de la variable, el seu significat, el tipus d'objecte i les unitats amb les que es treballa. Aquest glossari es troba a l'Annex D.

A continuació, s'explica el funcionament general del programa i les fórmules que aquest utilitza per obtenir els resultats.

6.1 Funcionament

A grans trets, el programa funciona mitjançant tres iteracions per a cada escenari. A partir de les dades de **consum** d'un habitatge i les dades de **generació** d'una instal·lació fotovoltaica d'un kWh de potència durant un any, el programa extreu un document de text que permet estudiar si la implantació de bateries és o no òptima, i l'evolució a mesura que disminueixin els preus dels sistemes d'emmagatzematge.

El programa consta de tres fitxers diferents:

- Fitxer *Importar.py*: S'hi troba un extracte de codi per a importar els fitxers de text de manera més ràpida.
- Fitxer *Paràmetres.py*: S'hi emmagatzemen els valors dels costos i altres variables econòmiques i energètiques. D'aquesta manera es fa molt senzill canviar aquests paràmetres i realitzar estudis de sensibilitat.
- Fitxer *Programa.py*: S'hi troba el codi propi del programa.

El fitxer *Programa.py* executa les següents accions:

1. S'importen els mòduls externs que es faran servir durant l'execució.
2. S'importen programes propis que es criden durant l'execució (*Importar.py* i *Paràmetres.py*).

```
#s'importen llibreries de python
from decimal import Decimal

#s'importen altres programes
from importar import importar
import parametres
```

Figura 15: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, passos 1 i 2.

3. Comença la sentència executable *simulacio*, la qual no requereix de paràmetres.
4. S'extreuen les dades energètiques dels sis escenaris dels fitxer d'importació, les quals s'emmagatzemen en forma de llistes.

```
def simulacio():
    #s'obtenen les columnes de demanda i generació solar
    localitzacio1_1='C:/Users/Silvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI 8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/1.1.txt'
    localitzacio1_2='C:/Users/Silvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI 8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/1.2.txt'
    localitzacio2_1='C:/Users/Silvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI 8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/2.1.txt'
    localitzacio2_2='C:/Users/Silvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI 8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/2.2.txt'
    localitzacio3_1='C:/Users/Silvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI 8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/3.1.txt'
    localitzacio3_2='C:/Users/Silvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI 8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/3.2.txt'
    r={}

    "Iteració 0"
    for fitxer_importacio in ['1_1','1_2','2_1','2_2','3_1','3_2']:

        if fitxer_importacio=='1_1':
            dic_var=importar(localitzacio1_1)
        elif fitxer_importacio=='1_2':
            dic_var=importar(localitzacio1_2)
        elif fitxer_importacio=='2_1':
            dic_var=importar(localitzacio2_1)
        elif fitxer_importacio=='2_2':
            dic_var=importar(localitzacio2_2)
        elif fitxer_importacio=='3_1':
            dic_var=importar(localitzacio3_1)
        elif fitxer_importacio=='3_2':
            dic_var=importar(localitzacio3_2)
        mes=dic_var['mes']
        dia=dic_var['dia']
        hora=dic_var['hora']
        E_demanda=dic_var['E_demanda']
        E_pvg_unitari=dic_var['E_pvg']
```

Figura 16: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, passos 3 i 4.

5. S'inicialitzen objectes que s'usaran durant el programa, com les llistes on s'emmagatzemaran les dades òptimes de sortida.

```
l_y=[]
l_payback=[]
l_van=[]
l_c=[]
l_p=[]

l_q_pvcd=[]
l_q_pvc=[]
l_q_s=[]

num_dades=len(mes)
P_max=6000 #Wp
C_max=15000 #Wh

E_demanda_total = 0
E_pvg_total = 0
for i in range(0,num_dades):
    E_pvg_total = E_pvg_total+E_pvg_unitari[i]
    E_demanda_total = E_demanda_total+ E_demanda[i]
```

Figura 17: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, pas 5.

6. Comença la **primera iteració**, la qual repetirà el mateix bloc d'optimització per a tots els escenaris, tenint en compte les possibles disminucions del preu de les bateries que es poden produir en el futur (variable y). Per a cada iteració s'executen les següents accions:

- (a) Es porten les variables a optimitzar a 0.

```

"Iteració 1"
for y in range (365,5,-10): #y el preu de la bateria en euro/kWh de capacitat
    P_optim=0
    C_optim=0
    q_pvcd_optim=0
    q_pvc_optim=0
    q_s_optim=0
    payback_optim=0
    van_optim=0
    print('y=',y)

```

Figura 18: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, pas 6 (a).

(b) Comença la **segona iteració**, la qual té en compte diferents potències fotovoltaïques instal·lades (variable P). Per a cada iteració s'executen les següents accions:

- i. Es simulen les dades energètiques fotovoltaïques anuals a partir de les fórmules que s'exposen a la secció 6.2, equacions 10, 11, 12 i 13.

```

"Iteració 2"
for P in range (0,P_max+500,500):

    E_pvg=[]
    for i in range(0,num_dades):
        E_pvg.append(E_pvg_unitari[i]*P/1000)

    #es simula un any de consum
    E_pvcd=[]
    for i in range(0,num_dades):
        if (E_pvg[i]-E_demanda[i])>0:
            E_pvcd.append(E_demanda[i])
        else:
            E_pvcd.append(E_pvg[i])

    E_sobrant=[]
    E_pv_xarxa=[]
    for i in range(0,num_dades):
        if (E_pvg[i]-E_demanda[i])>0:
            E_sobrant.append(E_pvg[i]-E_demanda[i])
            E_pv_xarxa.append(Decimal(0))
        else:
            E_sobrant.append(Decimal(0))
            E_pv_xarxa.append(E_demanda[i]-E_pvg[i])

    #C=capacitat en kWh de la bateria
    #0.8=profunditat de descarrega de la bateria

```

Figura 19: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, pas 6 (b).

ii. Comença la **tercera iteració**, la qual té en compte diferents capacitats de les bateries (variable C). Per a cada iteració s'executen les següents accions:

- A. Es simulen les dades energètiques d'emmagatzematge anuals a partir de les fórmules que s'exposen la secció 6.2, equacions 18, 16 i 17.

```

"Iteració 3"
for C in range (0,C_max+500,500):

    E_bat=[]
    C_min=0.2*C
    E_bat.append(Decimal(C_min))
    E_batc=[]
    E_batc.append(Decimal(0))
    E_venda=[]
    E_venda.append(Decimal(0))
    for i in range(1,num_dades):
        if (E_bat[i-1]-E_batc[i-1]+E_sobrant[i-1]) > C:
            E_bat.append(Decimal(C))
            E_venda.append(E_sobrant[i-1]+E_bat[i-1]-E_batc[i-1]-Decimal(C))
        else:
            E_bat.append(E_bat[i-1]+E_sobrant[i-1]-E_batc[i-1])
            E_venda.append(Decimal(0))
        if (E_bat[i]-E_pv_xarxa[i]) > C_min:
            E_batc.append(E_pv_xarxa[i])
        else:
            E_batc.append(E_bat[i]-Decimal(C_min))
    E_xarxa=[]
    for i in range(0,num_dades):
        E_xarxa.append(E_pv_xarxa[i]-E_batc[i])

```

Figura 20: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, pas 6 (b) ii. A.

- B. Es calculen indicadors energètics i econòmics d'aquella iteració, mitjançant les fórmules de la secció 6.2, equacions 19, 20, 21 i 22.

```

""" Càlcul dels indicadors energètics:
- Taxa d'autoconsum directe: q_pvcd
- Taxa d'autoconsum: q_pvc
- Grau d'autosuficiència: q_s
"""
E_pvc_total = 0
E_pvcd_total = 0
E_pvg_total = 0
E_demanda_total = 0
E_venda_total = 0
E_xarxa_total = 0

for i in range(0,num_dades):
    E_pvc_total = E_pvc_total+ (E_pvcd[i] + E_batc[i])
    E_pvcd_total = E_pvcd_total+E_pvcd[i]
    E_pvg_total = E_pvg_total+E_pvg[i]
    E_demanda_total = E_demanda_total+ E_demanda[i]
    E_venda_total = E_venda_total+E_venda[i]
    E_xarxa_total = E_xarxa_total+E_xarxa[i]

if E_venda_total > E_xarxa_total:
    E_venda_total = E_xarxa_total

if E_pvg_total==0:
    q_pvcd=0
    q_pvc=0
else:
    q_pvcd= round(float((E_pvcd_total/E_pvg_total)*100),2)
    q_pvc=round(float((E_pvc_total/E_pvg_total)*100),2)
    q_s=round(float((E_pvc_total/E_demanda_total)*100),2)

```

Figura 21: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, càlcul d'indicadors energètics

```

"Càlcul del Cashflow:"
Cbat=y*C/1000

if P==0:
    I0=0
else:
    I0=(parametres.Cpv*P+Cbat+parametres.Cinv*P+parametres.Ci)
#posició de la llista = any d'estudi

Ingressos=[0]

for i in range (0,parametres.T):
    Ingressos.append(float(E_pvc_total)*parametres.Preu+float(E_venta_total)*parametres.Venda)
Cashflow=[-I0]
for i in range(1,parametres.T+1):
    if P==0:
        Cashflow.append(round(Ingressos[i],2))
    elif i%10==0:
        Cashflow.append(round(Ingressos[i]-parametres.Cm - Cbat - parametres.Cinv*P,2))
    else:
        Cashflow.append(round(Ingressos[i]-parametres.Cm,2) )
Cashflow_acu=[-I0]
for i in range (1,parametres.T+1):
    Cashflow_acu.append(Cashflow_acu[i-1]+Cashflow[i])

```

Figura 22: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, càlcul del Cashflow

```

"""Càlcul dels indicadors econòmics:
- VAN: van (en el període T)
- Període de retorn: payback
"""
anterior=Cashflow_acu[0]
for i in range(1,parametres.T+1):
    if Cashflow_acu[i]<=0 and i!=parametres.T:
        anterior=Cashflow_acu[i]
    elif Cashflow_acu[i]<=0 and i==parametres.T:
        payback= '>'+str(parametres.T)
    else:
        payback=round(i+abs(anterior)/(abs(anterior)+Cashflow_acu[i]),2)
        break
van=0
for j in range (0,parametres.T+1):
    van= van + Cashflow[j]/((1+parametres.i)**j)
van=round(van,2)

```

Figura 23: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, càlcul d'indicadors econòmics

(c) Per cada y, s'emmagatzemen les dades i indicadors que optimitzen el VAN.

```

"Es busca el valor més òptim"
if van>van_optim:
    P_optim=P
    C_optim=C
    q_pvcd_optim=q_pvcd
    q_pvc_optim=q_pvc
    q_s_optim=q_s
    payback_optim=payback
    van_optim=van

```

Figura 24: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, pas 6 (c).

```

l_y.append(y)
l_payback.append(payback_optim)
l_van.append(van_optim)
l_c.append(C_optim)
l_p.append(P_optim)

l_q_pvcd.append(q_pvcd_optim)
l_q_pvc.append(q_pvc_optim)
l_q_s.append(q_s_optim)

```

Figura 25: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, pas 6 (c).

7. Un cop finalitzades les iteracions, s'exporten les dades òptimes de cada escenari en sis txt.

```

r[fitxer_importacio]=[l_payback,l_van,l_c,l_p,l_q_pvcd,l_q_pvc,l_q_s]

localitzacio='C:/Users/Silvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI 8/TFG/Python/'+str(fitxer_importacio)+'.txt'
columnes=['euro/kWh de la bateria','P òptima','C òptima','VAN', 'Payback','q_pvcd', 'q_pvc','q_s']
with open(localitzacio, "w") as file:
    linea='\t'.join(columnes)
    file.write(linea)
    a=l_y
    b=l_p
    c=l_c
    d=l_van
    e=l_payback
    f=l_q_pvcd
    g=l_q_pvc
    h=l_q_s
    for a, b, c, d, e, f, g, h in zip(a, b, c, d, e, f, g, h): # et va enviant la mateixa posició de toteses llistes
        llista=[str(a), str(b), str(c), str(d), str(e), str(f), str(g), str(h)]
        linea='\t'.join(llista) #es crea un string amb els valors de les columnes separats per tabulacions
        file.write('\n'+linea)

```

Figura 26: Tros de codi del fitxer *Programa.py*, pas 7.

El procediment es pot observar en el diagrama de flux de la Figura 27.

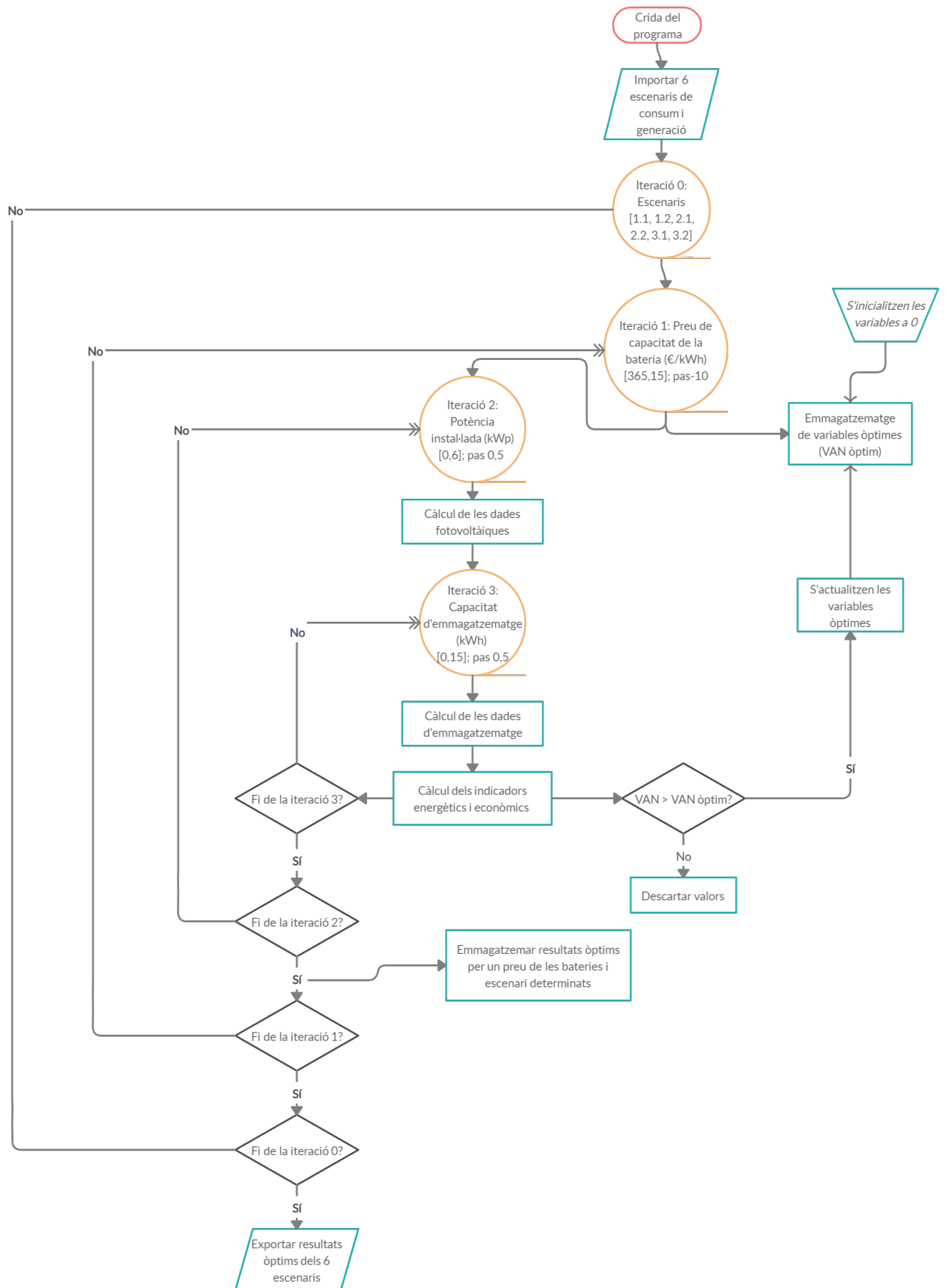


Figura 27: Diagrama de flux del funcionament del *Programa.py*.

