



Universitat
de les Illes Balears

TREBALL DE FI DE MÀSTER

EINA ESTADÍSTICA PER A LA INTEGRACIÓ DE LA CÀRREGA DE VEHICLES ELÈCTRICS MITJANÇANT ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, IMPACTE ENERGÈTIC I ECONÒMIC EN ELS APARCAMENTS PÚBLICS DE PALMA DE MALLORCA

Joan Enric Alcover Comas

Màster Universitari de Física Avançada i Matemàtica Aplicada

Centre d'Estudis de Postgrau

Any Acadèmic 2019-20

EINA ESTADÍSTICA PER A LA INTEGRACIÓ DE LA CÀRREGA DE VEHICLES ELÈCTRICS MITJANÇANT ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, IMPACTE ENERGÈTIC I ECONÒMIC EN ELS APARCAMENTS PÚBLICS DE PALMA DE MALLORCA

Joan Enric Alcover Comas

Treball de Fi de Màster

Centre d'Estudis de Postgrau

Universitat de les Illes Balears

Any Acadèmic 2019-20

Paraules clau del treball:

Vehicle Elèctric, Aparcaments, Energies Renovables, Energia Solar, Mètodes Estadístics,
Simulació Monte Carlo

Nom Tutor/Tutora del Treball: Vicente José Canals Guinand

RESUM

El present treball té com a objectiu analitzar l'impacte energètic i econòmic que tindria la incorporació d'una instal·lació fotovoltaica en règim d'autoconsum en modalitat d'excedents acompanyats a compensació, en el marc del RD244/2019, als aparcaments públics de les Illes Balears que ofereixin servei de recàrrega de Vehicles Elèctrics (VE). La metodologia proposada consta de diferents submòduls integrats en una eina numèrica desenvolupada en l'entorn MATLAB® i s'encarrega de: planificar estadísticament el nombre de places d'estacionament necessàries per a un determinat nivell de penetració del VE en funció de les dades històriques de facturació individual dels estacionaments, estimar la demanda energètica relacionada amb la càrrega a intervals d'un minut i de forma estadística a partir de la simulació d'un parc mòbil de VE representatiu, i calcular l'energia generada per una instal·lació fotovoltaica connectada a la xarxa tenint en compte efectes que limiten la generació elèctrica (com ombres, netedat de les plaques, efecte de la temperatura ambient, rendiment de l'inversor, tipus d'instal·lació). Seguidament, es presenta el mòdul encarregat de facturació amb una tarifa d'accésos 3.0A sota la modalitat d'autoconsum fotovoltaic amb excedents acompanyats a compensació. Una vegada presentada la metodologia, aquesta s'aplica a dos aparcaments situats a Palma amb característiques clarament diferenciades, per cada un dels quals s'analitza l'impacte sobre la demanda energètica i la facturació elèctrica anual de dos escenaris de generació fotovoltaica. Els resultats mostren com, amb nivells de penetració del VE relativament baixos (0,31-2,38%), els impactes sobre la demanda i la facturació energètica són rellevants, mentre que els diferents escenaris d'autoconsum fotovoltaic proposats conduiran a una reducció significativa tant de la demanda com de l'import anual de la factura energètica.

ABSTRACT

This work analyses the energetic and economic impact related with the incorporation of a photovoltaic installation in a regime of self-consumption in the modality of surpluses subject to compensation, within the framework of RD244 / 2019, in Balearic Islands public car parks which offer Electric Vehicle (EV) charging service. The proposed methodology consists in a set of submodules integrated in a numerical tool developed with MATLAB®, in charge to: statistically planning the number of parking spaces required for a given level of EV penetration based on the individual parking lot billing historical data, estimate the energy demand minute by minute related to the EV charge by a representative EV mobile fleet, assess the amount of energy generated by a grid-connected photovoltaic facility taking into account a set of limiting effects on power output, such as: shadows, cleanliness of the plates, effect of ambient temperature, inverter performance, type of installation. Then, the invoice module by a 3.0A access fee is presented, which integrates the photovoltaic self-consumption modality with surpluses subject to compensation. Once the methodology has been presented, the numerical tool based on is applied to a two parking lots located in the city of Palma with clearly differentiated characteristics, in order to analyze the impact on energy demand and the annual electricity billing of two photovoltaic generation scenarios. The results show that, with relatively low EV penetration levels (0,31-2,38%), the impacts on demand and energy billing are clearly significant, while the different scenarios of photovoltaic self-consumption will lead to a relevant reduction of the demand and the annual energy bill.

ÍNDEX

Introducció	13
Transició energètica a la UE	13
La descarbonització del transport	14
Objectius del treball	15
La mobilitat elèctrica	17
Anàlisi de l'actual parc automobilístic	18
A nivell internacional	18
A nivell espanyol	19
A nivell de les Illes Balears	20
Previsió de la penetració del vehicle elèctric.....	20
Models de vehicle elèctric més venuts.....	26
Metodologia	30
Metodologia de planificació i estimació de la demanda vinculada al Vehicle Elèctric	30
L'eina numèrica.....	31
Anàlisi i modelat de l'ocupació d'un aparcament	32
Generador de corbes de la demanda associada a la càrrega	33
Generador de l'ocupació del vehicle elèctric	35
Fase 1. Determinació del nombre d'intents d'estacionaments horaris	35
Fase 2. Determinació de les característiques dels estacionaments	37
Fase 3: Planificació de les infraestructures de recàrrega	39
Generació Fotovoltaica	40
Paràmetres ambientals	40
Radiació directe sobre el panell fotovoltaic inclinat	40
Model de radiació difusa.....	42
Radiació sobre la cel·la fotovoltaica.....	42
Model tèrmic.....	43

Model de l'inversor fotovoltaic	45
Generador de la demanda base horària	45
Generador de l'ocupació real i estimació de la demanda energètica.....	46
Integrador de la demanda	47
Facturació energètica.....	48
Terme de Potència	48
Terme d'energia activa	49
Penalització per energia reactiva.....	49
Impost de l'energia	49
Lloguer dels equips de mesura.....	49
Import final de la factura energètica.....	50
Resultats	51
Primer cas d'estudi: Aparcament d'Antoni Maura	52
Dades de partida	53
Patró anual d'estacionaments	54
Diagrama d'ocupació horària mitjana.....	55
Demanda base horària	56
Planificació.....	57
Anàlisi energètic	59
Anàlisi econòmic.....	61
Segon cas d'estudi: l'Aparcament de Comte d'Empúries.....	63
Dades de partida	64
Patró anual d'estacionaments	64
Diagrama d'ocupació horària mitjana.....	66
Demanda base horària	67
Planificació.....	68
Anàlisi energètic	69

Anàlisi econòmic.....	71
Conclusions	73
Bibliografia.....	76
Anexes	78

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1. Vendes de vehicles elèctrics de passatgers i quota de mercat en els principals mercats a nivell mundial, pel període 2013-19 [15].	17
Figura 2. Previsió de les ventes mensuals de vehicles elèctrics a nivell estatal, pels propers 5 anys (línia de color vermell previsió, línia de color gris ventes mensuals històriques).	23
Figura 3. Arquitectura de l'eina numèrica, basada en Matlab®, de planificació i estimació de la demanda energètica en règim d'autoconsum fotovoltaic.	31
Figura 4. Corbes de de potencia, energia acumulada i percentatge de carrega enfront del temps, per un vehicle elèctric pur (Volvo XC90).	35
Figura 5. (a) Diagrama d'ocupació horària mitjana de l'aparcament d'Antoni Maura (temporada alta). (b) Diagrama d'ocupació horària mitjana de l'aparcament d'Antoni Maura (temporada baixa).	36
Figura 6. Nombre d'intents d'estacionament horaris de vehicles elèctrics per 10 repeticions de l'any de referència (2017) i una penetració del vehicle elèctric del 2,38%, a l'aparcament de Parc de la Mar.	37
Figura 7. Funció de densitat de probabilitat en funció de la distància recorreguda (dreta) i funció de densitat acumulada (esquerra) generades amb l'eina MATLAB	38
Figura 8. Posició del sol, angles d'inclinació, d'incidència i d'orientació (azimut) dels panells solars. Font: [33].	41
Figura 9. Ubicació de l'aparcament d'Antoni Maura	52
Figura 10. Histograma dels períodes d'estacionament de l'aparcament d'Antoni Maura, en el període 01/01/2016-31/12/2017.	54
Figura 11. Diagrama d'ocupació horària mitja de l'aparcament d'Antoni Maura, pel període de 01/01/2016-01/01/2018.	56
Figura 12. Corba base de consum elèctric mig horari, aparcament d'Antoni Maura.	57
Figura 13. Previsió de l'evolució de les places d'estacionament i estacions de càrrega intel·ligents necessàries per a donar suport al VE. En verd, les places d'aparcament necessàries per cobrir el 99% dels intents d'estacionament PEV i en groc per cobrir el 99,6%.	58
Figura 14. Evolució del consum energètic mig anual per període de facturació i per a diferents penetracions del VE a l'aparcament d'Antoni Maura.	59
Figura 15. Aparcament de Comte d'Empúries. a: Ubicació de l'aparcament. b: Orientació de l'aparcament. c: Descripció i ubicació de les marquesines solars.	64
Figura 16. Histograma dels períodes d'estacionament de l'aparcament d'Antoni Maura, en el període 01/01/2016-31/12/2017.	65