6.2 Fórmules

Per a una millor comprensió d'aquest apartat, s'aconsella consultar l'Annex D, on s'hi troba un glossari dels paràmetres i variables utilitzats als programes.

6.2.1 Càlcul de les dades energètiques fotovoltaiques

- Dades de generació solar:

$$E_{pv,z} = E_{pv \text{ unitari},z} \cdot P; \quad z \in [1, num_dades] \quad (10)$$

- Dades d'energia solar consumida directament per la càrrega:

$$E_{pvcd,z} = \begin{cases} E_{demanda,z}, & \text{si } E_{pv,z} > E_{demanda,z} \\ E_{pv,z}, & \text{altres casos} \end{cases}; \quad z \in [1, num_dades] \quad (11)$$

- Dades d'energia solar no consumida directament:

$$E_{sobrant,z} = \begin{cases} E_{pv,z} - E_{demanda,z}, & \text{si } E_{pv,z} > E_{demanda,z} \\ 0, & \text{altres casos} \end{cases}; \quad z \in [1, num_dades] \quad (12)$$

- Dades d'energia que s'hauria d'extreure de la xarxa si no hi ha emmagatzematge:

$$E_{pv \text{ xarxa},z} = \begin{cases} 0, & \text{si } E_{pv,z} > E_{demanda,z} \\ E_{demanda,z} - E_{pv,z}, & \text{altres casos} \end{cases}; \quad z \in [1, num_dades] \quad (13)$$

6.2.2 Càlcul de les dades energètiques d'emmagatzematge

- Dades d'energia emmagatzemada:

$$E_{bat,z} = \begin{cases} C, & \text{si } (E_{bat,z-1} + E_{sobrant,z-1} - E_{batc,z-1}) > C \\ E_{bat,z-1} + E_{sobrant,z-1} - E_{batc,z-1}, & \text{altres casos} \end{cases} \quad (14)$$

; $z \in [1, num_dades]$

- Capacitat mínima:

$$C_{min} = 0,2 \cdot C \quad (15)$$

- Dades d'energia subministrada per la bateria:

$$E_{batc,z} = \begin{cases} E_{pv \ xarxa,z}, & \text{si } (E_{bat,z} - E_{pv \ xarxa,z}) > C_{min}; \\ E_{bat,z} - C_{min}, & \text{altres casos} \end{cases}; \quad z \in [1, num_dades] \quad (16)$$

- Dades d'energia extreta de la xarxa:

$$E_{xarxa,z} = E_{pv \ xarxa,z} - E_{bat,z}; \quad z \in [1, num_dades] \quad (17)$$

- Dades de l'energia sobrant que serà injectada a la xarxa

$$E_{bat,z} = \begin{cases} E_{sobrant,z-1} + E_{bat,z-1} - E_{batc,z-1} - C, & \text{si } (E_{bat,z-1} + E_{sobrant,z-1} - E_{batc,z-1}) > C \\ 0, & \text{altres casos} \end{cases} \quad (18)$$

6.2.3 Càlculs indicadors energètics

- Taxa d'autoconsum directe:

$$q_{pvcd} = \begin{cases} 0, & \text{si } E_{pv \ total} = 0 \\ \frac{E_{pvcd \ total}}{E_{pv \ total}} \cdot 100, & \text{altres casos} \end{cases} \quad (19)$$

- Taxa d'autoconsum:

$$q_{pvc} = \begin{cases} 0, & \text{si } E_{pv \ total} = 0 \\ \frac{E_{pvc \ total}}{E_{pv \ total}} \cdot 100, & \text{altres casos} \end{cases} \quad (20)$$

- Grau d'autosuficiència:

$$q_s = \frac{E_{pvc \ total}}{E_{demanda \ total}} \cdot 100 \quad (21)$$

6.2.4 Càlculs indicadors econòmics

- VAN:

$$VAN = \sum_{t=0}^T \frac{Cashflow_t}{(1 + parametres.i)^t} \quad (22)$$

7 Resultats experimentals

Prèviament a l'exposició dels resultats obtinguts, és important recalcar que es consideren resultats òptims aquells que **maximitzen el VAN**.

A continuació s'exposen una sèrie de gràfics que s'han creat per il·lustrar els resultats obtinguts de l'estudi, a partir de les dades proporcionades pel *Programa*.

7.1 Potència fotovoltaica i capacitat de la bateria

Els gràfics de les Figures 28 i 29 il·lustren els resultats de potència fotovoltaica instal·lada i capacitat de la bateria que maximitzen el VAN, en funció del preu del kWh de capacitat de les bateries.

Com és d'esperar, els resultats de potència i capacitat depenen directament del consum i la generació. Per una banda, als tres escenaris **amb una generació baixa** (clima continental) **no surt a compte la instal·lació de plaques**, i per conseqüent tampoc la de bateries. Per l'altra banda, amb una generació elevada (clima temperat), s'observa que el consum també és un factor decisiu. **Amb un consum menor a 2000 kWh anuals, no surt a compte instal·lar plaques**. En resum, només surt a compte la instal·lació als escenaris 2.2 i 3.2.

Pel que fa a l'evolució respecte al preu del kWh de capacitat de les bateries, **la disminució del preu provoca que les bateries siguin un component òptim de la instal·lació**. També és interessant fixar-se que a l'escenari 3.2, la disminució del preu fa òptim augmentar la producció de les plaques fotovoltaïques.

Segons el gràfic 29, les bateries formen part de les instal·lacions òptimes a partir dels 200 €/kWh. Actualment, l'opció més comú de bateries són les bateries de plom àcid (Annex B), les quals tenen un preu aproximat de 125 €/kWh de capacitat. Per a aquest preu, els escenaris 2.2 i 3.2 tenen una valors òptims de 2 i 3 kWh de capacitat respectivament. En canvi, les bateries de liti, les quals tenen un preu actual de 365 €/kWh de capacitat (Annex B), no optimitzen la instal·lació.

En general, es pot concloure que qualsevol instal·lació fotovoltaica precisa d'una generació elevada en la regió on es desitja instal·lar mòduls solars. A més a més, s'evidencia el fet de que les bateries ja són un element òptim per aquelles instal·lacions amb consums elevats. Com més elevat és el

consum, més elevada és la capacitat òptima de la bateria. Per a l'escenari 3.2, la capacitat òptima supera els 10 kWh a partir dels 55 €/kWh, mentre que per l'escenari 2.2, no és fins als 15 €/kWh que s'assoleixen les capacitats superiors a 10 kWh.

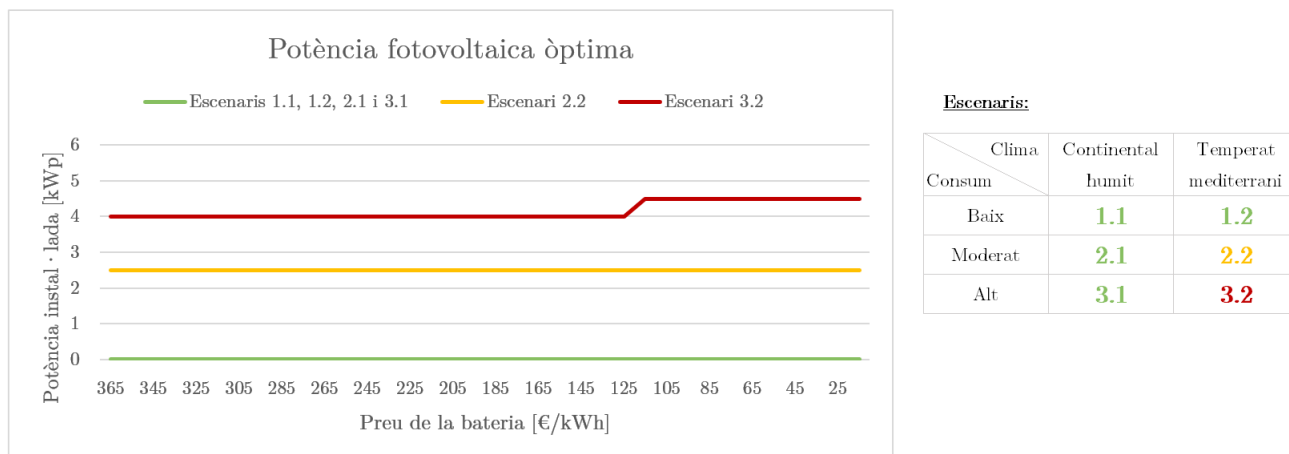


Figura 28: A la dreta, gràfic dels resultats de potència fotovoltaica que optimitzen el VAN en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

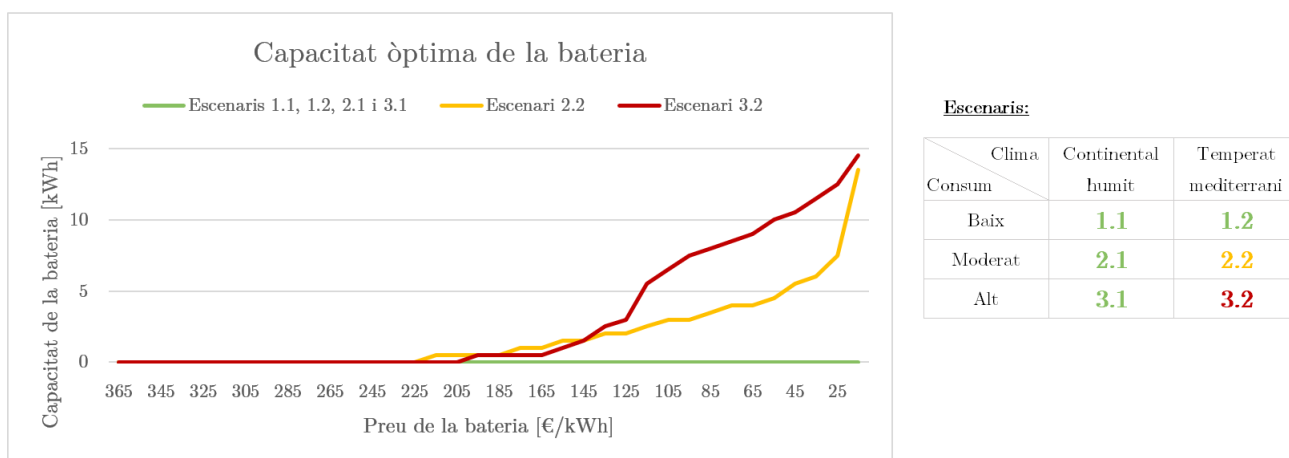


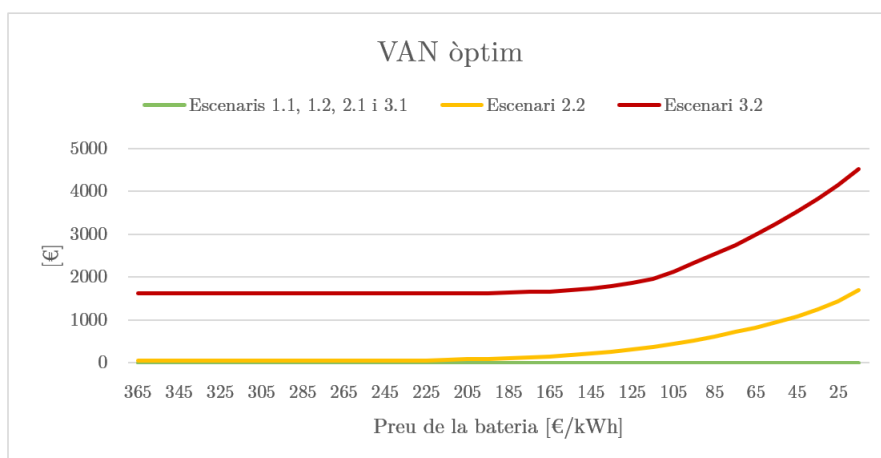
Figura 29: A la dreta, gràfic dels resultats de capacitat de la bateria que optimitzen el VAN en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

7.2 Indicadors econòmics

Els resultats dels indicadors econòmics es troben als gràfics de les Figures 30 i 31. Els escenaris 1.1, 1.2, 2.1 i 3.1, tenen VAN òptims nuls per a qualsevol dels preus de les bateries estudiats, és a dir, que en un període de 25 anys (període d'estudi del model), no es recupera la inversió inicial. És interessant comentar que alguns d'aquests escenaris tenen una evolució del Cashflow acumulat que arriba a ser positiva en algun moment dins del període d'estudi, però que torna a baixar degut als costos de substitució, provocant un VAN negatiu. Per a aquests escenaris, el període de retorn és més gran a 25 anys i en alguns casos infinit. Tot i així es representen en el gràfic amb períodes

de retorn nuls.

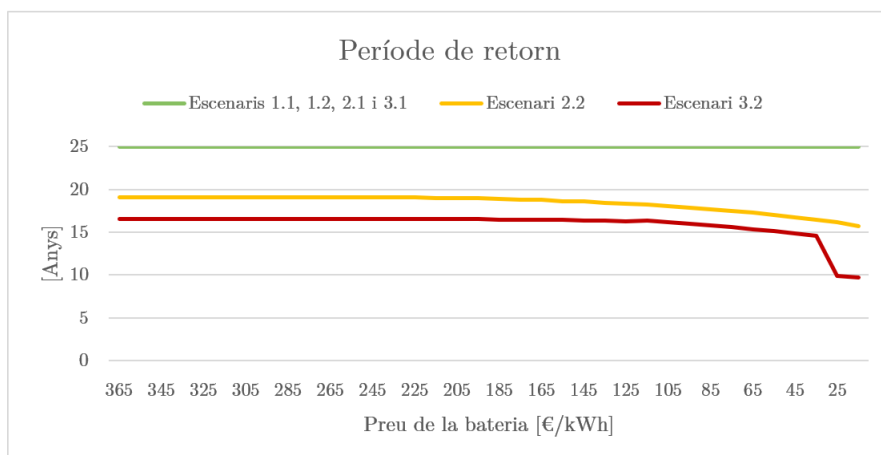
Pel que fa als dos escenaris en els que si que es recupera la inversió en un del període de 25 anys, s'observen dos trets a destacar. Primerament, els VAN que s'obtenen sense la implantació de bateries no són molt elevats, sobretot si els consums no són alts. Tot i així, s'ha de tenir en compte que aquestes instal·lacions no estan destinades únicament al benefici econòmic, sinó en gran part a l'ús d'energies renovables dins del marc de la transició energètica. A més a més, és molt interessant veure el gran augment del VAN degut a la disminució del preu de les bateries. **Ens els sistemes amb bateries, els VAN augmenten de forma exponencial a mesura que es disminueix el preu de la bateria. Els períodes de retorn també disminueixen amb la implementació de les bateries, arribant en el cas de l'escenari 3.2 a valors de 10 anys.**



Escenaris:

Consum \ Clima	Continental humit	Temperat mediterrani
Baix	1.1	1.2
Moderat	2.1	2.2
Alt	3.1	3.2

Figura 30: A la dreta, gràfic dels resultats del VAN òptim en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.



Escenaris:

Consum \ Clima	Continental humit	Temperat mediterrani
Baix	1.1	1.2
Moderat	2.1	2.2
Alt	3.1	3.2

Figura 31: A la dreta, gràfic dels resultats dels períodes de retorn que optimitzen el VAN en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

7.3 Indicadors energètics

Per últim, en els gràfics de les Figures 32, 33 i 34 s'hi observen les evolucions dels tres indicadors energètics. En els tres gràfics el comportament dels dos escenaris rendibles és semblant.

Tal i com és d'esperar, **la taxa d'autoconsum directe es manté bastant constant**, al voltant del 50 %. Aquesta taxa no depèn de les bateries sinó de la potència fotovoltaica instal·lada. Aquesta taxa podria variar si el perfil de consum per hores variés en funció dels escenaris. Per exemple, si un escenari tingués un consum horari majoritàriament nocturn, tindria una taxa d'autoconsum directe menor que un altre que tingués el seu major consum en les hores centrals del dia, on hi ha la màxima captació solar. Que ambdós perfils tinguin la mateixa taxa d'autoconsum directe ens indica que tenen perfils de consum horaris semblants.

Pel que fa a la **taxa d'autoconsum**, manté una relació directa amb les bateries, ja que aquestes permeten consumir energia generada per les plaques durant períodes de poca generació solar, o ninguna. Per aquesta raó, **s'observa un augment de gairebé un 30%**, arribant a gairebé un 80% de consum de l'energia generada pel sistema fotovoltaic.

Per últim, el **grau d'autosuficiència** presenta un comportament semblant a la taxa d'autoconsum, augmentant significativament amb l'ús de bateries amb major capacitat. S'observa un augment de més del 30% a mesura que disminueix el preu de la bateria, **arribant a la possibilitat de cobrir un 80% del consum de l'habitatge mitjançant energies renovables**.

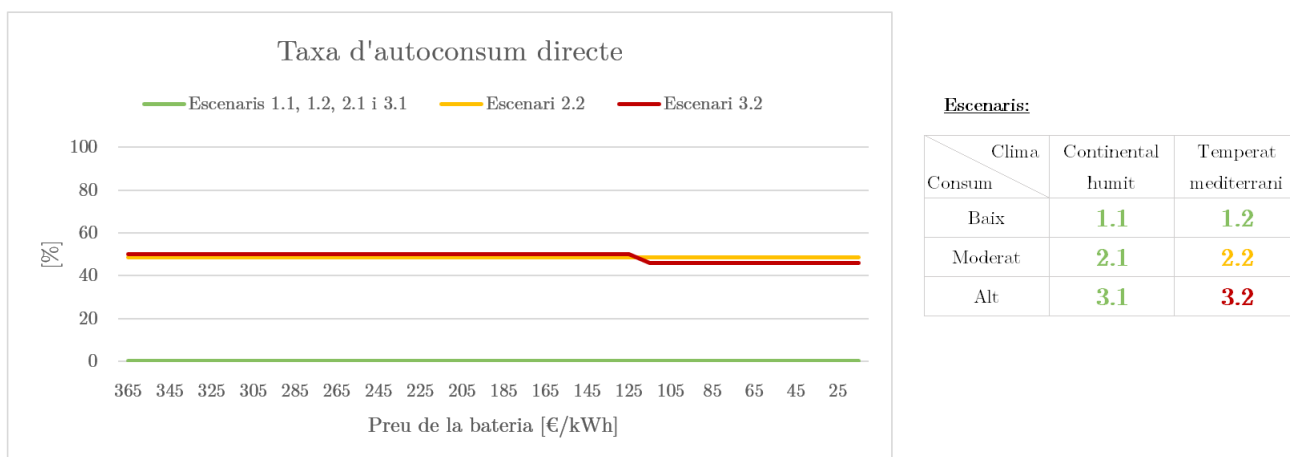


Figura 32: A la dreta, gràfic dels resultats de les taxes d'autoconsum directe en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

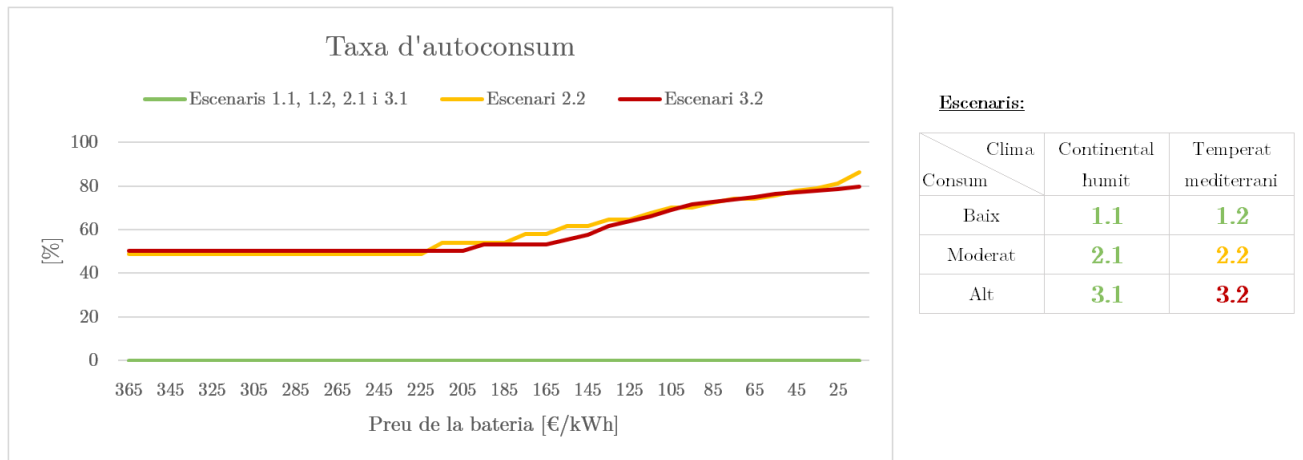


Figura 33: A la dreta, gràfic dels resultats de les taxes d'autoconsum en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

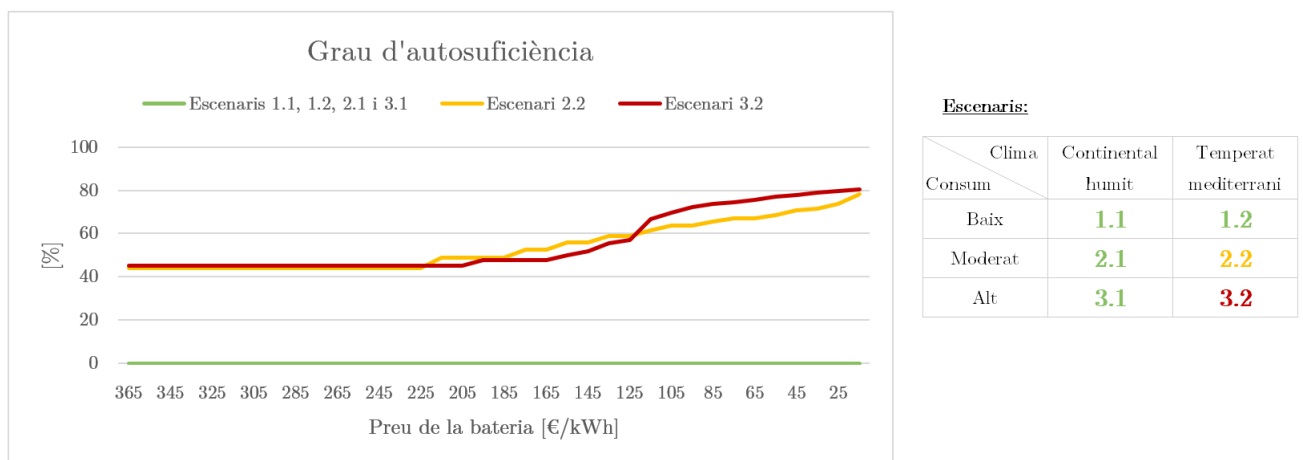


Figura 34: A la dreta, gràfic dels resultats dels graus d'autosuficiència en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

7.4 Comparació dels resultats amb altres estudis

A continuació es presenta una taula resum dels resultats d'altres estudis.

Referència de l'estudi	[9]	[5]	[6]	[8]
Any d'estudi	2013/preveu 2022	2019	2017	2016
Consum anual [kWh]	3.908	≤ 7.140	≈ 3.700	3.743
Generació anual [kWh/kWp]	980,93 (Sud d'Alemania)	≈ 1.740 Por- tugal (Porto)	1.100 UK (Brighton)	≈ 1.900 Iran (Tehran)
PV [kWp]	2,5 (2013), 6,5 (2022)	3,45	2	2,5
Capacitat bateria [kWh]	4,5 (2013), 7 (2022)	3,3	2	4
VAN [€]	-	≈ 3.000	1.958	21.300
Taxa d'autoconsum directe [%]	-	-	-	-
Taxa d'autoconsum [%]	-	15,69	-	-
Grau d'autosuficiència [%]	-	40,61	-	-

S'observa com els resultats de potència fotovoltaica instal·lada i capacitat de les bateries concorden amb els obtinguts en la simulació. Com més elevat el consum i la generació (països amb més radiació solar com Iran o Portugal), més elevada és la potència i la capacitat de bateries. En aquests estudis, realitzats amb escenaris de mercat de l'última dècada, es conclou que la opció més òptima conté bateries. Tot i així, es pot observar com tot i tenir consums anuals alts, les capacitats òptimes de les bateries no són molt elevades, degut a que les condicions de mercat que s'estudien són amb preus més costosos. Això segueix la línia dels resultats obtinguts en aquest estudi.

L'estudi amb referència [9], el qual té una generació anual baixa al ser una regió amb clima continental, presenta uns valors de capacitat bastant més elevats que la resta d'estudis. Això es deu a que els costos d'instal·lació i dels inversors són molt inferiors als considerats en la resta d'estudis. Això denota una gran dependència dels resultats en funció dels preus dels components de la instal·lació i fa interessant fer un anàlisi de sensibilitat d'aquells components més susceptibles a les condicions del mercat (secció 8).

D'altra banda, a l'estudi amb referència [5], s'obtenen indicadors energètics bastant reduïts. El consum anual estudiat a Portugal és bastant elevat i això explica en part que la taxa d'autoconsum i el grau d'autosuficiència siguin baixos. Que la taxa d'autoconsum variï tant respecte el grau d'autosuficiència pot voler dir que el perfil estudiat té un consum nocturn més elevat, raó per la qual

utilitzar bateries és una opció molt adequada. Els indicadors energètics que s'obtenen en el estudi actual, ronden el 50% amb els preus de mercat actual, i arriben a valors del 80% si es redueixen els preus de les bateries.

Respecte a l'estudi amb referència [6], malgrat tenir una generació relativament baixa, obté uns resultats òptims de 2 kWp de mòduls solars i 2 kWh de capacitat a les bateries. Això es contraposa als resultats obtinguts en aquest estudi, els quals per a generacions i consums baixos conclou que no surt a compte instal·lar els mòduls. Aquest fet es pot deure a que en aquest estudi es considera que els costos d'instal·lació i de manteniment no depenen de la magnitud de la instal·lació. D'aquesta manera les petites instal·lacions no generen prou estalvi per recuperar la inversió.

8 Anàlisi de sensibilitat del model

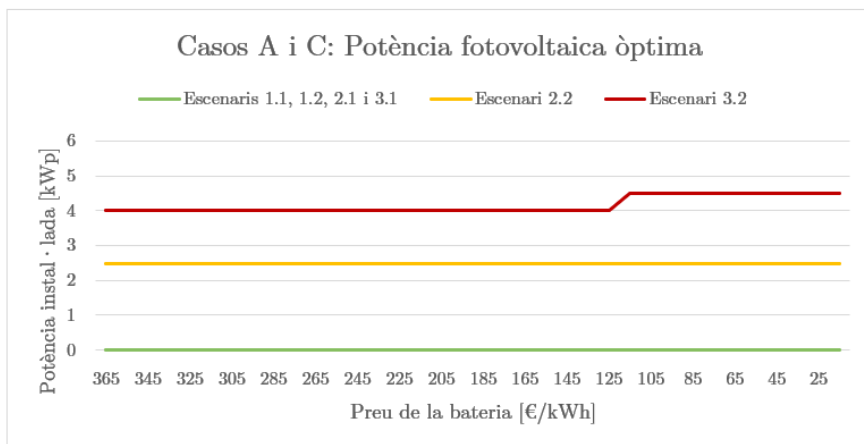
Aquest estudi té diverses limitacions. Com per a qualsevol model, els resultats estan limitats pels paràmetres d'entrada escollits per a la simulació. S'ha considerat interessant realitzar un estudi de sensibilitat del model envers dos paràmetres que són altament variables i tenen una elevada dependència de les condicions del mercat. Aquests dos paràmetres són els costos de manteniment i els costos d'instal·lació. S'han etiquetat els casos de la següent manera:

- **Cas A:** Model inicial sense variacions.
- **Cas B:** Model inicial considerant el **cost de manteniment nul**. Això és una situació bastant comuna, ja que el manteniment el pot dur a terme el propi propietari de la instal·lació.
- **Cas C:** Model inicial considerant el **50% del cost d'instal·lació inicial**. El cost d'instal·lació depèn de la empresa instal·ladora. Existeixen empreses instal·ladores que realitzen serveis a preus molt elevats, també hi ha companyies elèctriques que incorporen la instal·lació, o una part d'ella dins d'una altra oferta... El cost d'instal·lació utilitzat en el cas A és relativament elevat així que en el cas C s'obté per un 50% d'aquest valor, corresponent a un cost d'instal·lació de 600 €.

Els resultats obtinguts s'exposen en els següents apartats.

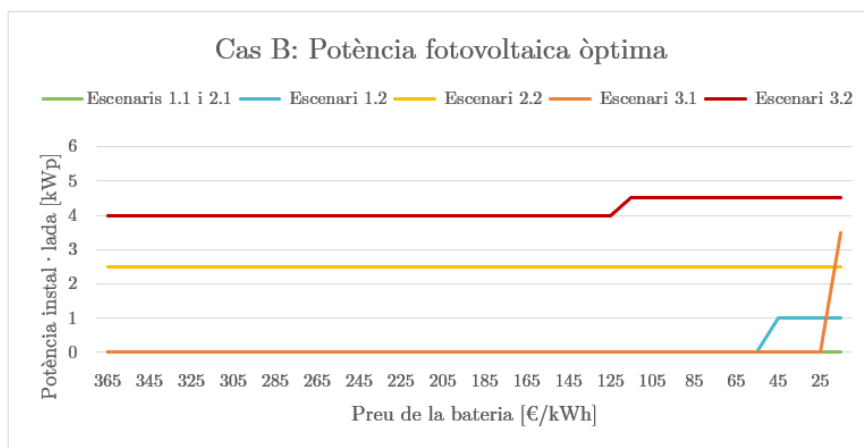
8.1 Potència fotovoltaica i capacitat de la bateria

D'entrada, s'exposen els gràfics que contenen les dades de la potència fotovoltaica i la capacitat de la bateria òptimes en funció pel preu d'aquesta, per als tres casos d'estudi.