Figura 17. Diagrama d'ocupació horària mitja de l'aparcament d'Antoni Maura, pel període de 01/01/2016-01/01/2017.	66
Figura 18. Corba base de consum elèctric mig horari, aparcament de Comte d'Empúries.	67
Figura 19. Planificació de les places i estacions de carrega de VE requerides els pròxims 5 anys, de l'aparcament Comte d'Empúries.	68
Figura 20. Evolució del consum energètic mig anual per període de facturació i per a diferents penetracions del VE, a l'aparcament de Comte d'Empúries.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Taula 1. Vendes de tipus de vehicle elèctrics per països d'Europa, l'any 2019	18
Taula 2. Evolució de la quota de marcat del vehicle elèctric a Espanya. [19]	19
Taula 3. Evolució de les matriculacions de vehicles elèctrics per tipologia a Espanya [19].	19
Taula 4. Evolució de les matriculacions de vehicles elèctrics a les Illes Balears [19], [21].	20
Taula 5. Ventes mensuals de vehicles elèctrics a nivell Espanya. Font: Ideauto.....	20
Taula 6. Previsió de ventes de vehicles elèctrics a Espanya, pels propers 5 anys.	24
Taula 7. Dades de l'evolució del parc mòbil nacional de turismes. Font: DGT	24
Taula 8. Previsió de la quota de mercat del vehicle elèctric en els propers 5 anys.	25
Taula 9. Dades de la flota de turismes presents a les Illes Balears. Font: [23]	25
Taula 10. Previsió de la penetració del vehicle elèctric a les Illes Balears, pels propers 5 anys.	26
Taula 11. Models que conformen la flota de vehicles elèctrics a la Unió Europea per volum, any 2019. Font: [17].....	26
Taula 12. Ventes dels principals vehicles elèctrics purs (BEV) a Espanya durant el període 2014-2019. Font: Ideauto [24]	27
Taula 13. Ventes dels principals vehicles híbrids endollables (PHEV) a Espanya durant el període 2014- 2019. Font: Ideauto	27
Taula 14. Característiques tècniques del BEV més venuts a nivell espanyol.	28
Taula 15. Característiques tècniques del PHEV més venuts a nivell espanyol.....	28
Taula 16. Percentatges i característiques dels VE que componen la flota, a l'eina numèrica.	33
Taula 17. Percentatges de penetració del vehicle elèctric al parc de turismes de les Illes Balears analitzats per l'eina.	36
Taula 18. Resultats de planificació obtinguts amb la metodologia proposada amb una penetració del vehicle elèctric del 2,38% , a l'aparcament d'Antoni Maura.	39
Taula 19. Coeficients segons la configuració del muntatge.	44
Taula 20. Format del fitxer CSV amb les dades de la informació de les facturacions històriques mensuals, exemple factures de l'aparcament d'Antoni Maura.....	46
Taula 21. Cost actual del terme de potencia per un patge d'accés 3.0A.	48
Taula 22. Procediment per avaluar el terme de potencia en funció de la potencia registrada pel maxímetre.	49
Taula 23. Rotacions de vehicles a l'Aparcament d'Antoni Maura. Font: SMAP.....	53
Taula 24. Paràmetres estadístics de la distribució d'estacionaments, de l'aparcament d'Antoni Maura.	55
Taula 25. Paràmetres de la distribució de Weibull ajustada, de l'aparcament d'Antoni Maura.	55

Taula 26. Paràmetres de l'ocupació màxima de l'aparcament d'Antoni Maura.	56
Taula 27. Planificació del desplegament de noves places d'estacionament i estacions de càrrega intel·ligents pels propers 5 anys, aparcament d'Antoni Maura.	58
Taula 28. Increment de la demanda energètica degut a la recàrrega de VE pels pròxims 5 anys.	60
Taula 29. Característiques tècniques dels panells fotovoltaics i els inversors	60
Taula 30. Evolució de la demanda energètica de l'aparcament per als diferents escenaris d'autoconsum fotovoltaic.	61
Taula 31. Facturació energètica associada a la demanda energètica de l'aparcament per als diferents escenaris d'autoconsum PV a l'aparcament d'Antoni Maura.	62
Taula 32. Rotacions de vehicles a l'aparcament de Comte d'Empúries. Font: SMAP	64
Taula 33. Paràmetres estadístics de la distribució d'estacionaments, de l'aparcament de Comte d'Empúries.....	65
Taula 34. Paràmetres de la distribució de Weibull ajustada, de l'aparcament situat a Comte d'Empúries.....	66
Taula 35. Paràmetres de l'ocupació màxima de l'aparcament de Comte d'Empúries.	67
Taula 36. Demanda energètica pels diferents escenaris d'autoconsum PV, a l'aparcament de Comte d'Empúries.....	70
Taula 37. Paràmetres associats als dos escenaris d'autoconsum PV, a l'aparcament de Comte d'Empúries.....	70
Taula 38. Facturació energètica associada a la demanda energètica de l'aparcament per als diferents escenaris d'autoconsum PV, a l'aparcament de Comte d'Empúries.....	72

INTRODUCCIÓ

El present capítol te per objecte abordar els antecedents i els objectius del present Treball de Fi de Máster (TFM). Concretament la descarbonització de l'economia europea, i en conseqüència l'espanyola, a través d'una transició energètica cap unes fonts d'energia sostenibles i de baixes o nul·les emissions, a fi d'obtenir la neutralitat climàtica l'any 2050, es l'eix vertebrador del present TFM. En aquest marc la descarbonització del transport terrestre i tendra un paper rellevant, on la mobilitat elèctrica esta destinada a jugar-hi un rol central en aquest canvi de model.

TRANSICIÓ ENERGÈTICA A LA UE

L'activitat dels éssers humans té una influència cada vegada més gran en el clima i les temperatures del planeta. On les enormes quantitats de gasos d'efecte hivernacle d'origen antròpic s'afegeixen als que s'alliberen de forma natural a l'atmosfera, augmentant l'efecte hivernacle i l'escalfament global. En particular, l'augment de la temperatura mitja del planeta és un factor especialment preocupant, ja que segons l'informe de l'Organització Meteorològica Mundial [1], els darrers 4 anys (2015-2019) han sigut els més càlids de la història, des de que es disposa de registres climàtics. Aquest canvis a la temperatura mitja del planeta estan en gran mesura propiciats per l'augment d'emissions de CO₂ a l'atmosfera, que es situen als màxims valors de concentració dels darrers 650.000 anys [2] i un 47% per sobre dels nivells preindustrials al segle divuit, al voltant de l'any 1750 [3]. On l'escalfament global del planeta és un dels reptes més importants als quals s'ha d'enfrontar la humanitat en el segle XXI i el procés de canvi cap a una economia descarbonitzada només és possible mitjançant un desplegament massiu d'energies renovables. Dins el camp de les energies renovables, l'energia solar és una de les més prometedores, ja que el sol és una font d'energia inesgotable, des del punt de vista del temps cronològic dels humans, i que ens arriba de forma neta i gratuïta.

Les institucions internacionals ja han començat a prendre mesures per tal de revertir l'actual escenari d'escalfament global. De fet, en la convenció de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic, celebrat a París el 2015, es va acordar una reducció en les emissions per tal de limitar l'increment de temperatura del planeta a 2°C sobre els nivells preindustrials [4] i fer esforços per intentar aconseguir

limitar l'augment de la temperatura a 1,5°C per sobre dels nivells preindustrials. Per tal d'assolir aquest objectiu és indispensable canviar el model de producció energètica a escala global per a reduir les emissions de Gasos amb Efecte Hivernacle (GEH), especialment els GEH d'origen antròpic més comuns tant en termes de quantitats alliberades a l'atmosfera com en termes d'impacte en l'escalfament global, el CO₂. Els objectius de la reducció del 70% de les emissions de CO₂ el 2050 respecte al 2015, requereixen d'una transformació radical del model energètic global i, en particular, del model de mobilitat. Tot i que aquest objectiu sembla trobar-se encara enfora de la realitat, la tendència dels últims anys és la d'aplanar la corba d'emissions [5] gràcies, en part, a l'augment de la producció d'energia a partir de fonts renovables [6]. Per complir aquests objectius, serà necessari la implicació de tots els sectors de la societat - des de governs, tant locals com nacionals, comunitats i els diferents sectors públics i privats - per al desenvolupament d'instal·lacions d'energia renovables (eòlica, solar fotovoltaica, solar tèrmica, ...) que ens condueixin cap a la senda de la tant necessària transició energètica real.

Seguint aquestes directrius, l'Agència Internacional de l'Energia (IEA) ha plantejat dos escenaris per assolir el objectius establerts a l'acord de París: Un primer escenari d'emissions que brindaria una probabilitat del 50% d'aconseguir limitar l'augment de la temperatura mitja del planeta en 2°C i un segon escenari d'emissions amb una probabilitat del 50% d'aconseguir un augment de la temperatura mitja del planeta per davall dels 1,75°C. En ambdós escenaris, les emissions de gasos d'efecte hivernacle relacionats amb la generació d'energia passen per aconseguir un balanç de zero emissions a la segona meitat del segle XXI. Per tal d'assolir aquests objectius, és imprescindible canviar el model de transport per tal de reduir-ne considerablement les emissions, ja que aquest representa un 25% del consum energètic mundial [7].

Un dels majors reptes que afronta actualment el conjunt de la humanitat és aconseguir desenvolupar models econòmics més sostenibles, passant per la conseqüent descarbonització i una millora de la eficiència energètica i que conduirà a una disminució del consum energètic. Pel que fa al transport terrestre, l'actual model mobilitat basat en el transport privat es troba davant el gran repte de la descarbonització, el que molt probablement conduirà a nou models o paradigmes de mobilitat. En aquest marc, la incorporació del vehicle elèctric a la flota de turismes es una de de les principals alternatives sobre la taula per a descarbonitzar la mobilitat de persones i el transport lleuger de mercaderies.

LA DESCARBONITZACIÓ DEL TRANSPORT

Les principals fonts d'energia utilitzades pel sector del transport provenen del petroli i altres combustibles líquids, tots ells emissors de GEH. De fet, el sector del transport representa un 20% de

les emissions de Gasos d'Efecte Hivernacle mundials relacionades amb l'energia, tractant-se bàsicament d'emissions de CO₂ vinculades a combustió del petroli i dels seus derivats [7]. Per això, cada cop més països estan buscant alternatives al vehicle de combustió interna, pel transport de persones i de mercaderies lleugeres, per uns vehicles més ecològics i sostenibles. Seient les alternatives més esteses els vehicles híbrids endollables (PHEV) i els vehicles elèctrics purs (BEV), que semblen més respectuosos amb el medi ambient i presenten costos operatius menors. Tot i així, la recàrrega associada a la mobilitat elèctrica podria arribar a tenir un impacte molt significatiu sobre els sistemes de generació i transport d'energia a mesura que la seva penetració avanci. Si aquesta recàrrega no es gestiona d'una forma intel·ligent, en un futur proper, podria arribar a tenir un efecte completament contrari contribuint en un augment de les emissions de CO₂ a l'atmosfera [8]. En conseqüència, la infraestructura elèctrica i la seva gestió [9] hauran de jugar un paper fonamental en el desplegament del vehicle elèctric (VE) [10]. De fet, l'electrificació del transport juga un paper important en tots els escenaris de la Agència Internacional de l'Energia (IEA) amb l'objectiu d'aconseguir la descarbonització del sistema energètic, on l'augment de l'electrificació del transport passa per la descarbonització del sector elèctric. La infraestructura de càrrega pel VE en l'espai públic és un factor essencial per a l'adopció per part dels consumidors dels vehicles elèctrics [11], tot i que la seva implementació pública encara no té viabilitat financera, de manera que el sector públic ha de prendre la iniciativa en el seu desplegament [12].