Escenaris:

Consum \ Clima	Continental humit	Temperat mediterrani
Baix	1.1	1.2
Moderat	2.1	2.2
Alt	3.1	3.2



Escenaris:

Consum \ Clima	Continental humit	Temperat mediterrani
Baix	1.1	1.2
Moderat	2.1	2.2
Alt	3.1	3.2

* Els colors blau, taronja i verd es sobreposen en els valors nuls

Figura 35: A la dreta, gràfic dels resultats de potència fotovoltaica que optimitzen el VAN en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

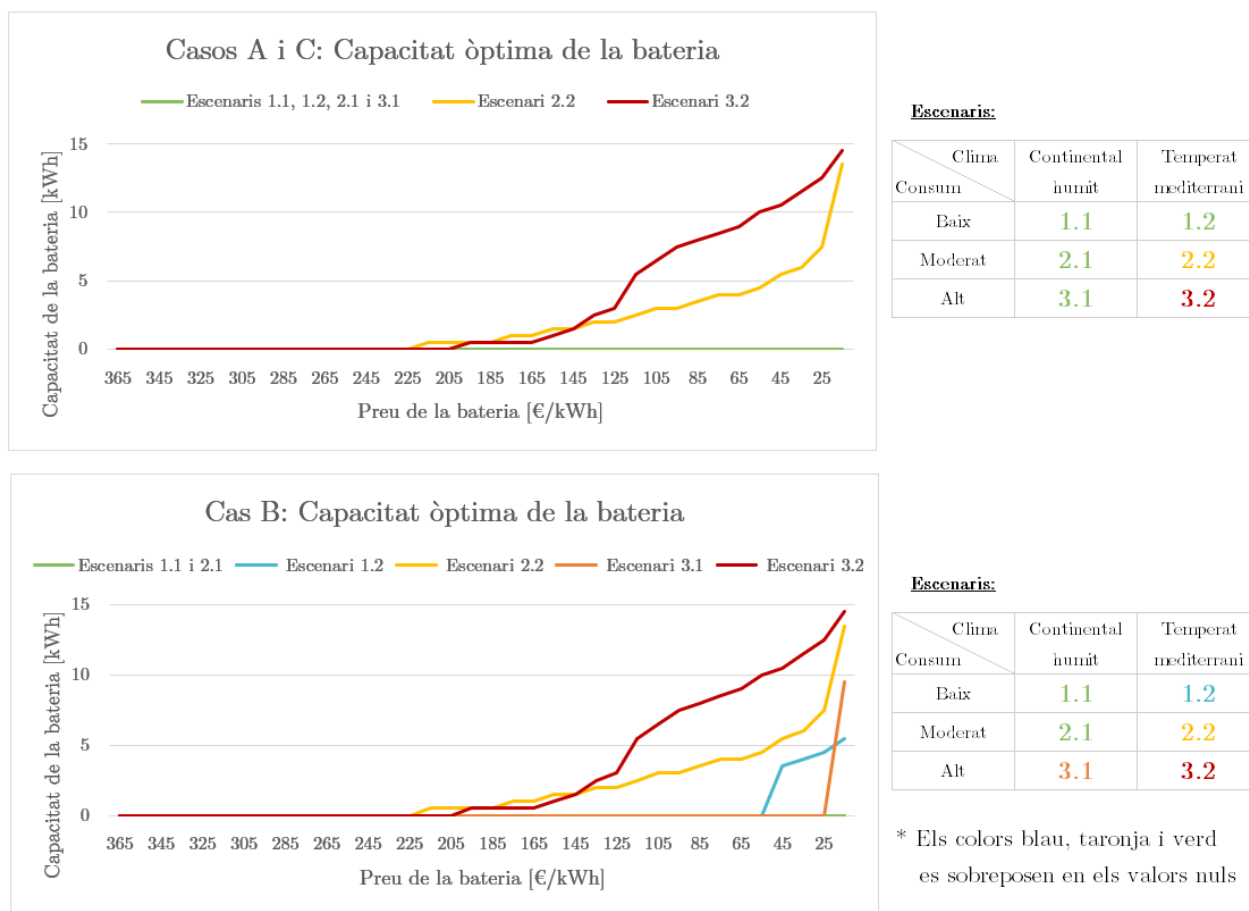
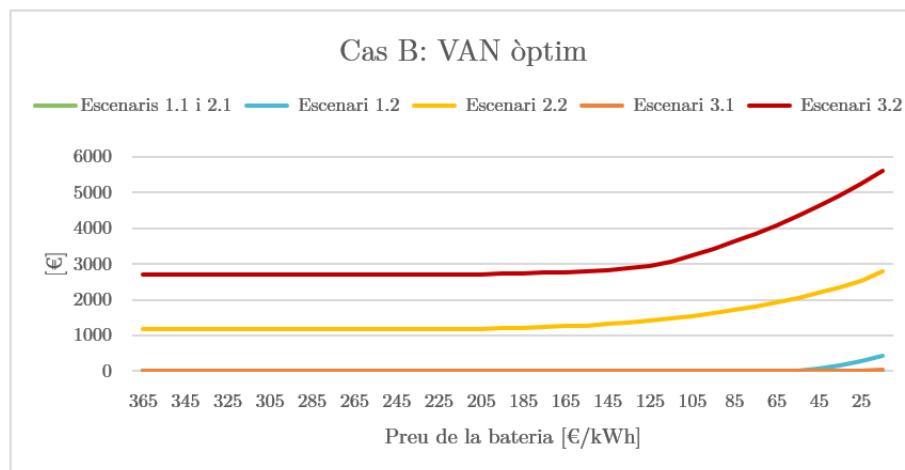
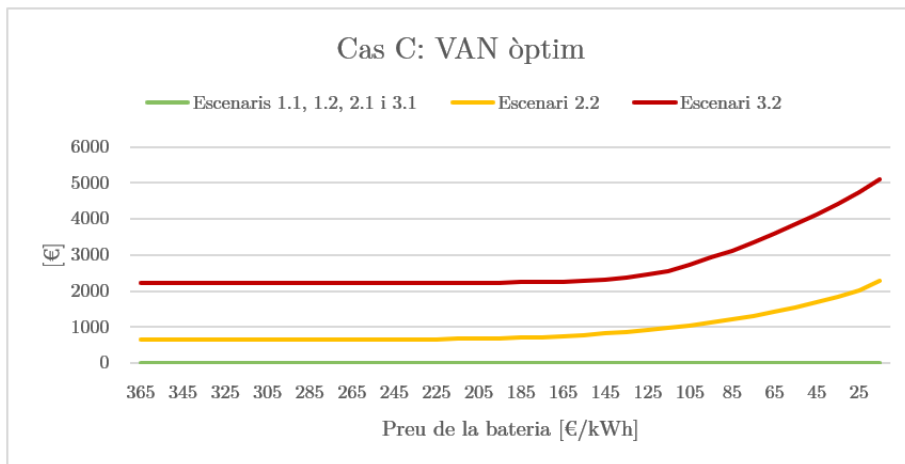
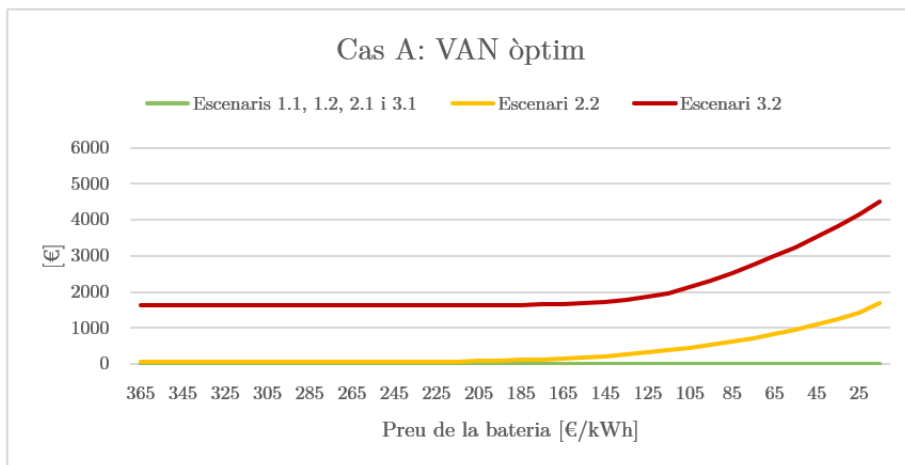


Figura 36: A la dreta, gràfic dels resultats de capacitats de la bateria que optimitzen el VAN en funció del preu d'aquesta per als casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

Els resultats obtinguts al Cas C són idèntics als obtinguts pel Cas A. Això és degut a que en el Cas C, la variació dels costos d'instal·lació afecta només a la inversió inicial. Això provoca que si que variïn els indicadors econòmics, però no provoca un canvi suficientment gran per a que canviïn els resultats energèticament òptims. No és així pel Cas B, en el qual s'observen com per a preus molt reduïts de bateries, els escenaris 1.2 i 3.1 passen a tenir resultats econòmicament òptims per a instal·lacions solars amb bateries. Aquests resultats denoten que **el model és més sensible a canvis en els costos de manteniment (reducció de 50 € anuals) que a canvis en la inversió inicial (reducció de 600 € l'any 0 de l'estudi).**

8.2 Indicadors econòmics

El següent punt a considerar són les dades dels indicadors econòmics, les quals s'il·lustren als següents gràfics.



Escenaris:

Clima Consum	Continental humit	Temperat mediterrani
Baix	1.1	1.2
Moderat	2.1	2.2
Alt	3.1	3.2

Escenaris:

Clima Consum	Continental humit	Temperat mediterrani
Baix	1.1	1.2
Moderat	2.1	2.2
Alt	3.1	3.2

* Els colors blau, taronja i verd es sobreposen en els valors nuls

Figura 37: A la dreta, gràfic del VAN òptim en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

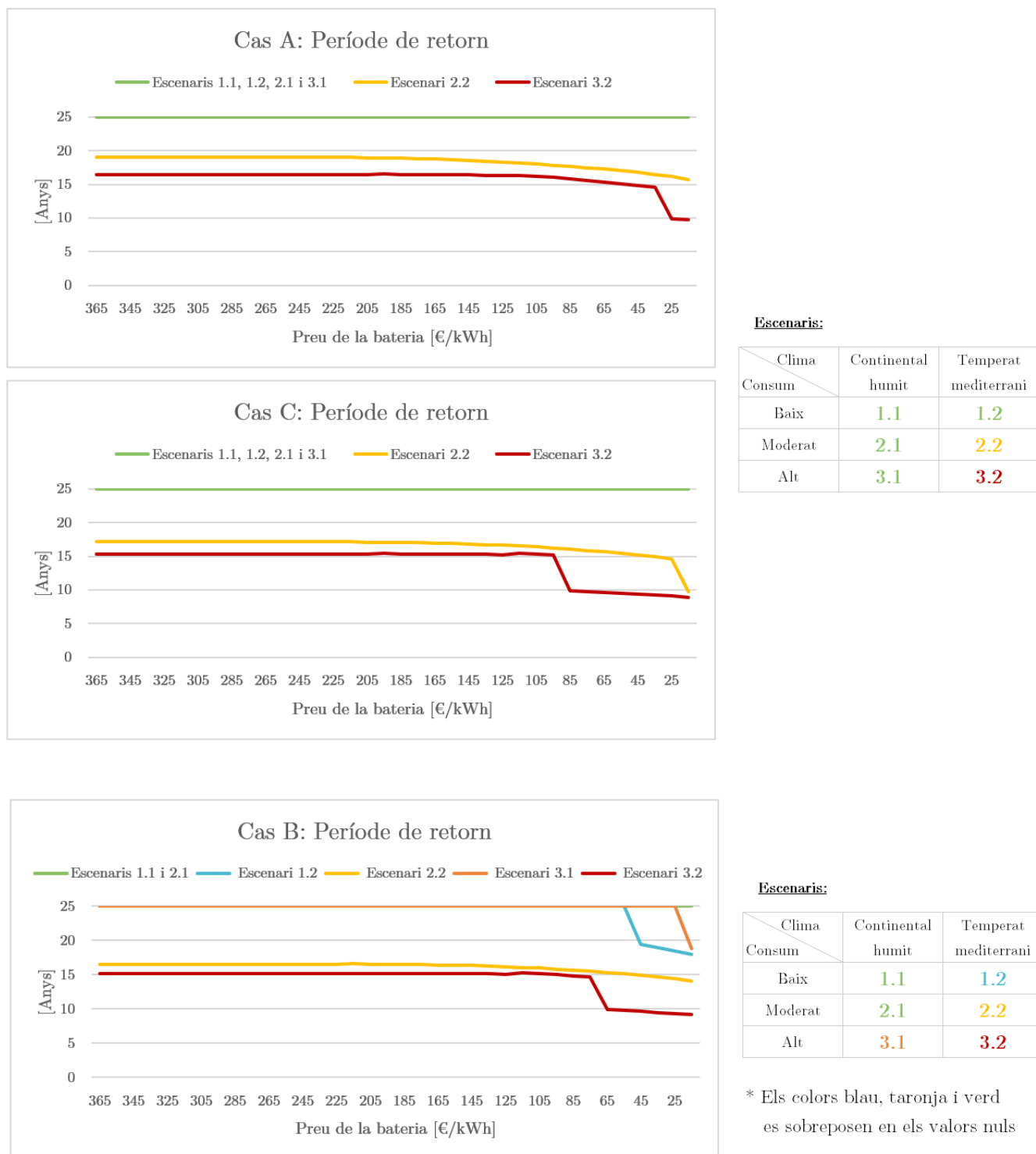


Figura 38: A la dreta, gràfic dels períodes de retorn en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

Pel que fa als indicadors econòmics, s'observen canvis en els tres casos, sent els resultats de més a menys rendibles: **Cas B** \geq **Cas C** \geq **Cas A**. El Cas B obté uns valors del VAN més de 1000 € superiors als del Cas A i més de 500 € superiors al del Cas C, per a tots els escenaris de preu. A la secció anterior s'observa com per al Cas B i preus molt reduïts de bateries, els escenaris 1.2 i 3.1 presenten instal·lacions fotovoltaïques i de bateries òptimes. En ambdós gràfics de VAN i període de

retorn, s'observa com aquests escenaris, tot i ser els més òptims, no tenen grans resultats econòmics (el VAN no supera els 500 € i el període de retorn no baixa dels 17 anys).

Convé subratllar que en els gràfics del període de retorn, es distingeixen unes petites baixades brusques (el els casos A i B a l'escenari 3.2 i en el Cas C als escenaris 2.2 i 3.2). Aquestes baixades es produeixen dels 15 als 10 anys de període de retorn i són degudes als costos de substitució aplicats cada 10 anys, corresponents als canvis de bateries i inversors.

8.3 Indicadors energètics

En aquest apartat s'han agrupat les gràfiques de les dades els indicadors energètics obtingudes de la simulació dels tres casos.

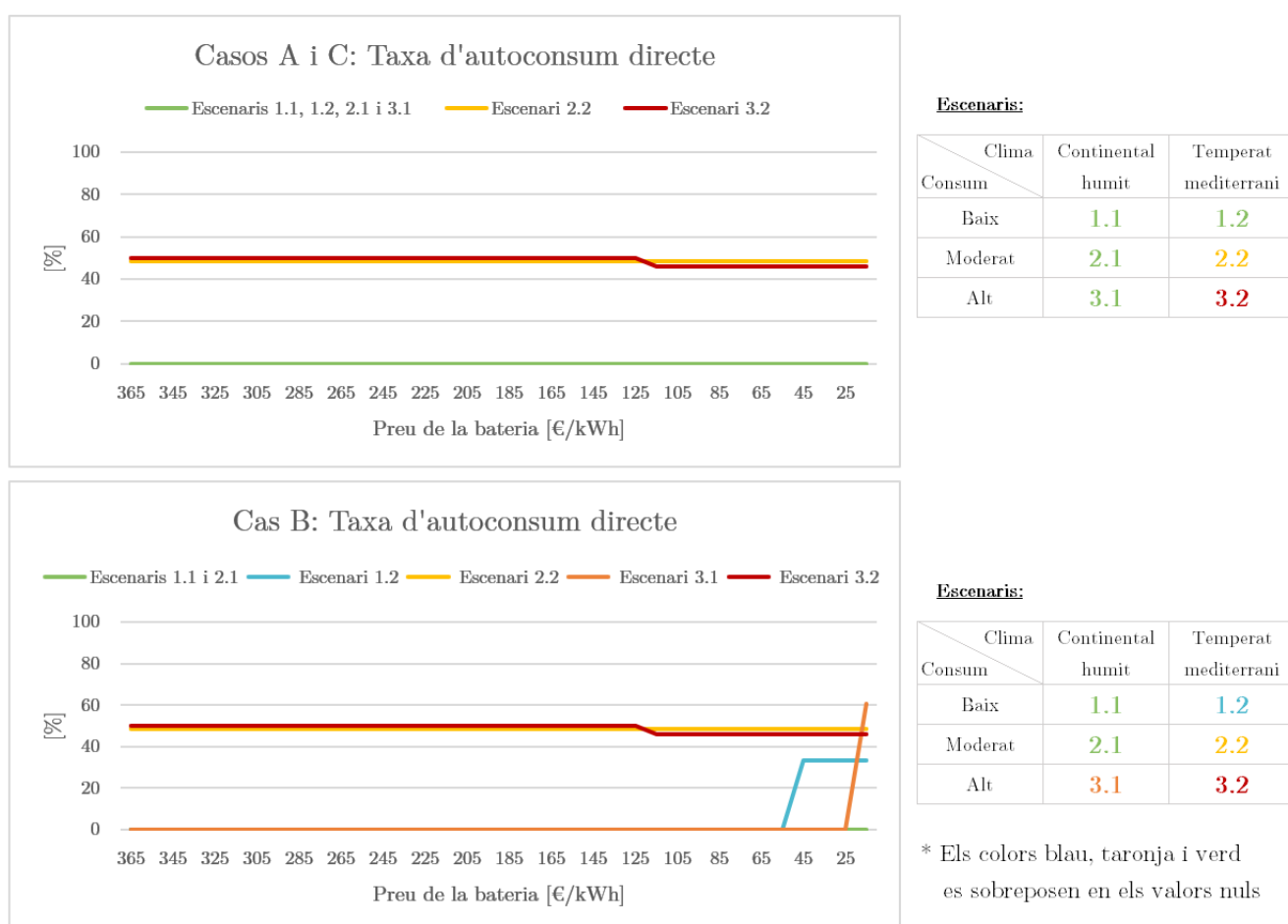
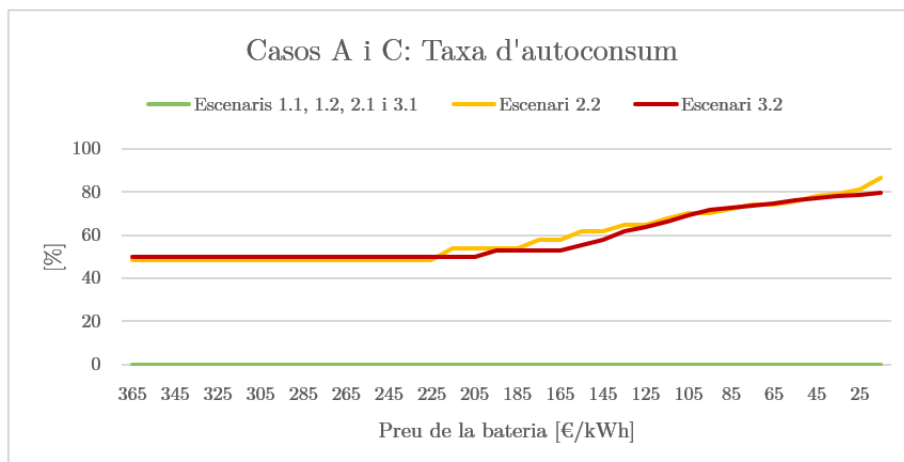
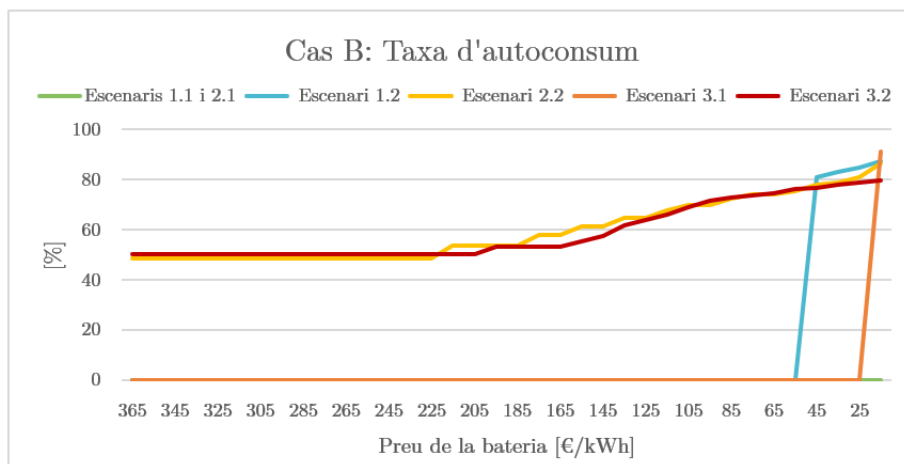


Figura 39: A la dreta, gràfic de les taxes d'autoconsum directe en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.



Escenaris:

Consum \ Clima	Continental humit	Temperat mediterrani
Baix	1.1	1.2
Moderat	2.1	2.2
Alt	3.1	3.2



Escenaris:

Consum \ Clima	Continental humit	Temperat mediterrani
Baix	1.1	1.2
Moderat	2.1	2.2
Alt	3.1	3.2

* Els colors blau, taronja i verd es sobreposen en els valors nuls

Figura 40: A la dreta, gràfic de les taxes d'autoconsum en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

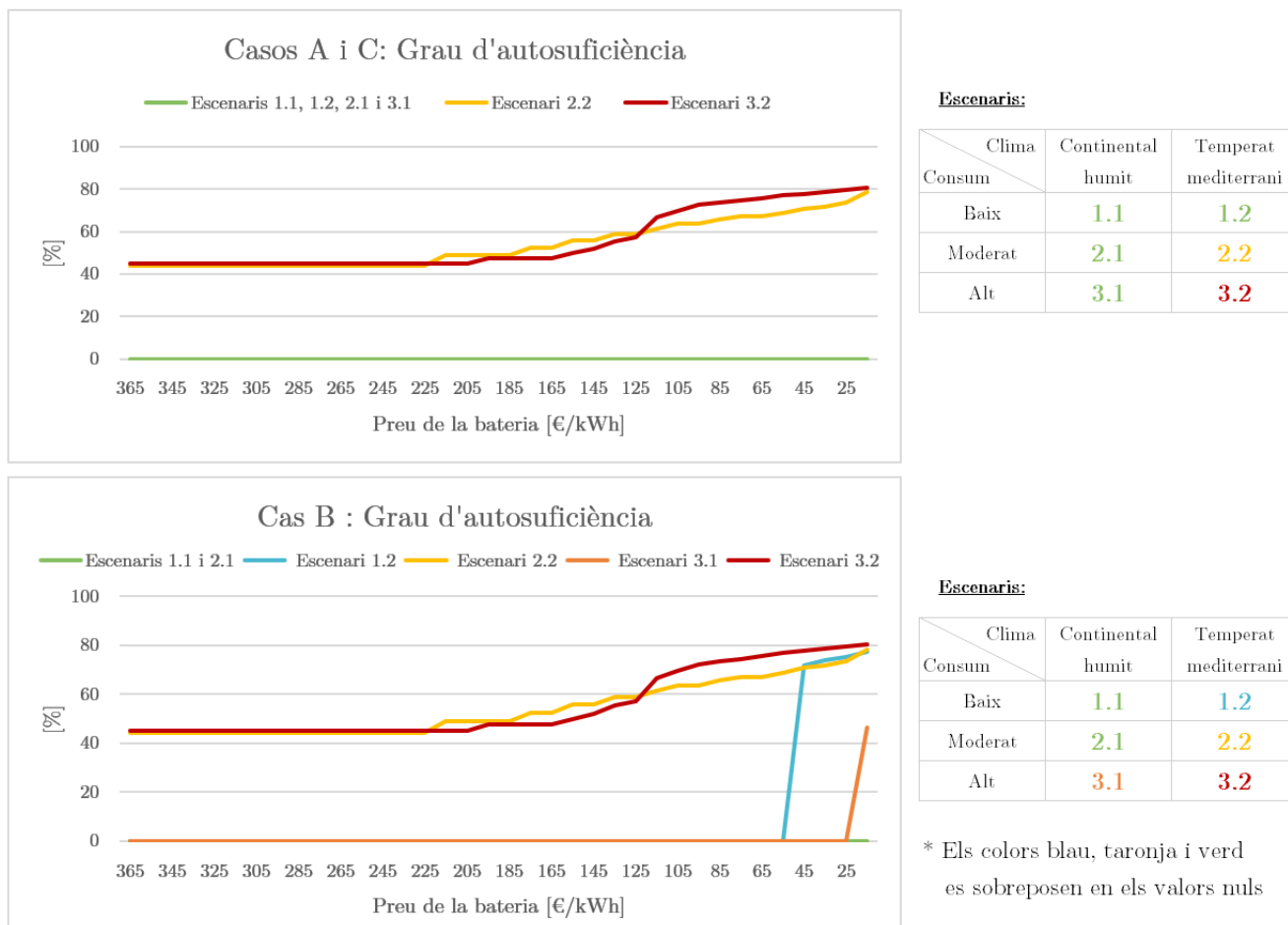


Figura 41: A la dreta, gràfic dels graus d'autosuficiència en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.

Concordant amb els resultats de les seccions anteriors, els resultats dels escenaris 3.2 i 2.2 són els mateixos per als tres casos. No així pels escenaris 1.2 i 3.1, els quals comencen a ser rendibles en el Cas B. Aquests dos escenaris aconseguen sortir rendibles a partir de preus molt baixos de les bateries, i aconseguen uns resultats energètics semblants a la resta, amb taxes d'autoconsum i autosuficiència rondant el 80%.

El comportament de l'escenari 3.1 és interessant a comentar. Quan comença a ser rendible, aconseguix resultats d'autoconsum directes més elevats que la resta. Com ja s'ha comentat, aquesta taxa depèn de la diferència entre els perfils de generació i consum. No és així per la taxa d'autoconsum, la qual obté un valor màxim del 91%. Això es deu a que al tenir un consum elevat i una generació baixa, gairebé tot el que generen les plaques, ho consumeix el sistema. Degut a la baixa generació, el grau d'autosuficiència màxim d'aquest escenari no és tant elevat com als altres.

9 Impacte mediambiental

La idea principal d'aquest treball és que els sistemes d'emmagatzematge d'energia són essencials per integrar fonts d'energia renovables variables a la xarxa elèctrica. Si bé un dels objectius principals de l'ús d'energies renovables és mitigar l'impacte ambiental negatiu d'altres sistemes de generació d'electricitat, la producció de tecnologies com els panells solars o els sistemes d'emmagatzematge d'energia causa impactes ambientals per si mateixa. Per tant, comprendre l'impacte de la producció dels sistemes d'emmagatzematge d'energia és crucial per determinar el rendiment ambiental global de les energies renovables.

Els defensors de les energies solars citen freqüentment la manca d'emissions de l'energia solar, però els impactes ambientals comporten més que les emissions de centrals [28]. Els possibles impactes ambientals associats a l'ús de **panells solars** són, entre d'altres, l'ús de la terra i la pèrdua d'hàbitat, l'ús d'aigua i l'ús de materials perillosos en la fabricació. Tot i que no hi ha emissions d'escalfament global associades a la generació d'electricitat a partir de l'energia solar, hi ha emissions associades a altres etapes del cicle de vida solar, incloses la fabricació, el transport de materials, la instal·lació, el manteniment i el desmantellament [29].

Pel que fa a les **bateries**, requereixen la mineria de molts metalls i minerals. La mineria per a liti, grafit, cobalt, níquel i altres materials crea un perjudici mediambiental. A l'article [30], s'esmenta que l'impacte ambiental de les bateries depèn clarament de la química de la bateria, sobretot de la selecció d'electròlits i materials de pila de les cèl·lules. També depèn dels mètodes de producció. No obstant això, per obtenir una imatge completa de l'impacte ambiental, s'ha de considerar tota la petjada de carboni al llarg del cicle de vida de la bateria. L'ús de carboni s'acumula al llarg del cicle de vida del producte:

- Extracció de matèries primeres
- Energia per produir i transportar
- Energia de funcionament per mantenir les bateries carregades i refredades
- Reciclabilitat i impacte a la terra

D'aquesta manera es poden comparar els impactes ambientals de diferents bateries. Les bateries de liti, per exemple, no contenen materials perillosos mentre que les bateries d'àcid plom sí. Els dos tipus de bateries són reciclables, tanmateix, actualment es reciclen menys del cinc per cent de les bateries d'ions de liti [31].

Moltes tecnologies de bateries estan en desenvolupament. A l'informe [32] es posen de manifest tres d'elles:

- Les **bateries de liti** d'estat sòlid substitueixen l'electròlit, un component clau de la bateria normalment líquida, amb una ceràmica sòlida o un material polimèric. Aquestes bateries seran més segures i duren més.
- Les **bateries de flux redox** emmagatzemen energia de manera diferent a les alternatives convencionals. No són tan eficients, però duren més, cosa que facilitaria la demanda de recursos naturals i els processos de producció contaminants de les quals es basen les bateries. Els investigadors estan treballant per reduir el cost i la mida de les bateries de flux redox perquè puguin assolir tot el seu potencial.
- Les **bateries impreses** ja han tingut èxit comercial. De vegades més prim que un mil·límetre, s'utilitzen en targetes, etiquetes i dispositius de control mèdic.

Cal destacar doncs que **els canvis en el disseny i la producció podrien comportar beneficis mediambientals importants**. I que tot i l'impacte mediambiental, la tecnologia d'emmagatzematge és beneficiosa per compensar les emissions de CO_2 que d'una altra manera provindrien d'altres fonts.

10 Costos associats al projecte

En aquesta secció s'estudia la inversió que s'ha fet en la realització d'aquest estudi.