En el marc de la transició energètica en curs, és necessària una penetració massiva de fonts renovables, principalment d'origen fotovoltaic (PV) en àmbits urbans relacionat amb l'autoconsum. Aquesta generació PV, caracteritzada per un subministrament d'energia no despachable i variable en el temps es podria combinar amb la recàrrega dels VE [13], caracteritzada per càrregues controlables i capacitat d'emmagatzematge d'energia. A la vegada, la producció d'energia d'origen PV també podria possibilitar una major penetració dels vehicles elèctrics, al no suposar un augment significatiu de la demanda neta si els VE es carreguen a partir d'energia PV.

OBJECTIUS DEL TREBALL

El present treball analitza el benefici energètic i econòmic que comportaria la incorporació de la generació fotovoltaica en la seva modalitat d'autoconsum amb excedents acol·lits a compensació [14], recollit en el *"Reial Decret 244/2019, de 5 d'abril, pel qual es regularen les condicions administratives, tècniques i econòmiques de l'autoconsum d'energia elèctrica"* sobre la demanda de les instal·lacions de càrrega dels VE ubicades en aparcaments públics, encara que es ben sabut que amb els actuals nivells de penetració del VE no presenten viabilitat financera. Sent l'objectiu principal del treball el desenvolupament d'una eina numèrica, que permetí planificar les necessitats de noves

infraestructures de càrrega i l'impacte energètic que aquestes comportaran sobre la demanda base dels diferents aparcaments públics de Palma de Mallorca, pels nivells de penetració de VE previstos pels propers 5 anys a nivell de la comunitat autònoma de les Illes Balears, pel període 2020-2025. Aquesta eina ha de partir de les dades referents a les butlletes facturació d'estacionament (import, durada, hora d'entrada i sortida) del conjunt d'estacionaments al llarg de l'any 2017 (any de referència) que s'han donat a diferents aparcaments municipals de Palma, operats per la Societat Municipal d'Aparcaments i Projectes (SMAP).

El present treball s'estructura al voltant de 4 capítols. Al primer d'ells s'introdueixen els antecedents i els objectius del present Treball de Fi de Máster (TFM). Mentre que el segon capítol analitza l'escenari de mobilitat elèctrica actual i introdueix la metodologia utilitzada per a preveure els nivells de penetració del VE que es donaran als parc de turismes de les Illes Balears pels propers 5 anys. Al tercer capítol es descriu detalladament l'estructura i la metodologia pròpia desenvolupada i que incorpora a l'eina desenvolupada per a la planificació de les infraestructures de càrrega dels VE i per l'estimació de la demanda energètica específica; fonamentant-se en la corba de demanda energètica base (fonamentalment elèctrica) de les instal·lacions i incorporant la generació fotovoltaica que tindria associada una instal·lació solar fotovoltaica annexa a un determinar aparcament, per un nombre donat de panells i inversors. El quart capítol presenta y analitza el conjunt de resultats obtinguts d'aplicar la metodologia proposada, mitjançant l'eina numèrica implementada, en dos aparcaments públics de Palma. Concretament s'analitzen els resultats associats a la demanda energètica i els costos específics de càrrega dels VE per diferents escenaris de penetració del VE i de potència fotovoltaica pic instal·lada. Finalment, al cinquè capítol o de conclusions, es discuteixen els resultats obtinguts i les seves implicacions pràctiques en el desplegament d'aparcaments solars (pròvids d'instal·lacions fotovoltaiques) destinats minimitzar l'impacte econòmic i energètic associat a la càrrega dels vehicles elèctrics.

LA MOBILITAT ELÈCTRICA

L'Agència Internacional de l'Energia (IEA) ha establert dos escenaris per a aconseguir els objectius de limitació d'augment de la temperatura mitja del planeta, en ambdós casos seria necessari substituir el 10% dels vehicles lleugers de passatgers per vehicles elèctrics endollables abans de l'any 2030. Mentre que per l'any 2060 l'escenari plantejat, per la IEA, es que el 60% del parc de vehicles lleugers sigui elèctric. El mateix escenari estableix que almenys el 40% de l'estoc de vehicles de 2 rodes (motocicles, tricicles,...) s'hagi electrificat pel 2030, i que aquest nombre assoleixi el 100% al voltant de l'any 2055. Mentre que al segon escenari, l'electrificació del transport s'hauria d'executar a un ritme encara mes ràpid: assolint una electrificació del 85% del parc mòbil mundial de vehicles lleugers l'any 2060, i el 100% del parc mòbil de vehicles de dues rodes abans de l'any 2045.

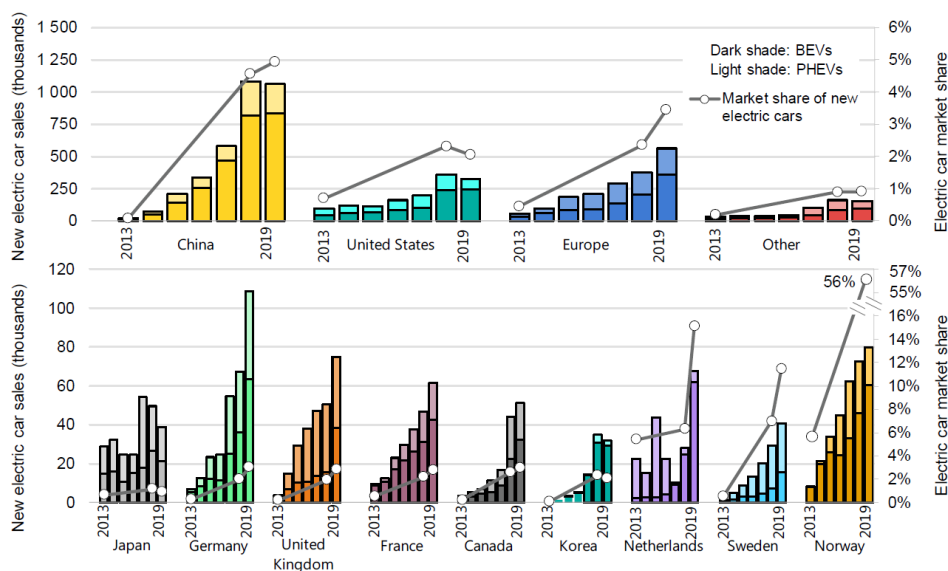


Figura 1. Vendes de vehicles elèctrics de passatgers i quota de mercat en els principals mercats a nivell mundial, pel període 2013-19 [15].

ANÀLISIS DE L'ACTUAL PARC AUTOMOBILÍSTIC

A NIVELL INTERNACIONAL

D'acord amb la IEA l'evolució mundial de venda de vehicles elèctrics ha conduït a que la flota mundial de vehicles elèctrics s'hagi expandit significativament al llarg de la darrera dècada, degut fonamentalment a les polítiques de foment i als avenços tecnològics que s'han donat. Arribant a la xifra rècord de de 2,1 milions de vehicles elèctrics venuts a tot el món l'any 2019, **Figura 1**, superant així les vendes de l'any 2018, que fou un any rècord, al augmentar el parc en 7,2 milions de cotxes elèctrics. A la vegada, l'any 2019 va registrar un increment interanual de vendes del 40% [16]. A mesura que avança el progrés tecnològic en l'electrificació de dues / tres rodes, autobusos i camions i el mercat per a ells creix, els vehicles elèctrics s'estan expandint significativament. Cal remarcar que el 47% de l'estoc mundial de nous VE, venuts al llarg de 2019, es troba a Xina, i que a nivell mundial el mercat de VE encara es centra en un conjunt limitat de regions del món, donat que el 90% dels vehicles venuts es troben repartits entre Xina, Europa i Estats Units.

Taula 1. *Vendes de tipus de vehicle elèctrics per països d'Europa, l'any 2019*

País	Vendes de Vehicles Elèctrics al llarg del 2019		
	BEV	PHEV	Total
Alemanya	60.511	44.795	105.306
Noruega	60.221	19.199	79.420
Regne Unit	38.113	36.603	74.716
Països Baixos	61.543	5.059	66.602
França	42.836	18.674	61.510
Suècia	15.556	24.473	40.029
Espanya	10.308	7.842	17.862

En l'àmbit europeu les vendes de vehicles elèctrics, l'any 2019, es concentraren essencialment en sis països (Alemanya, Noruega, Regne Unit, Països baixos, França i Suècia), que son els que presenten actualment una major penetració de vehicle elèctric en les seves flotes de vehicles lleugers. Les dades de les vendes de vehicles elèctric desglossades per tipus de vehicle (BEV o PHEV) i país, a nivell europeu [17] per l'any 2019 es presenten a la **Taula 1**. En aquest àmbit cal destacar Noruega, on el vehicle elèctric, ha arribat a representar el 58% de la quota de mercat aconseguint el desplegament més exitós del vehicle elèctric a l'àmbit europeu. Seguit pels Països Baixos amb una quota de mercat del 15%, Suècia amb un 11%, Finlàndia amb un 6,9%, Portugal amb el 5,7% i Suïssa amb un 5,6% [18].

Taula 2. Evolució de la quota de marcat del vehicle elèctric a Espanya. [19]

Any	Parc mòbil de turismes	Matriculacions de turismes + tot terrenys	Matriculacions de vehicles elèctrics	Quota de Mercat	Parc nacional de vehicles elèctrics
2019	24.558.126	1.375.381	18.007	1,31%	60.426
2018	24.074.151	1.424.758	12.447	0,87%	42.419
2017	23.500.401	1.342.011	8.416	0,68%	27.142
2016	22.876.830	1.230.104	4.480	0,39%	18.726
2015	22.355.549	1.094.117	2.830	0,27%	14.246
2014	22.029.512	890.125	1.459	0,17%	12.787

A NIVELL ESPANYOL

A nivell Espanyol la penetració del VE al parc de turismes va avançant lentament, respecte a l'evolució dels principals mercats europeus, encara que els increments de ventes, en alguns casos, son inclús superiors als obtinguts als principals mercats europeus.

Taula 3. Evolució de les matriculacions de vehicles elèctrics per tipologia a Espanya [19].