Els costos es calculen en forma de preu per hora multiplicat per les hores de treball. El sou d'un enginyer industrial recent graduat ronda els 1.500 €/mes [33], el que equival a aproximadament 10 €/hora. Un treball de fi de grau com aquest equival a un total de 12 crèdits ECTS, cadascun dels quals equival a 25 hores de feina. Així doncs, aquest estudi té un cost global de $10 \text{ €/h} \cdot 300 \text{ h} = 3.000 \text{ €}$.

Per l'altre banda, aquest treball ha aportat una nova perspectiva en l'estudi de les energies renovables. El balanç entre costos/beneficis es pot considerar, des del punt de vista de la creadora del treball, positiu.

Conclusions

Primerament, es presenten les conclusions de manera **quantitativa**. Com es descriu a la secció 2.1, aquest treball perseguia tres objectius principals.

En primer lloc, l'estudi de la viabilitat econòmica d'implantar sistemes fotovoltaics amb emmagatzematge d'energia en habitatges de consum domèstic i clima europeu, en funció de l'evolució del preu de les bateries.

A partir de la creació d'un model de simulació, s'han aconseguit resultats que permeten predir l'evolució dels sistemes d'emmagatzematge, en cas de que la hipòtesis en la que es basa el treball, la reducció del preu d'aquests sistemes, es compleixi.

Per una banda, s'ha conclòs que el consum de l'habitatge i la generació solar de la localització geogràfica, són dos factors clau en la viabilitat econòmica. Com més elevats ambdós factors, més òptima resulta la instal·lació de fonts solars amb emmagatzematge. Utilitzant els preus del mercat actual (365 €/kWh a les bateries de liti i 125 €/kWh per a les bateries d'àcid plom), és òptim instal·lar:

- En zones amb climes continentals humits (zones del nord d'Europa com Alemanya), no surt rendible la instal·lació ni de plaques solars ni de sistemes d'emmagatzematge.
- En zones amb climes més calorosos com el temperat mediterrani (Espanya o Itàlia), és òptim instal·lar 2,5 kWp de plaques solars per habitatges amb un consum anual ≈ 4.200 kWh, i 4~4,5 kWp per habitatges amb consums anuals que ronden els 7.000 kWh. Aquests resultats concorden amb d'altres estudis de similars característiques.
- Actualment, en zones amb climes temperats mediterranis, és òptim acompanyar els mòduls solars amb bateries d'àcid plom d'una capacitat aproximada de 2,5 kWh. No així per a les bateries de liti, les quals actualment són massa cares per a considerar-se una opció òptima. Aquests resultats concorden amb estudis de similars característiques.

S'ha comprovat que aquests resultats estan en la línia d'altres estudis de l'àmbit. Pel que fa a futurs escenaris:

- Si els preus de les bateries disminueixen fins als 65 €/kWh, serà òptim augmentar la capacitat de la bateria fins a 4 kWh en habitatges de consum moderat, i fins a 9 kWh en habitatges de consum elevat.

- Si els preus de les bateries disminueixen fins als 15 €/kWh, serà òptim augmentar la capacitat de la bateria fins a 13,5 kWh en habitatges de consum moderat, i fins a 14,5 kWh en habitatges de consum elevat.

En general es pot concloure que amb disminucions dels preus de les bateries del 48% respecte l'actual, les capacitats òptimes de les bateries als habitatges es pot multiplicar x2 o x3, i amb disminucions del 88% es poden arribar a multiplicar x6. A més a més, és important remarcar que l'augment de la capacitat òptima de les bateries, pot comportar augments del VAN d'uns 2.000 € en un període de 25 anys, i disminucions del període de retorn d'uns 5 anys.

En segon lloc, l'estudi de la taxa d'autoconsum i el grau d'autosuficiència d'un habitatge que fa ús de bateries, en funció del preu d'aquestes.

S'han estudiat tres indicadors energètics: la taxa d'autoconsum directe, la taxa d'autoconsum i el grau d'autosuficiència. La taxa d'autoconsum directe depèn en gran part de si el perfil de consum de l'habitatge coincideix amb les hores de major radiació o no. No està relacionat amb l'existència o no de bateries i per tant no ha servit per extreure'n grans conclusions.

El segon indicador serveix per estudiar el rendiment que s'obté de la instal·lació domèstica. L'augment de capacitat instal·lada de les bateries augmenta aquest indicador, de manera que passa de tenir uns valors al voltant del 50% a valors de 80% o superiors a mesura que s'estudien preus mes baixos de les bateries.

El tercer indicador té un comportament semblant al segon, augmentant d'un 50% a un 80% a mesura que s'estudien preus inferiors de les bateries. El grau d'autosuficiència és el més interessant dels tres indicadors, ja que permet calcular quin tant per cent de l'energia consumida prové de la instal·lació fotovoltaica. L'ideal seria aconseguir instal·lacions que poguessin ser aïllades de la xarxa, o consumir el mínim possible d'ella. D'aquesta manera, es disminueix l'ús d'energia provinent de fons no renovables.

En tercer i últim lloc, la realització d'un anàlisi de sensibilitat de la rendibilitat d'instal·lacions fotovoltaïques amb bateries en funció dels paràmetres més incerts del model.

Per finalitzar l'estudi, s'han realitzat simulacions variant dos elements de les condicions inicials, per separat. Aquests elements són els costos de manteniment (de 50 €/any passen a considerar-se nuls) i els costos d'instal·lació (de 1.200 € passen a considerar-se 600 €).

Ambdues simulacions han obtingut resultats semblants als de la simulació inicial, amb la diferència de que amb preus de les bateries més reduïts, es considerarà òptima la opció d'instal·lar panells fotovoltaics i fins i tot bateries per a aquells escenaris amb consums i generacions menors. També és important destacar que la reducció dels costos de manteniment provoca una diferència més elevada (potències i capacitats més elevades) que la dels costos d'instal·lació.

De manera **qualitativa**, es conclou que actualment ja és rendible disposar d'instal·lacions de generació solar amb petits sistemes d'emmagatzematge. Aquest resultat ja ha estat contemplat en altres estudis en diverses regions del món, on s'extreuen diferents potències i capacitats en funció de la radiació solar i consum de l'habitatge d'estudi. També en aquest estudi s'ha pogut comprovar que la generació i el perfil de consum són factors decisius. A més a més, es determina que a mesura que disminueixin els preus de les bateries, la capacitat òptima creix de manera exponencial, provocant un augment del VAN de la inversió molt important. També, en funció del consum, és possible augmentar la potència solar instal·lada. Observant aquests resultats i la tendència global a afavorir la creació de fonts renovables mitjançant ajudes governamentals, es preveu un augment de la l'energia que tindrà origen en instal·lacions domèstiques i de la introducció de sistemes d'emmagatzematge com a solució de la dependència horària de les fonts solars.

Resumint, gràcies a la realització d'aquest estudi, s'ha pogut comprovar que si els preus de les bateries continuen disminuint, la perspectiva per a la generació d'energia solar en els habitatges domèstics és molt bona, i pot considerar-se una mesura transcendental en la transició energètica prevista en els pròxims anys. Els habitatges poden arribar a tenir un gran d'autosuficiència superior al 80% en aquells països on la radiació solar és elevada. També és molt important destacar que aquests sistemes d'energies renovables també tenen un impacte ambiental i que s'ha de seguir innovant i creant noves tecnologies per a aconseguir arribar al mínim impacte mediambiental possible, en tots els aspectes.

Bibliografia

- [1] IRENA. “Resumen de: Transformación energética mundial: hoja de ruta hasta 2050”. A: (2018). (accessed: 28.05.2020).
- [2] *SolarPower Europe*. URL: <https://www.solarpowereurope.org/about/>. (accessed: 25.05.2020).
- [3] Ralph J. Brodd. *Batteries for Sustainability*. Springer, New York, NY, 2013.
- [4] Victor de Regás Peña. “Optimización económica de un sistema doméstico de generación y almacenamiento de energía”. A: (2018). (accessed: 20.03.2020).
- [5] Luís Fialho Ana Foles i Manuel Collares-Pereira. “Techno-economic evaluation of the Portuguese PV and energy storage residential applications”. A: (2020). (accessed: 18.04.2020).
- [6] Ghanim Putrus Yue Wang Ridoy Das i Richard Kotter. “Economic evaluation of photovoltaic and energy storage technologies for future domestic energy systems – A case study of the UK”. A: (2020). (accessed: 18.04.2020).
- [7] Jose Ignazio Aizpurua Ferdinando Chiacchio Diego D’Urso i Lucio Compagno. “Performance assessment of domestic photovoltaic power plant with a storage system”. A: (2018). (accessed: 18.04.2020).
- [8] Mina Najafi Ashtiani et al. “Techno-economic analysis of a grid-connected PV / battery system using the teaching-learning-based optimization algorithm”. A: (2020). (accessed: 03.05.2020).
- [9] Tobias S. Schmidt Joern Hoppmann Jonas Volland i Volker H. Hoffmann. “The economic viability of battery storage for residential solarphotovoltaic systems—A review and a simulation model”. A: (2014). (accessed: 18.04.2020).
- [10] Yuanlong Cui et al. “Energy assessment and economic sensitivity analysis of a grid-connected photovoltaic system”. A: (2019). (accessed: 03.05.2020).
- [11] *Irena*. URL: <https://www.irena.org/>. (accessed: 26.05.2020).
- [12] AutoSolar. *Panell Solar 270W*. URL: <https://autosolar.es/paneles-de-conexion-a-red/panel-solar-270w-talesun-policristalino>. (accessed: 10.04.2020).
- [13] *Your home by Australian Government*. URL: <https://www.yourhome.gov.au/energy/batteries-and-inverters>. (accessed: 28.05.2020).
- [14] *Wholesale Solar*. URL: <https://www.wholesalesolar.com/blog/lead-acid-vs-lithium-batteries>. (accessed: 28.05.2020).
- [15] M.Greenwooda F.Duffnerab M.Wentkera i J.Leker. “Battery cost modeling: A review and directions for future research”. A: (2020). (accessed: 28.05.2020).

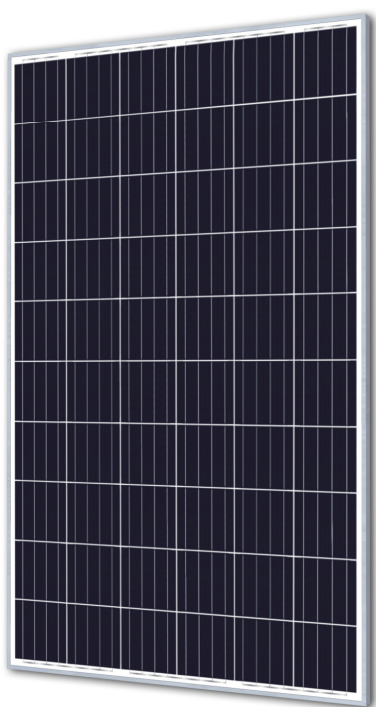
- [16] TV3. *La llum a Espanya és la cinquena més cara d'Europa, tot i que cau el preu de l'energia*. URL: <https://www.ccma.cat/324/per-que-la-factura-de-la-llum-sapuja-tot-i-que-baixa-el-preu-de-produccio/noticia/2974496/>. (accessed: 28.04.2020).
- [17] He H et al. "Electricity prices for household consumers". A: (2020). (accessed: 30.05.2020).
- [18] Saule Mil~ciuvien et al. "The Role of Renewable Energy Prosumers in Implementing Energy Justice Theory". A: (2019). (accessed: 30.05.2020).
- [19] Clean Energy Wire. *EEG reform 2016 – switching to auctions for renewables*. URL: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/eeg-reform-2016-switching-auctions-renewables>. (accessed: 29.05.2020).
- [20] Council of the European Union. *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources*. URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10308-2018-INIT/en/pdf>. (accessed: 29.05.2020).
- [21] Agência Estatal Boletín Oficial del Estado. *Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica*. URL: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-5089. (accessed: 28.04.2020).
- [22] Selectra. *Las mejores tarifas de luz para el autoconsumo con placas solares*. URL: <https://selectra.es/autoconsumo/info/tarifas>. (accessed: 28.04.2020).
- [23] European Commission. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>. (accessed: 26.04.2020).
- [24] Noah Pflugradt. *Load Profile Generator*. URL: <https://www.loadprofilegenerator.de/>. (accessed: 26.04.2020).
- [25] Selectra. *¿Cómo instalar placas solares y cuánto me cuesta?* URL: <https://selectra.es/autoconsumo/info/instalacion>. (accessed: 28.04.2020).
- [26] Habitissimo. *Hacer mantenimiento placas solares: Precio y Presupuestos*. URL: <https://www.habitissimo.es/presupuestos/hacer-mantenimiento-placas-solares>. (accessed: 28.04.2020).
- [27] Autosolar. *¿Qué mantenimiento requiere un panel solar?* URL: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-mantenimiento-requiere-un-panel-solar>. (accessed: 28.04.2020).

- [28] FORBES James Taylor. *Batteries Impose Hidden Environmental Costs for Wind and Solar Power*. URL: <https://www.forbes.com/sites/jamestaylor/2017/08/17/batteries-impose-hidden-environmental-costs-for-wind-and-solar-power/#77c191d9b4e1>. (accessed: 28.04.2020).
- [29] Union of concerned scientists. *Environmental Impacts of Solar Power*. URL: <https://www.ucsusa.org/resources/environmental-impacts-solar-power>. (accessed: 29.05.2020).
- [30] Eurostat. "Flowbattery production: Materials selection and environmental impact". A: (2020). (accessed: 14.06.2020).
- [31] Solar.com. *How Green are Home Batteries? The Environmental Impact of Lithium-Ion*. URL: <https://www.solar.com/learn/how-green-are-home-batteries-the-environmental-impact-of-lithium-ion/>. (accessed: 29.05.2020).
- [32] Eco-business. *Can we make batteries better for the environment?* URL: <https://www.eco-business.com/news/can-we-make-batteries-better-for-the-environment/>. (accessed: 29.05.2020).
- [33] Universidad Europea. *Cuál es el sueldo de un ingeniero industrial*. URL: <https://universidadeuropea.es/blog/cuanto-gana-un-ingeniero-industrial#:~:text=Con%20todo%20esto%2C%20es%20natural,carrera%20ronde%20los%201.500%E2%82%AC..> (accessed: 01.06.2020).

A Plec tècnic de característiques d'una placa solar

TP660P

Polycrystalline Solar Module 60 Cell Series



KEY FEATURES

275W

Highest power output

10 years

Material & workmanship warranty

PID Free

Certified by TUV Rheinland

25 years

Linear power output warranty

- Positive power tolerance: 0-+3%
- Robust design: Certified to withstand up to 2400 Pa wind load and up to 5400 Pa snow load
- Proved high reliability built on dozens of projects
- Four busbar cell: Improve the efficiency of modules

QUALITY WARRANTY

TALESUN guarantees that defects will not appear in materials and workmanship defined by IEC61215, IEC61730 and UL1703 under normal installation, use and maintenance as specified in Talesun's installation manual for 10 years from the warranty starting date.



ABOUT TALESUN

Suzhou Talesun Solar Technologies Co., Ltd. is one of the world's largest integrated PV manufacturers. Its standard and high-efficiency product offerings are among the most powerful and cost-effective in the industry. With over 6 GW of modules installed globally, we are a leading solar energy company built upon proven product reliability and sustainable performance.