Any	BEV	PHEV	BEV	PHEV	Total
2019	10.750	7.257	59,70%	40,30%	18.007
2018	6.711	5.736	53,92%	46,08%	12.447
2017	4.888	3.528	58,08%	41,92%	8.416
2016	2.854	1.626	63,71%	36,29%	4.480
2015	2.043	787	72,19%	27,81%	2.830
2014	1.154	305	79,10%	20,90%	1.459

Tal i com s'observa a la **Taula 2**, la quota de mercat del VE a Espanya es troba bastant endarrerida respecte als principals mercats europeus, amb una quota de l'1,31% al 2019, o si es compara amb països propers com França, amb una quota de mercat del 2,8% o amb Portugal, que presenta unes ventes de VE molt majors amb una quota de mercat del 5,7%. A la vegada aquestes xifres disten molt dels objectius fixats en el Pla d'Impuls a la Mobilitat amb Vehicles d'Energies Alternatives [20] impulsat pel Ministeri d'Indústria, que establia que hi haurien al voltant de 150.000 unitats matriculades per l'any 2020.

A la vegada analitzant les dades de matriculacions de vehicles elèctric a nivell nacional per tipologia, **Taula 3**, resulta que els vehicles purament elèctrics BEV mostren una major demanda pel marcat enfront dels híbrids endollables PHEV. A la vegada, les dades no mostren clarament que el mercat nacional estigui enfocat exclusivament al PHEV, sinó que les dues tipologies de vehicles coexisteixen amb percentatges de matriculacions relativament alts del 61,70% i 38,30%, respectivament.

A NIVELL DE LES ILLES BALEARS

Pel que fa a la mobilitat elèctrica a les Illes Balears, segueix una tendència molt semblant a la del conjunt de l'estat Espanyol, amb una quota de l'1,45% l'any 2019, que es molt similar a la mitja estatal que es va situar en l'1,31%.

Taula 4. Evolució de les matriculacions de vehicles elèctrics a les Illes Balears [19], [21].

Any	Parc mòbil de turismes	Matriculacions de turismes + tot terrenys	Matriculacions de vehicles elèctrics	Quota de Mercat	Parc de vehicles elèctrics
2019	734.108	29.999	407	1,36%	1.396
2018	722.905	34.632	394	1,14%	989
2017	705.615	34.100	253	0,74%	595
2016	684.714	32.228	139	0,43%	342
2015	665.936	31.168	114	0,37%	203
2014	652.297	29.500	65	0,22%	89

D'aquest anàlisi de les dades presentades a la **Taula 4** es desprèn que la mobilitat elèctrica a balears segueix essencialment el patró de la mobilitat elèctrica al conjunt de l'estat Espanyol. Per tant, els resultats sobre la previsió de penetració del VE a nivell estatal que es presenten al següent apartat es podran extrapolar al parc mòbil de les Illes Balears.

PREVISIÓ DE LA PENETRACIÓ DEL VEHICLE ELÈCTRIC

És fonamental disposar d'una bona previsió de la penetració del vehicle elèctric al parc mòbil balear, amb un horitzó d'almenys 5 anys, per tal de poder planificar els punts de càrrega necessaris als diversos aparcaments en règim de rotació i estudiar-ne el seu impacte energètic i econòmic. Al no disposar de dades oficials suficientment detallades i/o justificades estadísticament que permetessin establir la seva validesa amb un cert interval de confiança, s'ha optat per a realitzar una previsió pròpia de la penetració del vehicle elèctric a l'estat Espanyol pels pròxims 5 anys; cal remarcar que no s'ha inclòs en el present treball l'impacte del COVID-19 sobre les ventes de VE. Concretament, s'ha partit de la sèrie històrica de ventes mensuals de vehicles elèctrics a Espanya, pel període 01/01/2014 al 01/02/2020; i que s'han obtingut de **Ideauto** i que es presenten a la **Taula 5**.

Taula 5. Ventes mensuals de vehicles elèctrics a nivell Espanya. Font: Ideauto

Mes	BEV	PHEV	Industrials/ comercials	Total Turismes
1/1/2014	18	19		37
1/2/2014	22	7		29
1/3/2014	35	3		38
1/4/2014	51	5		56
1/5/2014	103	18		121

1/6/2014	62	30		92
1/7/2014	120	33		153
1/8/2014	53	12		65
1/9/2014	139	30		169
1/10/2014	181	55		236
1/11/2014	138	53		191
1/12/2014	232	40		272
1/1/2015	61	11	24	72
1/2/2015	45	22	11	67
1/3/2015	164	31	41	195
1/4/2015	97	46	36	143
1/5/2015	94	63	28	157
1/6/2015	133	48	39	181
1/7/2015	228	103	117	331
1/8/2015	116	48	32	164
1/9/2015	193	135	41	328
1/10/2015	410	100	59	510
1/11/2015	283	74	44	357
1/12/2015	219	106	143	325
1/1/2016	125	106	27	231
1/2/2016	144	85	50	229
1/3/2016	315	215	103	530
1/4/2016	238	224	68	462
1/5/2016	260	180	89	440
1/6/2016	171	159	70	330
1/7/2016	219	129	84	348
1/8/2016	110	94	37	204
1/9/2016	181	147	70	328
1/10/2016	229	89	117	318
1/11/2016	439	116	47	555
1/12/2016	423	82	76	505
1/1/2017	134	127	34	261
1/2/2017	252	113	47	365
1/3/2017	377	180	90	557
1/4/2017	200	184	47	384
1/5/2017	299	259	105	558
1/6/2017	391	358	66	749
1/7/2017	297	348	44	645
1/8/2017	393	340	71	733
1/9/2017	630	322	121	952

1/10/2017	1.035	334	184	1.369
1/11/2017	346	390	56	736
1/12/2017	534	573	109	1.107
1/1/2018	463	442	156	905
1/2/2018	479	342	102	821
1/3/2018	611	302	158	913
1/4/2018	601	274	146	875
1/5/2018	400	457	63	857
1/6/2018	370	914		1.284
1/7/2018	394	474		868
1/8/2018	294	419		713
1/9/2018	486	369		855
1/10/2018	546	428		974
1/11/2018	682	483		1.165
1/12/2018	1.385	832		2.217
1/1/2019	753	511		1.264
1/2/2019	990	428		1.418
1/3/2019	1.449	788		2.237
1/4/2019	747	663		1.410
1/5/2019	900	669		1.569
1/6/2019	1.174	440		1.614
1/7/2019	739	498		1.237
1/8/2019	476	443		919
1/9/2019	941	540		1.481
1/10/2019	810	783		1.593
1/11/2019	791	682		1.473
1/12/2019	980	812		1.792
1/1/2020	1.619	1.467		3.086
1/2/2020	1.589	1.210		2.799
Total:	31.608	21.916	3.052	53.524

A partir d'aquestes dades, s'ha implementat una eina estadística, a l'entorn MATLAB, per a preveure l'evolució d'aquesta sèrie temporal de vendes. En concret, per a la previsió de les vendes mensuals fins al Desembre de 2025 s'ha emprat una variant del model *Auto Regressive Integrated Moving Average* (ARIMA). On el model ARIMA fa servir variacions i regressions de dades estadístiques per tal de trobar els patrons essencials de les series temporals, necessàries per a poder predir l'evolució futura d'aquestes series temporals.

A la vegada el model ARIMA, es un model dinàmic, on les estimacions futures venen explicades per les dades del passat i no per variables independents. Específicament, el model implementat és un *Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average* (SARIMA) [22], per tal d'afegir l'efecte de l'estacionalitat al llarg de l'any en les vendes de vehicles elèctrics. El model, també s'expressa com a SARIMA (p,d,q), on p estableix l'ordre del coeficient no estacional autoregressiu (AR), d estableix l'ordre del terme no estacional integratiu del model (I), i finalment q estableix l'ordre del terme de la mitja mòbil no estacional del model (MA).

Equació 1:

$$Y_t = \left(\phi_0 + \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta^d Y_{t-i} \right) + (Y_t - \Delta^d Y_t) + \left(\varepsilon_t - \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \right)$$

On d es correspon amb el nombre de diferències o derivades que cal realitzar per ha convertir la sèrie temporal de entrada en estacionària, els termes ϕ_1, \dots, ϕ_p són el coeficients de la part autoregressiva del model, els termes $\theta_1, \dots, \theta_p$ són el coeficients de la part de mitges mòbils del model, ϕ_0 és una constant, ε_t és el terme de l'error, i $\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$ representa la resta entre el valor de sortida de la sèrie temporal a l'instant "t" i al instant de temps anterior "t-1".

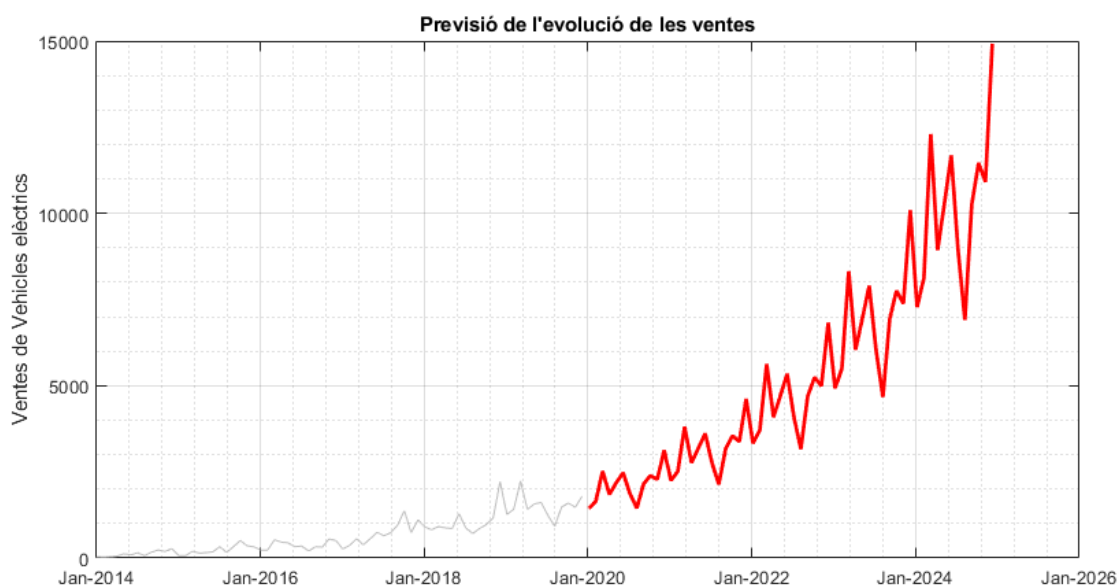


Figura 2. Previsió de les vendes mensuals de vehicles elèctrics a nivell estatal, pels propers 5 anys (línia de color vermell previsió, línia de color gris vendes mensuals històriques).

Una vegada analitzades les sèries temporals i identificades les seves components bàsiques, s'han fixat els diferents paràmetres, amb $\phi_0 = 0$, un nombre de diferències $d=1$ per tal de convertir la sèrie temporal en estacionària, un terme de la mitja mòbil no estacional d'ordre $q=1$, i finalment un terme

estacionari de 12 mesos i un ordre de mitjana mòbil estacional unitari (SMA=1), corresponent al període d'un any. Els resultats obtinguts es presenten a la **Figura 2**.

A partir de la previsió de ventes mensuals de vehicles elèctrics a l'estat Espanyol, s'han obtingut les ventes anuals de vehicles elèctrics, presentades a la **Taula 6**.

Taula 6. Previsió de ventes de vehicles elèctrics a Espanya, pels propers 5 anys.

Any	Ventes VE (al conjunt de l'estat)
2020	25.373
2021	37.750
2022	55.808
2023	82.509
2024	121.984
2025	180.345

Taula 7. Dades de l'evolució del parc mòbil nacional de turismes. Font: DGT

Any	Total Turismes (Espanya)	Matriculacions de turismes (Espanya)	Baixes de Turismes (Espanya)
2019	24.558.126	1.375.381	879.446
2018	24.074.151	1.424.758	834.137
2017	23.500.401	1.342.011	698.284
2016	22.876.830	1.230.104	684.564
2015	22.355.549	1.094.117	753.067
2014	22.029.512	890.125	887.965
2013	22.024.538	742.305	749.665
2012	22.247.528	710.638	709.936
2011	22.277.244	817.688	811.434
2010	22.147.455	1.000.010	---
Mitja:	22.809.133	1.062.714	778.722

A més de les previsions de ventes anuals de VE, per tal de poder estimar la quota de mercat que tindrà el vehicle elèctric en els propers anys, és necessari conèixer el nombre de matriculacions/ventes de turismes a nivell estatal. Aquestes dades, obtingudes de la pagina WEB de la DGT, es presenten a la

Taula 7. En vista de l'evolució del nombre de matriculacions anuals, s'ha optat per a considerar que el nombre matriculacions es mantindrà aproximadament constant al llarg del període 2020 - 2025, considerant el valor mig dels darrers 10 anys o **1.062.714** matriculacions de turismes/any. Concretament s'ha suposat que tot hi que hi haurà fluctuacions en el mercat degut a factors imprevisibles, les ventes en promig es mantindran al voltant d'aquest valor. Finalment, un cop fixat

el promig de ventes de turismes a nivell nacional s'ha estimat la quota de mercat del vehicle elèctric a nivell nacional, tal i com es mostra a la **Taula 8**. Donat que la quota de mercat del vehicle elèctric a les Illes Balears es molt semblant a la mitja nacional, com s'ha vist anteriorment, s'ha decidit emprar la quota de mercat nacional com la que resseguirà el parc mòbil de les Illes Balears.

Taula 8. Previsió de la quota de mercat del vehicle elèctric en els propers 5 anys.

Any	Estimació de les ventes de Turismes (Nacional)	Previsió de ventes de VE (Nacional)	Quota de mercat anual del VE (Nacional)
2020	1.062.714	25.373	2,39%
2021	1.062.714	37.750	3,55%
2022	1.062.714	55.808	5,25%
2023	1.062.714	82.509	7,76%
2024	1.062.714	121.984	11,48%
2025	1.062.714	180.345	16,97%

A partir d'aquestes dades s'ha extrapolat la quota de mercat a nivell estatal a les Illes Balears, per tal de poder obtenir la previsió de la penetració del vehicle elèctric a les Illes pels pròxims 5 anys; una dada fonamental per a poder analitzar els requeriments d'estacions de càrrega i la respectiva demanda elèctrica.

El procediment emprat per a estimar la penetració futura del vehicle elèctric en el parc mòbil consisteix en obtenir el percentatge de turismes que componen la flota de turismes de les Illes Balears, així com el valor mig anual de matriculacions i de baixes de turismes; tot això en un període lo suficientment llarg, **Taula 9**, per a assegurar la validesa estadística de l'estudi.

Taula 9. Dades de la flota de turismes presents a les Illes Balears. Font: [23]

ANY	Turismes (balears)	Matriculacions de Turismes (Balears)	Vehicles Elèctrics Matriculats (Balears)
2014	652.297	29.500	65
2015	665.936	31.168	114
2016	684.714	32.228	139
2017	705.615	34.100	253
2018	722.905	34.632	394
2019	734.108	29.999	407
Promig	678.055	31.938	---

A partir dels valors mitjos de la flota de les Illes Balears, i la predicció de la quota de mercat anual del vehicle elèctric s'ha estimat la penetració al parc mòbil de turismes en els propers 5 anys, tal i com es mostra a la **Taula 10**. Cal remarcar que s'ha suposat que les baixes anuals només seran de vehicles

convencionals, i que per tant, no es donarà de baixa, en principi, cap vehicle elèctric en els propers 5 anys; al considerar que encara no hauran arribat a la fi de la seva vida útil, estimada en 10 anys.

Taula 10. Previsió de la penetració del vehicle elèctric a les Illes Balears, pels propers 5 anys.

Any	Turismes (Balears)	Matriculacions de turismes anuals (Balears)	Baixes de turismes anuals (Balears)	Predicció de matriculacions de ve (Balears)	Vehicles elèctrics en circulació (Balears)	Penetració del VE en la flota de turismes
2020	686.293	31.938	27.445	763	2.159	0,31%
2021	686.293	31.938	27.445	1.134	3.293	0,47%
2022	686.293	31.938	27.445	1.677	4.970	0,72%
2023	686.293	31.938	27.445	2.480	7.450	1,07%
2024	686.293	31.938	27.445	3.666	11.116	1,60%
2025	686.293	31.938	27.445	5.420	16.536	2,38%

A partir de l'anàlisi de les dades presentades de la **Taula 10**, s'aprecia com la penetració del VE al parc mòbil de les Illes Balears és actualment molt baixa, amb tant sols un 0,36% l'any 2020. Encara que a partir del 2023, una vegada superat l'1%, es preveu que la presència de turismes elèctrics en el parc mòbil de les Illes creixi molt ràpidament degut a la incorporació de massiva de nous vehicles elèctrics.

Taula 11. Models que conformen la flota de vehicles elèctrics a la Unió Europea per volum, any 2019. Font: [17]

TIPUS	MODEL	2019
BEV	Renault Zoe	147.545
PHEV	Mitsubishi Outlander	81.969
BEV	Nissan Leaf	79.000
BEV	Tesla Model 3	63.886
BEV	BMW i3	51.548
BEV	Tesla Model S	46.457
BEV	Volkswagen e-Golf	37.873
PHEV	Volkswagen Passat GTE	35.810
BEV	Smart Fortwo	34.009
PHEV	Volvo V60	30.771
	Altres	558.446

MODELS DE VEHICLE ELÈCTRIC MÉS VENUTS

Per tal de poder fer una bona planificació és necessari conèixer quins són els models de vehicles elèctrics que trobem actualment en circulació a les Illes Balears, els vehicles que actualment s'estan matriculant a l'estat Espanyol i al nostre entorn més proper, com es Europa, així com quines son les seves principals característiques.

Taula 12. Ventas dels principals vehicles elèctrics purs (BEV) a Espanya durant el període 2014-2019. Font: Ideauto [24]

Tipus	Model	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Total
BEV	RENAULT ZOE	289	312	436	1.328	1,421	1.050	4.836
BEV	NISSAN LEAF	465	344	525	534	1,261	1.509	4.638
BEV	BMW i3	102	251	338	683	553	1.050	2.977
BEV	SMART FORFOUR	35	388	155	418	689	766	2.451
BEV	TESLA MODEL 3	0	0	0	0	0	1.687	1.687
BEV	VOLKSWAGEN GOLF	16	21	23	176	275	941	1.452

Les matriculacions de vehicles elèctrics a la Unió Europea, van creixent any darrera any, on al llarg del 2019 es van matricular més de 385.000 vehicles elèctrics segons el *European Alternative Fuels Observatory* (EAFO). Concretament els híbrids endollables (PHEV) i els elèctrics purs (BEV) més venuts a Europa al llarg dels darrers anys es presenten a la **Taula 11**. On l'híbrid endollable més venut a nivell europeu es el Misubishi Outlander PH amb 81.969 unitats venudes fins el 2019, i a molta distancia es troba el segon el Volkswagen Passat GTE amb 35.810 unitats en el mateix període. Pel que fa als vehicles purament elèctrics el més venut a nivell europeu es el Renault Zoe amb 147.545 unitats fins al 2019, seguit d'enfora pel Nissan Leaf amb 79.000 unitats.

Taula 13. Ventas dels principals vehicles híbrids endollables (PHEV) a Espanya durant el període 2014-2019. Font: Ideauto

Tipus	Model	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Total
PHEV	MITSUBISHI OUTLANDER	209	389	555	719	1.157	1.358	4.387
PHEV	MINI MINI	0	0	0	246	760	1.384	2.390
PHEV	BMW SERIE 2	0	83	83	309	467	765	1.707
PHEV	KIA NIRO	0	0	0	0	830	390	1.220
PHEV	VOLVO XC90	0	0	128	143	216	483	970

Si s'analitzen les ventes a l'estat, fins a finals del 2019, **Taula 12**, es pot veure que els vehicles elèctrics purs (BEV) més venuts són el Renault Zoe i el Nissan Leaf, exactament igual que en el cas de la flota europea. Mentre que si analitzem les ventes de vehicles híbrids endollables, **Taula 13**, són el Mitshubishi Outlander i el Mini Mini, sient el més venut el mateix que a nivell europeu.

Per a concloure amb aquesta secció cal analitzar les característiques tècniques i els segments automobilístics als que pertanyen els vehicles elèctrics purs i els híbrids endollables. A la **Taula 14** es presenten les característiques dels elèctrics purs més venuts a nivell estatal. De la anàlisi de les

característiques tècniques es desprèn que els elèctrics purs mes venuts majoritàriament pertanyen al segments B i C, que es corresponen a vehicles compactes i vehicles familiars relativament petits.

Taula 14. Característiques tècniques del BEV més venuts a nivell espanyol.