PERFORMANCE WARRANTY

Polycrystalline Solar Cell Modules

- During the first year, TALESUN guarantees the nominal power output of the product will be no less than 97.5% of the labeled power output.
- From year 2 to year 24, the nominal power decline will be no more than 0.7% in each year; by the end of year 25, the nominal power output will be no less than 80.7% of the labeled power output.

ELECTRICAL PARAMETERS

Performance at STC (Power Tolerance 0 - +3%)				
Maximum Power (Pmax/W)	260	265	270	275
Operating Voltage (Vmpp/V)	30.6	31.0	31.3	31.7
Operating Current (Impp/A)	8.50	8.56	8.63	8.69
Open-Circuit Voltage (Voc/V)	37.9	38.2	38.5	38.7
Short-Circuit Current (Isc/A)	8.97	9.04	9.09	9.17
Module Efficiency ηm(%)	15.9	16.2	16.5	16.8

Performance at NOCT				
Maximum Power (Pmax/W)	192	196	199	203
Operating Voltage (Vmpp/V)	28.3	28.7	28.9	29.2
Operating Current (Impp/A)	6.78	6.83	6.90	6.97
Open-Circuit Voltage (Voc/V)	35.0	35.2	35.5	35.7
Short-Circuit Current (Isc/A)	7.26	7.32	7.36	7.42

*STC: 1000W/m², 25°C, AM 1.5 *NOCT: 800W/m², 20°C, AM 1.5, Wind Speed: 1m/s

MECHANICAL SPECIFICATION

Cell Type	Poly Crystalline
Cell Dimensions	156.75*156.75mm(6inch)
Cell Arrangement	60(6*10)
Weight	18.5kg(40.8lbs)
Module Dimensions	1650*992*35mm(64.96*39.06*1.38inch)
Cable Length	900mm(35.4inch)
Cable Cross Section Size	4mm ² (0.006sq.in)
Front Glass	3.2mm High Transmission, Tempered Glass
No. of Bypass Diodes	3/6
Packing Configuration (1)	30pcs/Pallet, 840pcs/40hq
Packing Configuration (2)	30pcs+5pcs/Pallet, 910pcs/40hq
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP65/IP67

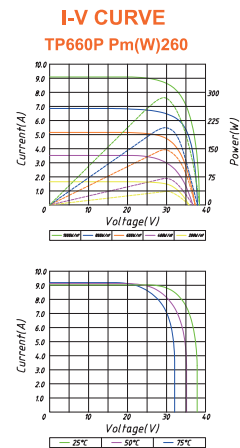
OPERATING CONDITIONS

Maximum System Voltage	1000V/DC(IEC)
Operating Temp.	-40 C ~+85 C
Maximum Series Fuse	15A
Static Loading	5400Pa
Conductivity at Ground	≤ 0.1Ω
Safety Class	II
Resistance	≥100MΩ
Connector	MC4 Compatible

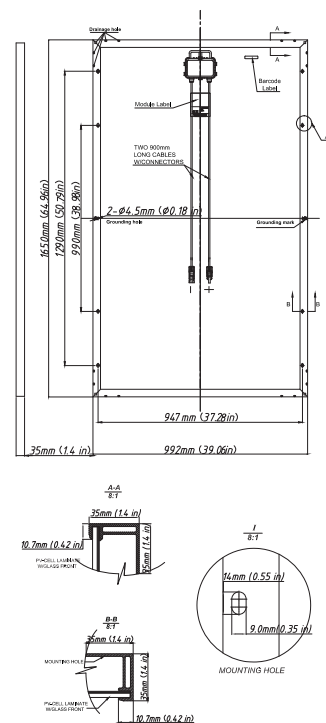
SUZHOU TALESUN SOLAR TECHNOLOGIES CO.,LTD.
 Email: sales@talesun.com Web: www.talessun.com Tel: + 86 400 885 1098

TEMPERATURE COEFFICIENT

Temperature Coefficient Pmax	-0.40%/°C
Temperature Coefficient Voc	-0.31%/°C
Temperature Coefficient Isc	+0.06%/°C
NOCT	45±2°C



TECHNICAL DRAWINGS



Specifications subject to technical changes without notice. Talesun Solar Rev. 2017.7

B Model de regressió per a preus de bateries

- **Model de regressió per a preus de bateries d'àcid de plom:**

A continuació s'hi troben els resultats obtinguts de les dades de bateries de plom àcid, al mercat actual.

Statistics

Variable	Total Count	Minimum	Q1	Q3	Maximum	Range
Capacitat Plom [kWh]	46	0,096	1,185	3,780	13,080	12,984
Preu Plom [€]	46	21,5	182,1	372,5	1640,0	1618,5

Figura 42: Estadístiques descriptives, inclouen el nombre de mostres, mínim i màxim de la mostra, primer i tercer quartil i el rang d'aquesta.

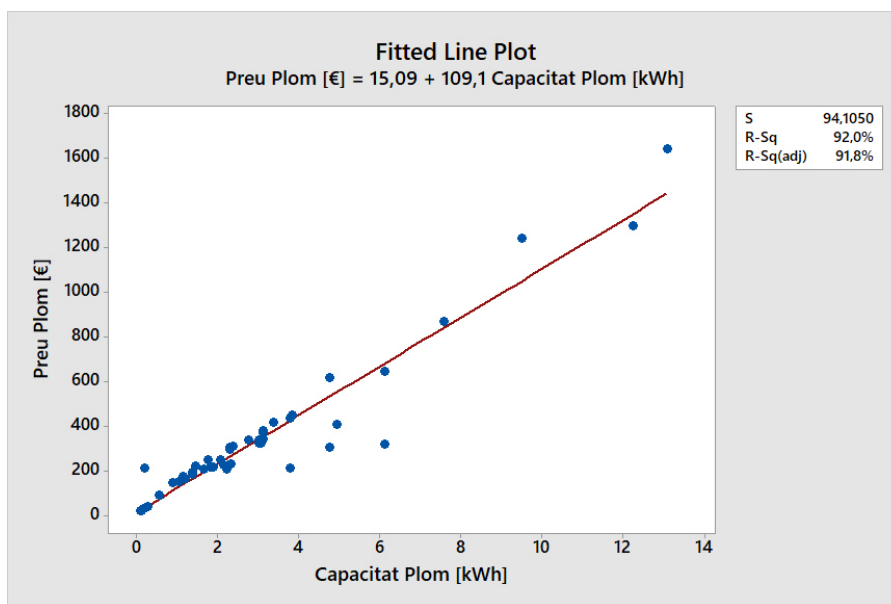


Figura 43: Gràfic de l'ajust lineal de les dades. Els punts blaus representen les dades i la recta vermella és la regressió lineal obtinguda.

Es conclou que l'ajust lineal s'escau, amb un coeficient de determinació d'ajust del 92%. S'obté la regressió lineal següent:

$$P_{plom} = 15,09 + 109,1 \cdot C; \quad P \text{ en } [€]; \quad C \text{ en } [kWh] \quad (23)$$

- **Model de regressió per a preus de bateries de liti:**

A continuació s'hi troben els resultats obtinguts amb el Minitab de les dades de bateries de liti, al mercat actual.

Statistics

Variable	Total					
	Count	Minimum	Q1	Q3	Maximum	Range
kWh Liti	18	0,222	1,425	6,375	12,000	11,778
Preu [€]Liti	18	188	1093	8382	13086	12898

Figura 44: Estadístiques descriptives, inclouen el nombre de mostres, mínim i màxim de la mostra, primer i tercer quartil i el rang d'aquesta.

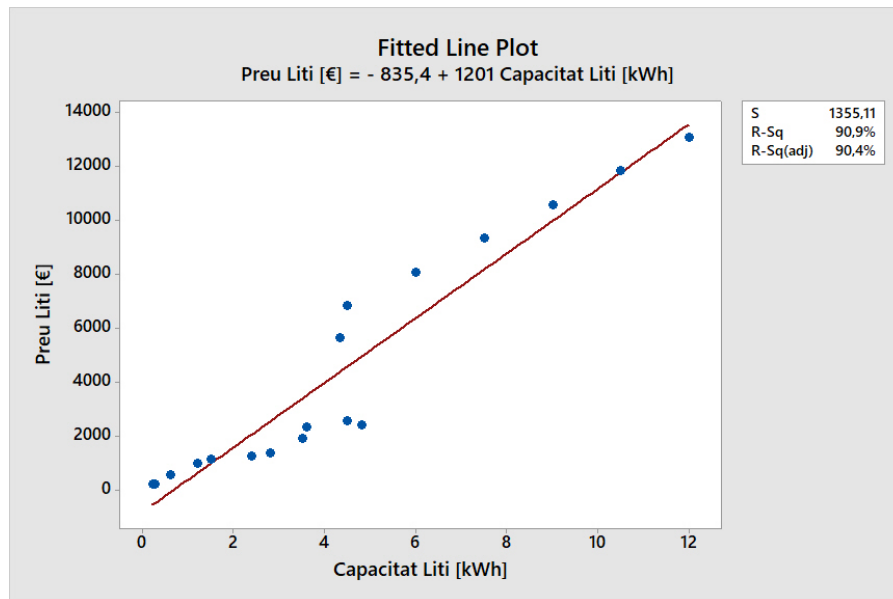


Figura 45: Gràfic de l'ajust lineal de les dades. Els punts blaus representen les dades i la recta vermella és la regressió lineal obtinguda.

Es conclou que l'ajust lineal s'escau, amb un coeficient de determinació d'ajust del 90,9%.

S'obté la regressió lineal següent:

$$P_{liti} = \begin{cases} -835,4 + 1201 \cdot C, & \text{si } C > 0,7 \\ 0, & \text{altres casos} \end{cases} ; \quad P \text{ en } [€]; C \text{ en } [kWh] \quad (24)$$

C Codi dels programes

- Fitxer *Importar.py*

```

""" Descripció del programa:
Input= nom del fitxer amb extensió txt
Output= diccionari de columnes: les claus són el nom de la columna
i els valors corresponen a una llista amb les dades de la columna"""
from decimal import Decimal

def importar(nom_fitxer): #el nom ha d'estar entre '' i contenir l'extensió txt
('exemple.txt')
    with open(nom_fitxer) as fitxer:
        lines = []
        dic_col={}
        for line in fitxer:
            lines.append(line.split())
        num_col=len(lines[0])#número de columnes
        num_files=len(lines)#número de files, inclou una fila amb el nom de la
columna
        for i in range(1,num_col+1):
            col_i=[]
            n=0
            while n<num_files:

                col_i.append(lines[n][i-1])
                n=n+1
            nom_col_i=col_i.pop(0)#retorna i elimina el primer element de la
llista

            string=nom_col_i #guarda el nom de la columna
            nom_col_i=[]
            for j in range(0,len(col_i)):
                punt=col_i[j].replace(',','.')
                if i in (1,2,3):
                    nom_col_i.append(int(punt))
                else:
                    nom_col_i.append(Decimal(punt))
            dic_col[string]=nom_col_i
        return dic_col

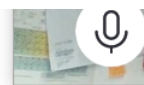
```

- Fitxer *Paràmetres.py*

```

"Costos:"
Cpv = 0.48 #Cost d'una placa [euro/Wp]
Cinv = 0.64 #Cost de l'inversor [euro/Wp]
Cm = 0 #Costos anuals de manteniment
Ci = 1200 #Cost d'instal·lacio
"Altres parametres economics"
i = 0.01 #Taxa interna de retorn anual (en %)
T = 25 #Periode d'estudi economic en anys
Preu = 0.0001280 # Preu electricitat [euro/Wh]
Venda= 0.00006 # Preu de venda electricitat [euro/Wh]

```



- Fitxer *Programa.py*

```

"""
@author: Sílvia Moreno Garcia
"""

#s'importen llibreries de python
from decimal import Decimal

#s'importen altres programes
from importar import importar
import parametres

def simulacio():
    #s'obtenen les columnes de demanda i generació solar
    localitzacio1_1='C:/Users/Sílvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI
8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/1.1.txt'
    localitzacio1_2='C:/Users/Sílvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI
8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/1.2.txt'
    localitzacio2_1='C:/Users/Sílvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI
8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/2.1.txt'
    localitzacio2_2='C:/Users/Sílvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI
8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/2.2.txt'
    localitzacio3_1='C:/Users/Sílvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI
8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/3.1.txt'
    localitzacio3_2='C:/Users/Sílvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI
8/TFG/Consums i generacions/Database de consums finals/3.2.txt'
    r={}

    "Iteració 0"
    for fitxer_importacio in ['1_1','1_2','2_1','2_2','3_1','3_2']:

        if fitxer_importacio=='1_1':
            dic_var=importar(localitzacio1_1)
        elif fitxer_importacio=='1_2':
            dic_var=importar(localitzacio1_2)
        elif fitxer_importacio=='2_1':
            dic_var=importar(localitzacio2_1)
        elif fitxer_importacio=='2_2':
            dic_var=importar(localitzacio2_2)
        elif fitxer_importacio=='3_1':
            dic_var=importar(localitzacio3_1)
        elif fitxer_importacio=='3_2':
            dic_var=importar(localitzacio3_2)
        mes=dic_var['mes']
        dia=dic_var['dia']
        hora=dic_var['hora']
        E_demanda=dic_var['E_demanda']
        E_pvg_unitari=dic_var['E_pvg']

        l_y=[]
        l_payback=[]
        l_var=[]
        l_c=[]
        l_p=[]

```



```

l_q_pvcd=[]
l_q_pvc=[]
l_q_s=[]

num_dades=len(mes)
P_max=6000 #Wp
C_max=15000 #Wh

E_demanda_total = 0
E_pvg_total = 0
for i in range(0,num_dades):
    E_pvg_total = E_pvg_total+E_pvg_unitari[i]
    E_demanda_total = E_demanda_total+ E_demanda[i]

"Iteració 1"
for y in range (365,5,-10): #y el preu de la bateria en euro/kWh de
capacitat
    P_optim=0
    C_optim=0
    q_pvcd_optim=0
    q_pvc_optim=0
    q_s_optim=0
    payback_optim=0
    van_optim=0
    print('y=',y)

"Iteració 2"
for P in range (0,P_max+500,500):

    E_pvg=[]
    for i in range(0,num_dades):
        E_pvg.append(E_pvg_unitari[i]*P/1000)

    #es simula un any de consum
    E_pvcd=[]
    for i in range(0,num_dades):
        if (E_pvg[i]-E_demanda[i])>0:
            E_pvcd.append(E_demanda[i])
        else:
            E_pvcd.append(E_pvg[i])

    E_sobrant=[]
    E_pv_xarxa=[]
    for i in range(0,num_dades):
        if (E_pvg[i]-E_demanda[i])>0:
            E_sobrant.append(E_pvg[i]-E_demanda[i])
            E_pv_xarxa.append(Decimal(0))
        else:
            E_sobrant.append(Decimal(0))
            E_pv_xarxa.append(E_demanda[i]-E_pvg[i])