	RENAULT ZOE R90	NISSAN LEAF	BMW I3	SMART FORFOUR	TESLA MODEL 3	VOLKSWAG EN GOLF
Preu [€]:	21,954.00 €	31,260.00 €	38,200.00 €	25,150.00 €	49,980.00 €	31,900.00 €
Segment:	B	C	B	A	D	C
Tecnologia de la bateria:	lons-Liti	lons-Liti	lons-Liti	lons-Liti	lons-Liti	lons-Liti
Voltatge de la bateria:	400V	---	---	---	---	---
Capacitat de la bateria :	22kWh / 41kWh (model ZE40)	24kWh / 30kWh / 40kWh (2018)	21,6kWh (18,8kWh útil) / 33kWh (27,2 kWh útil)	17,6 kWh	54kWh	35,8kWh
Autonomia elèctrica:	240km / 403km	250km / 378km	200km (110km reals)	120km	310km	190km
Connectors de carrega:	Mennekes	J1772 / CHAdeMO / Actualment incorporen Mennekes	CCS (tipus 2) (Compatible amb Mennekes)	CCS (tipus 2) (Compatible amb Mennekes)	Type 2 (Mennekes - IEC 62196) o CCS2	CCS (tipus 2) (Compatible amb Mennekes)
Modes de carrega disponibles:	2/3	2/3/4	2/3/4	2/3/4	2/3/4	2/3/4
Temps mig de la carrega lenta:	(2,3kw) 20h / (3,7kw) 12h11 / (7,4kW) 5h / (11kW) 3h20	(2,3kw) 17h / (3,7kw) 12h11 / (7,4kW) 4h limitat a 6,6kW (24kWh)	(3,7kw) 5h56 / (7,4kW) 5h / (11kW) 3h20	(4,6kW) 3h	---	(7,2kW) 5h15
Temps mig de la carrega semi-rapida:	(22kW) 1h38	---	---	---	---	---
Temps de la carrega rapida:	---	DC (80%) 50kWh en 30 min	DC (80%) 50kW en 40 min	DC (80%) 22kW en 40 min	DC (80%) 170kW en 20 min	DC (80%) 50kWh en 36min

Per altra banda, si analitzem les característiques tècniques dels PHEV, que es presenten a la **Taula 15**, es desprèn que els híbrids endollables mes venuts majoritàriament pertanyen al segments F, que es corresponen a berlins o sedans per a capacitat de 5 adults i un maleter, amb una llargària d'almenys 5m i motors potents; podent arribar a ser classificats alguns d'ells com a vehicles de luxe.

Taula 15. Característiques tècniques del PHEV més venuts a nivell espanyol.

	MITSUBISHI OUTLANDER	MINI MINI	BMW SERIE 2	KIA NIRO	VOLVO XC90
Preu [€]:	35,990.00 €	31,260.00 €	38,200.00 €	25,150.00 €	49,980.00 €
Segment:	F	F	F	JC	JE
Tecnologia de la bateria:	ió-Liti	lons-Liti	lons-Liti	lons-Liti	lons-Liti
Voltatge de la bateria:	300V	---	---	---	---
Capacitat de la bateria :	13,8 kWh	7,7kWh	10kWh	8,9kWh	11,6kWh

Autonomia elèctrica:	35km	42km	50km	35km	25km
Connectors de carrega:	J1772 (3,7kW) CHAdeMO (max 15kW)	Type 2 (Mennekes - IEC 62196)	Type 2 (Mennekes - IEC 62196)	CCS (tipus 2) (Compatible amb Mennekes)	Type 2 (Mennekes - IEC 62196)
Modes de carrega disponibles:	2/3/4	2/3/4	2/3/4	2/3/4	2/3/4
Temps mig de la carrega lenta:	(230Vac @ 10A) 5h, (230Vac @ 16A) 3h30	(230Vac @ 10A) 3h15	(3,7kW) 3h15min	(3,3kW) 2h45min	(3,7kW) 3h15min
Temps mig de la carrega semi-rapida:	---	(3,7kW) 2h15min	---	---	---
Temps de la carrega rapida:	DC (80%) 22kW en 32min		DC (100%) 22kW en 2h		---

METODOLOGIA

La càrrega dels vehicles elèctrics (EV) a la Unió Europea (UE) ve regida per una sèrie d'estàndards Electrotècnics IEC 92.196 i SAE J1772 [25], [26] que estableixen les característiques dels connectors de recàrrega i les formes com aquestes s'han de desenvolupar, mentre que l'estàndard IEC 61.851 [27] estableix les característiques tècniques de les infraestructures de recàrrega.

Concretament la metodologia desenvolupada s'ha enfocat a analitzar la demanda de la càrrega AC normal / lenta i semi-ràpida en mode 3 dels vehicles elèctrics en un rang de potències de càrrega de [2,3 - 22kW] en aparcaments públics operats en règim de rotació, i per a un rang de nivells de penetració del EV al parc mòbil relativament baixos [0 - 2,38%] que són els que s'esperen als propers 5 anys a les Illes Balears.

METODOLOGIA DE PLANIFICACIÓ I ESTIMACIÓ DE LA DEMANDA VINCULADA AL VEHICLE ELÈCTRIC

Per tal d'estudiar l'impacte de la recàrrega de vehicles elèctrics en els aparcaments públics, és essencial disposar d'una eina estadística que modeli l'estacionament d'un parc mòbil de vehicles elèctrics de referència al diferents aparcaments per a un període d'almenys 5 anys. Aquesta eina ens permetrà per una banda poder planificar els diferents punts de càrrega que s'haurien d'instal·lar als diferents aparcaments per tal de satisfer la demanda energètica dels VE i, per altra banda, poder estimar la demanda energètica associada així com el posterior anàlisi econòmic associat a aquest augment de punts de recàrrega. A més, s'analitzarà l'efecte d'implementar una instal·lació fotovoltaica per tal de mitigar l'augment en la demanda energètica degut a la recàrrega dels vehicles elèctrics.

Concretament els paràmetres relacionats amb el requeriments de places estacionament estan relacionats principalment amb: el percentatge de penetració del EV al parc mòbil, els patrons

d'estacionament horaris estacionals, la distribució de durades dels estacionaments, i del nombre de places en regim de rotació.

L'EINA NUMÈRICA

Un cop presentat l'escenari previ i els elements/dades de partida de la metodologia proposada, es procedirà a presentar l'eina numèrica, basada en MATLAB®, encarregada de la planificació de les infraestructures de càrrega, estimar la seva demanda energètica i l'impacte que tindria sobre aquesta la incorporació d'una instal·lació de generació fotovoltaica en regim d'autoconsum. L'arquitectura de l'eina numèrica es presenta de forma esquemàtica a la **Figura 3**. En aquesta figura es detalla la interconnexió entre els diferents mòduls, així com els fluxos d'informació i les principals dependències entre mòduls. Concretament, l'eina s'ha desenvolupat al voltant de 8 submòduls que implementen les diferents tasques de la metodologia, que es descriuran de forma detallada en les següents subseccions.

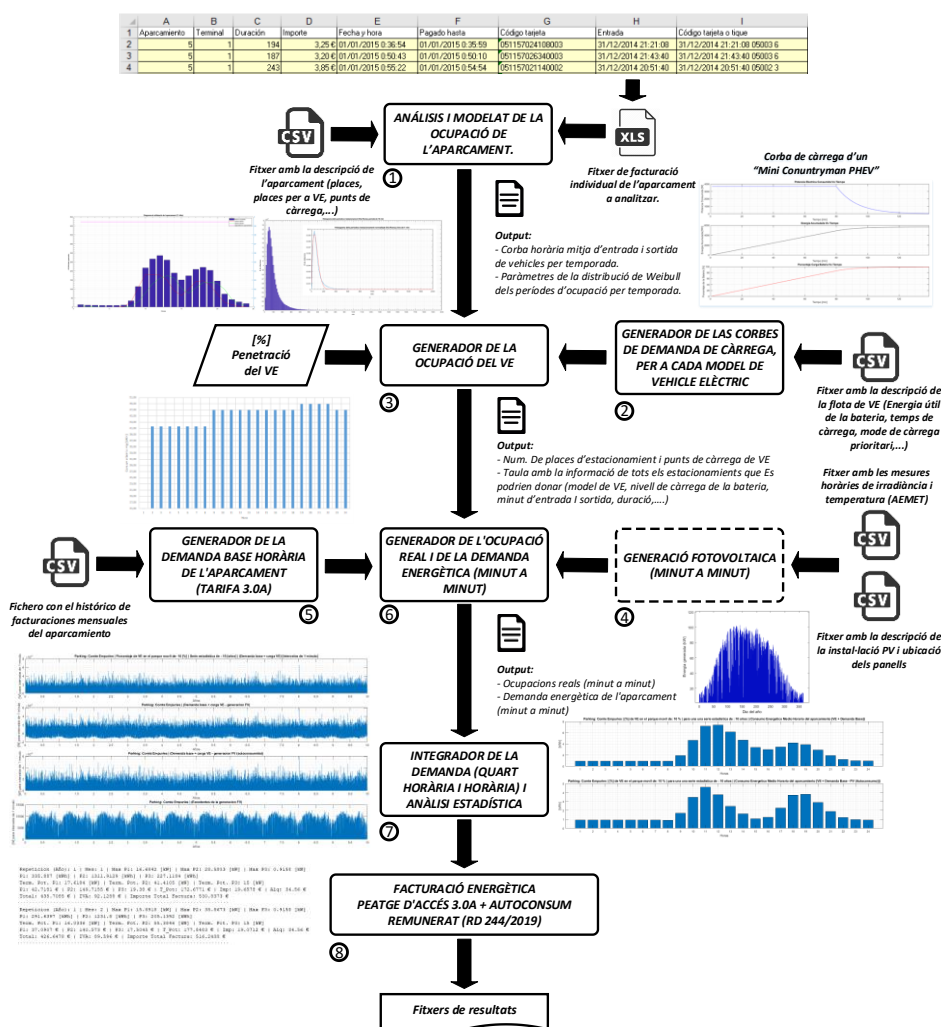


Figura 3. Arquitectura de l'eina numèrica, basada en Matlab®, de planificació i estimació de la demanda energètica en règim d'autoconsum fotovoltaic.

ANÀLISIS I MODELAT DE L'OCUPACIÓ D'UN APARCAMENT

Qualsevol aparcament operat en règim de rotació presenta dos patrons clarament diferenciats, un associat a la ocupació horària, és a dir, al nombre mig de vehicles que hi ha estacionats en cada interval horari, i l'altre associat a la duració de cada un d'aquests estacionaments. On el patró d'ocupació horària al llarg de l'any depèn de la localització i de l'activitat socioeconòmica que s'hi desenvolupa a l'entorn proper. Mentre que la distribució de la durada dels estacionaments depèn de diversos paràmetres, com poden ser: les places d'aparcament disponibles, les mesures dissuasives per als estacionaments de llarga durada, així com la localització i el seu entorn socioeconòmic.

Aquest primer mòdul és l'encarregat de fitar els diferents paràmetres de les dues distribucions estadístiques que defineixen el comportament de l'aparcament per a dos períodes anuals; la temporada alta i la temporada baixa turística. El punt de partida d'aquest submòdul són les dades històriques de facturació del propi aparcament, que provenen de l'històric de les butlletes individuals de facturació recollides al llarg dels anys. Aquesta informació, un cop preprocessada, s'incorpora al submòdul a partir d'un fitxer extern en format Excel (*.xls). A fi d'estimar els paràmetres de la distribució de les durades dels estacionaments, es construeix un histograma amb intervals de 10 minuts en un rang de [0,2000] minuts, per tal d'eliminar els períodes d'estacionament atípics. El resultat obtingut és un histograma que segueix perfectament la distribució de Weibull $W_e(x; \lambda, k)$, (**Equació 2**) que ve definida per dos paràmetres; el paràmetre de forma $k > 0$ i el paràmetre d'escala de la distribució $\lambda > 0$.

Equació 2:

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

Aquests paràmetres es determinen mitjançant el mètode dels mínims quadrats a l'histograma generat prèviament. Per altra banda, el diagrama d'ocupació horària mitjana per a un període s'obté determinant el nombre de cotxes que inicien i finalitzen el seu estacionament en una determinada franja horària al llarg d'un determinat període. En aquest cas s'ha avaluat a partir de dos anys de dades històriques dels diferents aparcaments públics estudiats.

En els casos en que es consideri necessari, el submòdul diferencia el comportament durant dues temporades anuals: la temporada alta i la temporada baixa, tant per les durades dels estacionaments com per al diagrama d'ocupació mitjana. Això permet incorporar a la metodologia a més del component de l'aparcament anual el seu comportament estacional, al llarg de l'any.

GENERADOR DE CORBES DE LA DEMANDA ASSOCIADA A LA CÀRREGA

Aquest mòdul s'encarrega de generar les corbes de demanda energètica associada a la càrrega dels vehicles elèctrics. El mòdul és fonamenta sobre l'estudi previ dels diferents models de VE que conformen la flota de la localització on es troba l'aparcament estudiat. En el nostre cas aquesta flota és la presentada en el capítol anterior, amb les característiques ja esmentades a la **Taula 16**. El mòdul s'inicialitza mitjançant un fitxer extern (*.csv) on en cada columna s'hi trobem detallats el percentatges absoluts de penetració del model dins la flota de VE, l'energia útil de la bateria [kWh], el consum mig [kWh/100km], així com altres paràmetres d'interès per a treballs futurs.

Taula 16. Percentatges i característiques dels VE que componen la flota, a l'eina numèrica.

Model	[%] Penetració en la flota EV nacional	[%] Penetració del model a la flota EV referencia	[kWh] Energia útil de la bateria $E_{bat}(t_f)$	[kW] Potència nominal de càrrega P_{car_nom}	[min] Temps de càrrega t_{car}
RENAULT ZOE	11,31%	16,97%	41	17,28	135
NISSAN LEAF	10,84%	16,28%	38	6,6	420
BMW i3	6,63%	9,95%	37,9	11	255
SMART FORFOUR	5,73%	8,60%	16,7	4,6	270
TESLA MODEL 3	3,94%	5,92%	47,5	11	315
VOLKSWAGEN GOLF	3,39%	5,10%	32	7,2	315
MITSUBISHI OUTLANDER	10,26%	15,40%	11	3,68	210
MINI MINI	5,59%	8,39%	5,7	3,7	135
BMW SERIE 2	3,80%	5,70%	8,8	3,7	195
KIA NIRO	2,85%	4,28%	7,1	3,3	165
VOLVO XC90	2,27%	3,40%	9,9	3,7	195

Una cop establerta la flota de vehicles elèctrics, s'ha de determinar la demanda energètica de la càrrega d'aquests des del punt de vista de l'aparcament on s'estan carregant els vehicles. Per a dur a terme aquesta estimació, s'ha desenvolupat un model simple de bateria basat en tant sols tres paràmetres del vehicle: l'energia útil que pot acumular la bateria, $E_{bat}(t_f)$, la potència elèctrica nominal del mode preferencial de càrrega del vehicle P_{VE_nom} i el temps necessari per a realitzar una càrrega completa, de 0% a 100%, t_{car} .

En concret, el model matemàtic presentat simula la demanda energètica de càrrega, minut a minut, mitjançant una funció definida a trossos amb dues regions diferenciades. La primera regió es correspon a l'inici de la càrrega i reproduïx una demanda a potència instantània constant o corrent i intensitats constants, la segona regió, que es correspon a la regió final de la càrrega d'una bateria, implementa una càrrega a potència variable o amb tensió constant i intensitat variable. El model

determina per a cada minut l'energia de càrrega a partir de la potència nominal de càrrega del model especificat $E_{bat}(t_i) = \frac{P_{car-nom}}{60} [Wh]$ i l'energia restant per a la càrrega completa de la bateria és $E_{rest}(t_i) = E_{bat}(t_f) - \sum_{i=1}^f E_{car}(t_i) [Wh]$. Si l'energia que resta per a la càrrega completa és menor que la potència nominal de càrrega del VE, $E_{rest}(t_i) < P_{car-nom}$, la funció que determinarà la demanda energètica serà $E_{car}(t_i) = \frac{P_{car-nom} e^{-at}}{60} [Wh]$, i el model s'encarregarà de determinar el paràmetre "a" de la funció exponencial negativa. A la vegada, la variable $E_{car}(t_i) [Wh]$ emmagatzemarà l'energia que resta per a completar la càrrega en el temps restant per a la càrrega de la bateria $t_{rest} = (t_f - t_i(E_{rest}(t_i) < P_{car-nom})) / 60$. Així, el model reproduïx la segona regió de càrrega, és a dir, la càrrega a tensió constant i corrent variable.

$$\text{Equació 3: } E_{rest}(t_i) = E_{bat}(t_f) - \sum_{i=1}^f E_{car} \rightarrow \begin{cases} E_{rest}(t_i) \geq P_{car-nom} \rightarrow E_{car}(t_i) = \frac{P_{car-nom}}{60} \\ E_{rest}(t_i) < P_{car-nom} \rightarrow E_{car}(t_i) = \frac{P_{car-nom} e^{-at}}{60} \end{cases}$$

Aquest paràmetre a només s'ajusta un cop a l'inici, mitjançant la integració numèrica de la funció exponencial negativa al llarg de l'interval t_{rest} , tal com es mostra a l'**Equació 4**.

$$\text{Equació 4: } \int_{\frac{t_i(E_{rest}(t_i) < P_{car-nom})}{60}}^{\frac{t_f}{60}} P_{car-nom} e^{-at} dt = E_{rest} \left(\frac{t_i(E_{rest}(t_i) < P_{car-nom})}{60} \right) \rightarrow "a"$$

El model proposat, genera 5 variables unidimensionals de llargada igual al nombre de minuts necessaris per a la recàrrega completa de la bateria, on el minut de càrrega t_i està relacionat amb la potència instantània consumida $p_{consumed}(t_i) [W]$, l'estat de càrrega de la bateria en cada instant de temps es $SOC_{bat} = \sum_{i=1}^f E_{car}(t_i) / E_{bat}(t_f) [\%]$, l'energia emmagatzemada ve donada per $\sum_{i=1}^f E_{car}(t_i) [Wh]$, així com amb l'energia romanent per a la càrrega completa de la bateria [Wh] i el temps restant de càrrega [min].

Mitjançant aquest procediment el model genera, per cada model de vehicle elèctric de la flota de referència, les diferents corbes relacionades amb la seva càrrega: potència, energia acumulada i percentatge de càrrega en funció del temps, **Figura 4**.

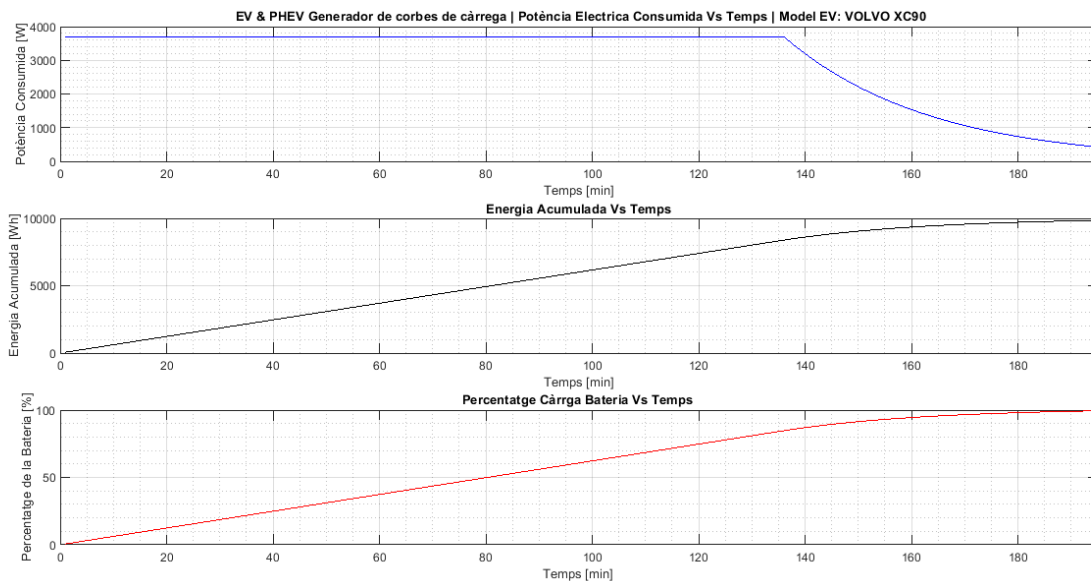


Figura 4. Corbes de de potència, energia acumulada i percentatge de càrrega enfront del temps, per un vehicle elèctric pur (Volvo XC90).