```

```

#C=capacitat en kWh de la bateria
#0.8=profunditat de descarrega de la bateria

"Iteració 3"
for C in range (0,C_max+500,500):

    E_bat=[]
    C_min=0.2*C
    E_bat.append(Decimal(C_min))
    E_batc=[]
    E_batc.append(Decimal(0))
    E_venda=[]
    E_venda.append(Decimal(0))
    for i in range(1,num_dades):
        if (E_bat[i-1]-E_batc[i-1]+E_sobrant[i-1]) > C:
            E_bat.append(Decimal(C))

    E_venda.append(E_sobrant[i-1]+E_bat[i-1]-E_batc[i-1]-Decimal(C))
    else:
        E_bat.append(E_bat[i-1]+E_sobrant[i-1]-E_batc[i-1])
        E_venda.append(Decimal(0))
    if (E_bat[i]-E_pv_xarxa[i]) > C_min:
        E_batc.append(E_pv_xarxa[i])
    else:
        E_batc.append(E_bat[i]-Decimal(C_min))
    E_xarxa=[]
    for i in range(0,num_dades):
        E_xarxa.append(E_pv_xarxa[i]-E_batc[i])

    """ Càlcul dels indicadors energètics:
    - Taxa d'autoconsum directe: q_pvcd
    - Taxa d'autoconsum: q_pvc
    - Grau d'autosuficiència: q_s
    """

    E_pvc_total = 0
    E_pvcd_total = 0
    E_pvg_total = 0
    E_demanda_total = 0
    E_venda_total = 0
    E_xarxa_total = 0

    for i in range(0,num_dades):
        E_pvc_total = E_pvc_total+ (E_pvcd[i] + E_batc[i])
        E_pvcd_total = E_pvcd_total+E_pvcd[i]
        E_pvg_total = E_pvg_total+E_pvg[i]
        E_demanda_total = E_demanda_total+ E_demanda[i]
        E_venda_total = E_venda_total+E_venda[i]
        E_xarxa_total = E_xarxa_total+E_xarxa[i]

    if E_venda_total > E_xarxa_total:
        E_venda_total = E_xarxa_total

    if E_pvg_total==0:

```

```

        q_pvcd=0
        q_pvc=0
    else:
        q_pvcd= round(float((E_pvcd_total/E_pvg_total)*100),2)
        q_pvc=round(float((E_pvc_total/E_pvg_total)*100),2)
        q_s=round(float((E_pvc_total/E_demanda_total)*100),2)

    "Càlcul del Cashflow:"
    Cbat=y*C/1000

    if P==0:
        I0=0
    else:
I0=(parametres.Cpv*P+Cbat+parametres.Cinv*P+parametres.Ci)
        #posició de la llista = any d'estudi

    Ingressos=[0]

    for i in range (0,parametres.T):

Ingressos.append(float(E_pvc_total)*parametres.Preu+float(E_venda_total)*paramet
res.Venda)

        Cashflow=[-I0]
        for i in range(1,parametres.T+1):
            if P==0:
                Cashflow.append(round(Ingressos[i],2))
            elif i%10==0:
                Cashflow.append(round(Ingressos[i]-parametres.Cm -
Cbat - parametres.Cinv*P,2))
            else:
                Cashflow.append(round(Ingressos[i]-parametres.Cm,2)
)

        Cashflow_acu=[-I0]
        for i in range (1,parametres.T+1):
            Cashflow_acu.append(Cashflow_acu[i-1]+Cashflow[i])

        """Càlcul dels indicadors econòmics:
        - VAN: van (en el període T)
        - Període de retorn: payback
        """
        anterior=Cashflow_acu[0]
        for i in range(1,parametres.T+1):
            if Cashflow_acu[i]<=0 and i!=parametres.T:
                anterior=Cashflow_acu[i]
            elif Cashflow_acu[i]<=0 and i==parametres.T:
                payback= '>'+str(parametres.T)
            else:

payback=round(i+abs(anterior)/(abs(anterior)+Cashflow_acu[i]),2)
                break
        van=0
        for j in range (0,parametres.T+1):
            van= van + Cashflow[j]/((1+parametres.i)**j)

```

```

van=round(van,2)

"Es busca el valor més òptim"
if van>van_optim:
    P_optim=P
    C_optim=C
    q_pvcd_optim=q_pvcd
    q_pvc_optim=q_pvc
    q_s_optim=q_s
    payback_optim=payback
    van_optim=van

l_y.append(y)
l_payback.append(payback_optim)
l_van.append(van_optim)
l_c.append(C_optim)
l_p.append(P_optim)

l_q_pvcd.append(q_pvcd_optim)
l_q_pvc.append(q_pvc_optim)
l_q_s.append(q_s_optim)

r[fitxer_importacio]=[l_payback,l_van,l_c,l_p,l_q_pvcd,l_q_pvc,l_q_s]

localitzacio='C:/Users/Silvia Moreno Garcia/Documents/QUATRI
8/TFG/Python/'+str(fitxer_importacio)+'.txt'
columnes=['euro/kWh de la bateria','P òptima','C òptima','VAN',
'Payback','q_pvcd', 'q_pvc','q_s']
with open(localitzacio, "w") as file:
    linea='\t'.join(columnes)
    file.write(linea)
    a=l_y
    b=l_p
    c=l_c
    d=l_van
    e=l_payback
    f=l_q_pvcd
    g=l_q_pvc
    h=l_q_s
    for a, b, c, d, e, f, g, h in zip(a, b, c, d, e, f, g, h): # et va
enviant la mateixa posició de toteses llistes
        llista=[str(a), str(b), str(c), str(d), str(e), str(f), str(g),
str(h)]
        linea='\t'.join(llista) #es crea un string amb els valors de les
columnes separats per tabulacions
        file.write('\n'+linea)

```

D Glossari dels programes

Definició de les variables: <i>Importar.py</i>	Variable	Tipus	Unitat
Nom del fitxer txt amb les dades	nom_fitxer	String	-
Llista llistes amb les línies del fitxer txt	lines	Llista	-
Diccionari que conté la informació del txt	dic_col	Diccionari	-
Iteració de les línies del fitxer txt	lines	String	-
Número de columnes	num_col	Enter	-
Número de files	num_files	Enter	-
Iteració del número de columna	i	Enter	-
Dades d'una columna amb ',' com a separació decimal	col_i	Llista de strings	-
Comptador auxiliar	n	Enter	-
Dades d'una columna	nom_col_i	Llista d'enters	-
Nom de la columna	string	String	-
Iteració del número de files	j	Enter	-
Dades d'una columna amb '.' com a separació decimal	punt	Llista de strings	-

Definició de les variables: <i>Paràmetres.py</i>	Variable	Valor	Unitat
Cost d'una placa	Cpv	0,48	€/Wp
Cost de l'inversor	Cinv	0,64	€/Wp
Costos anuals de manteniment	Cm	50	€/Any
Cost d'instal·lació	Ci	1.200	€
Taxa interna de retorn	i	0,01	%
Període d'estudi	T	25	Anys
Preu de compra de l'energia	Preu	0,0001280	€/Wh
Preu de venda de l'energia	Venda	0,00006	€/Wh

Definició de les variables: <i>Progrma.py</i>	Variable	Tipus	Unitat
Director de les dades per importar de l'escenari 1.1	localitzacio1_1	String	-
Director de les dades per importar de l'escenari 1.2	localitzacio1_2	String	-
Director de les dades per importar de l'escenari 2.1	localitzacio2_1	String	-
Director de les dades per importar de l'escenari 2.2	localitzacio2_2	String	-
Director de les dades per importar de l'escenari 3.1	localitzacio3_1	String	-
Director de les dades per importar de l'escenari 3.2	localitzacio3_2	String	-
Diccionari de valors òptims en funció de l'escenari	r	Diccionari de llistes	-
String iteratiu de l'escenari	fitxer_importacio	String	-
Diccionari de variables importades	dic_var	Diccionari	-
Variable mes	mes	Llista d'enters	Mes
Variable dia	dia	Llista d'enters	Dia
Variable hora	hora	Llista d'enters	Hora
Variable de consum de l'habitatge	E_demanda	Llista de decimals	Wh
Variable de generació d'un kWp	E_pvg_unitari	Llista de decimals	Wh
Valors que pren la variable y	l_y	Llista d'enters	-
Valors òptims del payback en funció de y	l_payback	Llista d'enters	Anys
Valors òptims del VAN en funció de y	l_van	Llista d'enters	€
Valors de la Taxa d'autoconsum directe optimitzant el VAN	l_q_pvcd	Llista de floats	%
Valors de la Taxa d'autoconsum optimitzant el VAN	l_q_pvc	Llista de floats	%
Valors del Grau d'autosuficiència optimitzant el VAN	l_q_s	Llista de floats	%
Número de files de les columnes	num_dades	Enter	-
Potència màxima dels mòduls solar	P_max	Enter	Wp
Capacitat màxima de les bateries	C_max	Enter	Wh
Consum anual	E_demanda_total	Decimal	Wh
Generació anual d'1 kWp	E_pvg_total	Decimal	Wh
Enter iteratiu del preu de les bateries	y	Enter	€/kWh
Potència fotovoltaica òptima en funció d'y	P_optim	Enter	Wp
Capacitat òptima en funció d'y	C_optim	Enter	Wh
Taxa d'autoconsum directe en funció d'y	q_pvcd_optim	Float	%
Taxa d'autoconsum en funció d'y	q_pvc_optim	Float	%
Grau d'autosuficiència en funció d'y	q_s_optim	Float	%
Payback òptim en funció d'y	payback_optim	Float	Anys
VAN en funció d'y k	van_optim	Float	€

Definició de les variables: <i>Progrma.py</i>	Variable	Tipus	Unitat
Enter iteratiu de la potència fotovoltaica	P	Enter	-
Variable de generació solar	E_pvg	Llista de decimals	Wh
Variable d'E_pvg consumida directament per la càrrega	E_pvcd	Llista de decimals	Wh
Variable d'energia solar no consumida directament	E_sobrant	Llista de decimals	Wh
Variable d'energia extreta de la xarxa si no hi ha emmagatzematge	E_pv_xarxa	Llista de decimals	Wh
Enter iteratiu de la capacitat de la bateria	C	Enter	Wh
Variable d'energia emmagatzemada	E_bat	Llista de decimals	Wh
Estat de càrrega mínim	C_min	Float	kWh
Variable d'energia subministrada per la bateria	E_batc	Llista de decimals	Wh
Variable d'energia sobrant que es ven a la xarxa	E_venta	Llista de decimals	Wh
Variable d'energia extreta de la xarxa	E_xarxa	Llista de decimals	Wh
Generació solar consumida anualment	E_pvc_total	Decimal	Wh
Generació solar consumida directament anualment	E_pvcd_total	Decimal	Wh
Generació solar anual	E_pvg_total	Decimal	Wh
Consum anual de la vivenda	E_demanda_total	Decimal	Wh
Energia que es ven a la xarxa anualment	E_venta_total	Decimal	Wh
Energia que s'extreu de la xarxa anualment	E_xarxa_total	Decimal	Wh
Taxa d'autoconsum directe	q_pvcd	Float	%
Taxa d'autoconsum	q_pvc	Float	%
Grau d'autosuficiència	q_s	Float	%
Cost de la bateria	Cbat	Float	€
Inversió inicial	I0	Float	€
Ingressos	Ingressos	Llista de floats	€
Cashflow	Cashflow	Llista de floats	€
Cashflow acumulat	Cashflow_acu	Llista de floats	€
Auxiliar pel càlcul del payback	anterior	Float	€
Payback de la iteració	payback	Float	Anys
VAN de la iteració	van	Float	€
Valor iteratiu de l'any d'estudi	j	Enter	Any
Director on s'exporten els resultats	localitzacio	String	-
Noms de les columnes a extreure	columnes	Llista de strings	-

E Índex de figures

Índex de figures

1	Esquema elèctric general d'una instal·lació domèstica.	12
2	Tendències de capacitat solar instal·lades en el món en els darrers anys [11].	13
3	Gràfic de l'evolució del cost de l'energia solar en funció de la tecnologia de la cel·la, durant el període 2010-2018 [11].	14
4	Gràfic del desenvolupament del cost de les bateries agrupat per tecnologia catòdica. Cada punt de dades representa el valor mitjà anual per tecnologia[15].	19
5	Preu de l'electricitat (amb impostos) per als consumidors domèstics, segon semestre del 2019, [€/kWh] [17].	22
6	Evolució dels preus d'electricitat per als consumidors domèstics durant el període 2008-2019 [€/kWh] [17].	22
7	Esquema lògic de la secció 5.	26
8	Gràfic d'exemple de la distribució del consum durant un dia d'hivern.	32
9	Gràfic d'exemple de la distribució del consum durant un dia d'estiu.	33
10	Gràfic d'exemple de la distribució de la generació per kWp instal·lat durant un dia d'hivern.	33
11	Gràfic d'exemple de la distribució de la generació per kWp instal·lat durant un dia d'estiu.	34
12	Gràfic d'exemple de la distribució de la generació i el consum diari	36
13	Captura d'un dels <i>txt</i> importats pel programa, el qual conté les dades de generació i consum de l'escenari 3.2, separades mitjançant tabulacions.	40
14	Captura d'un dels <i>txt</i> exportats pel programa, el qual conté els resultats de l'estudi d'optimització de l'escenari 3.2, separats mitjançant tabulacions.	41
15	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , passos 1 i 2.	42
16	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , passos 3 i 4.	43
17	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , pas 5.	43
18	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , pas 6 (a).	44
19	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , pas 6 (b).	44
20	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , pas 6 (b) ii. A.	45
21	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , càlcul d'indicadors energètics	45
22	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , càlcul del Cashflow	46
23	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , càlcul d'indicadors econòmics	46

24	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , pas 6 (c).	46
25	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , pas 6 (c).	47
26	Tros de codi del fitxer <i>Programa.py</i> , pas 7.	47
27	Diagrama de flux del funcionament del <i>Programa.py</i>	48
28	A la dreta, gràfic dels resultats de potència fotovoltaica que optimitzen el VAN en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats. . . .	52
29	A la dreta, gràfic dels resultats de capacitat de la bateria que optimitzen el VAN en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats. . . .	52
30	A la dreta, gràfic dels resultats del VAN òptim en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	53
31	A la dreta, gràfic dels resultats dels períodes de retorn que optimitzen el VAN en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats. . . .	53
32	A la dreta, gràfic dels resultats de les taxes d'autoconsum directe en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	54
33	A la dreta, gràfic dels resultats de les taxes d'autoconsum en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	55
34	A la dreta, gràfic dels resultats dels graus d'autosuficiència en funció del preu de la bateria. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	55
35	A la dreta, gràfic dels resultats de potència fotovoltaica que optimitzen el VAN en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	59
36	A la dreta, gràfic dels resultats de capacitats de la bateria que optimitzen el VAN en funció del preu d'aquesta pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	60
37	A la dreta, gràfic del VAN òptim en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	61
38	A la dreta, gràfic dels períodes de retorn en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	62
39	A la dreta, gràfic de les taxes d'autoconsum directe en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	63
40	A la dreta, gràfic de les taxes d'autoconsum en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	64
41	A la dreta, gràfic dels graus d'autosuficiència en funció del preu de la bateria, pels casos A, B i C. A l'esquerra, llegenda dels escenaris representats.	65

42	Estadístiques descriptives, inclouen el nombre de mostres, mínim i màxim de la mostra, primer i tercer quartil i el rang d'aquesta.	76
43	Gràfic de l'ajust lineal de les dades. Els punts blaus representen les dades i la recta vermella és la regressió lineal obtinguda.	76
44	Estadístiques descriptives, inclouen el nombre de mostres, mínim i màxim de la mostra, primer i tercer quartil i el rang d'aquesta.	77
45	Gràfic de l'ajust lineal de les dades. Els punts blaus representen les dades i la recta vermella és la regressió lineal obtinguda.	77