GENERADOR DE L'OCUPACIÓ DEL VEHICLE ELÈCTRIC

El mòdul d'ocupació del vehicle elèctric és un dels més complexes que es presenten en aquest treball, així com un dels més important pel correcte funcionament de la metodologia proposada. L'objectiu principal que persegueix és el de planificar quines estructures de càrrega s'haurien d'instal·lar per tal de satisfer la demanda de càrrega dels vehicles elèctrics per un determinat nivell de penetració del VE a la flota de turismes. On la metodologia desenvolupada per a obtenir aquest resultats es desenvolupa en 4 fases.

FASE 1. DETERMINACIÓ DEL NOMBRE D'INTENTS D'ESTACIONAMENTS HORARIS

La primera fase consisteix en determinar el nombre d'intents d'estacionament de VE en cada interval del període d'avaluació, partint del nivell de penetració del VE i introduint un factor estocàstic per tal de simular el comportament real de la demanda d'estacionament en un aparcament. En concret, s'utilitzen els patrons d'ocupació horària mitjana que, a l'hora, depenen del dia i de l'estació (alta o baixa), per a determinar el nombre total de vehicles que entren cada hora a l'aparcament, **Figura 5**. Una cop determinat el nombre mig de vehicles que accedeixen a l'aparcament cada hora, es generaran tants de nombres aleatoris uniformement distribuïts $U(0,1)$ com vehicles que s'espera que entrin a l'aparcament durant un interval horari determinat (Num_{EV}). Aquest primer nombre aleatori servirà per a determinar si el vehicle que entra és elèctric o de combustió interna, a partir del percentatge prèviament establert de penetració del VE. Concretament, si el nombre aleatori és menor que el nivell de penetració establert, **Taula 17**, es considera que és un VE (**Equació 5**).

Equació 5:
$$\begin{cases} U_{i,h}(0,1) \leq p_{ev}, i = 1, \dots, \text{NumVehicles_entren_per_hora} & \rightarrow PEV_{i,h} = PEV_{i,h} + 1 \\ U_{i,h}(0,1) > p_{ev}, i = 1, \dots, \text{NumVehicles_entren_per_hora} & \rightarrow PEV_{i,h} = PEV_{i,h} \end{cases}$$

Taula 17. Percentatges de penetració del vehicle elèctric al parc de turismes de les Illes Balears analitzats per l'eina.

Any	Penetració del EV al parc mòbil de turismes de les Illes Balears
2020 (Font: Elaboració pròpia)	0,31%
2021 (Font: Elaboració pròpia)	0,47%
2022 (Font: Elaboració pròpia)	0,72%
2023 (Font: Elaboració pròpia)	1,07%
2024 (Font: Elaboració pròpia)	1,60%
2025 (Font: Elaboració pròpia)	2,38%
Escenari 2030 (IEA)	10,00%

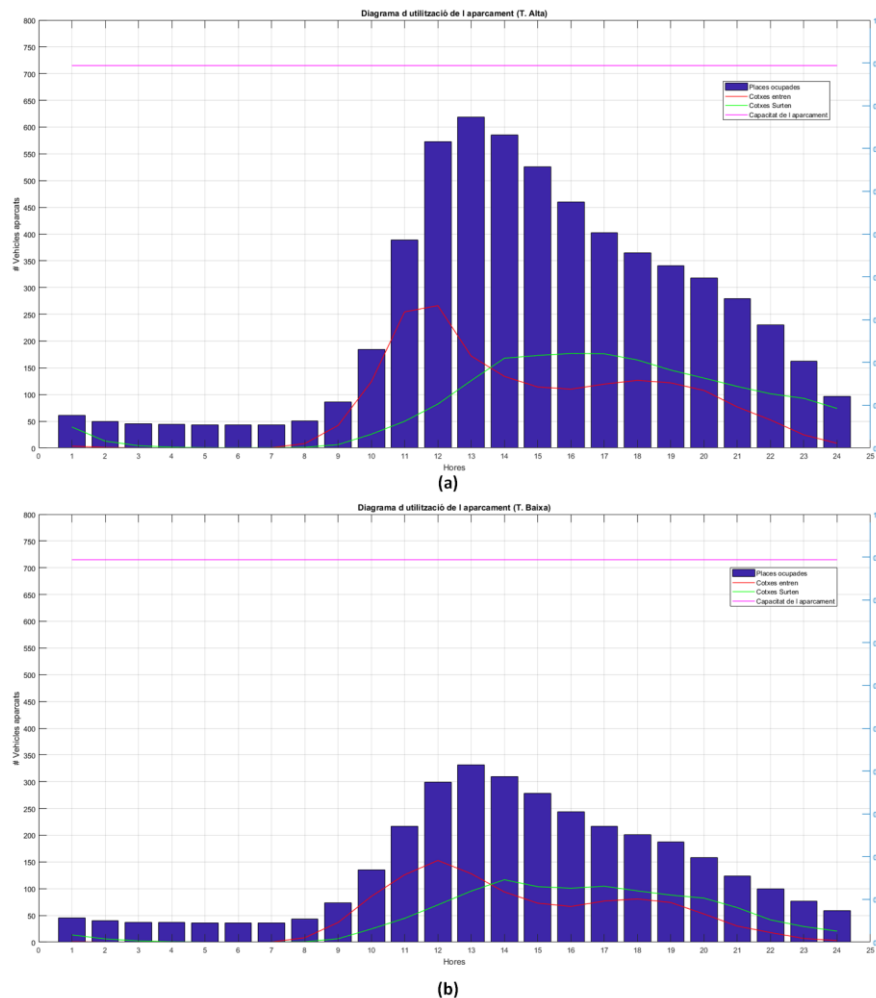


Figura 5. (a) Diagrama d'ocupació horària mitjana de l'aparcament d'Antoni Maura (temporada alta). (b) Diagrama d'ocupació horària mitjana de l'aparcament d'Antoni Maura (temporada baixa).

A la vegada, d'aquesta forma la metodologia proposada introdueix el perfil horari de vehicles que entren a l'aparcament, a l'hora que introdueix l'aleatorietat inherent d'un comportament real, tal i com es mostra a la **Figura 6**.

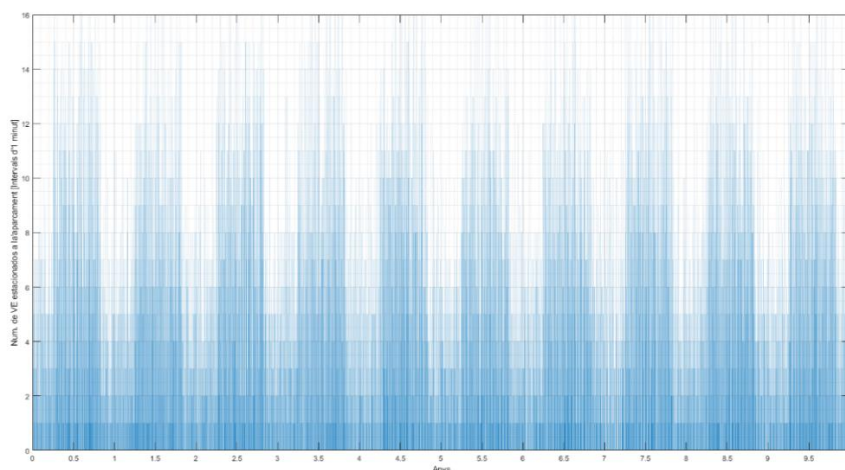


Figura 6. Nombre d'intents d'estacionament horaris de vehicles elèctrics per 10 repeticions de l'any de referència (2017) i una penetració del vehicle elèctric del 2,38%, a l'aparcament de Parc de la Mar.

FASE 2. DETERMINACIÓ DE LES CARACTERÍSTIQUES DELS ESTACIONAMENTS

La segona fase del present mòdul, consisteix en determinar les característiques dels VE que entren a l'aparcament durant el període d'avaluació a través de la generació de tres nombres aleatoris per a cada un d'ells. El primer nombre aleatori serveix per a determinar estocàsticament quin és el minut exacte d'entrada a l'aparcament al llarg de l'hora, seguirà una distribució uniforme $U(1,60)$, aconseguint d'aquesta manera que tots els minuts al llarg de l'hora siguin equiprobables. Així, el moment exacte en que el vehicle entra a l'aparcament quedarà determinat a partir de l'any, el dia de l'any, l'interval horari i , finalment el minut, com es mostra a la següent expressió (**Equació 6**).

Equació 6:

$$t_{in,i} = (n_{year} - 1) \cdot 525600 + (day_{year} - 1) \cdot 1440 + (hour_{day} - 1) \cdot 60 + t_{in,h,i}$$

El segon paràmetre que s'ha de determinar és la durada d'aquest estacionament. Per fer-ho s'utilitzarà un generador de nombres aleatoris que ressegueixi una distribució de Weibull, $W_e(\lambda, k, U(0,1))$, fixada amb els dos paràmetres característics (λ , k) de les duracions dels estacionaments, que depenen de l'estació (alta o baixa) corresponent al dia de l'estacionament. Per tant, el minut absolut en que el vehicle sortirà de l'aparcament vendrà determinat per l'any, el dia de l'any, l'interval horari i i el minut, com mostra la següent expressió:

Equació 7:

$$t_{out,i} = (n_{year} - 1) \cdot 525600 + (day_{year} - 1) \cdot 1440 + (hour_{day} - 1) \cdot 60 + t_{est,i}$$

El tercer paràmetre que utilitzarem per a determinar les característiques del vehicle elèctric serà el que ens determini quin model de VE P_{model_i} , dels prèviament introduïts a la flota local, ha entrat a l'aparcament. Una vegada generat aquest nombre aleatori, seguint una distribució uniforme $U(0,1)$,

la metodologia compara el nombre aleatori generat amb el rang agregat R_j del percentatge de penetració de cada un dels models de VE de la flota, per tal de determinar l'índex "k" del VE, que identifica el model de vehicle, que ha entrat a l'aparcament, com es presenta a continuació:

Equació 8:
$$P_{model_i} \in [p_{Fleet_{k-1}}, p_{Fleet_k}) \rightarrow \text{índex} = k \mid k \in [1, Num_{EV}]$$

Finalment, el quart paràmetre determinarà el nivell de bateria o percentatge d'energia útil disponible al vehicle quan aquest accedeixi a l'aparcament. Així s'aconseguirà reproduir amb major precisió el procés de càrrega dels VE, ja que és ben sabut que els vehicles que entrin a l'aparcament ho faran amb nivells o percentatges de càrrega diferents. L'estat de càrrega del VE depèn de la distància de recorregut després de la darrera càrrega i de la autonomia elèctrica del vehicle, per a determinar la distància recorreguda pel VE des de la darrera càrrega, en general, s'utilitza una distribució log-normal [28], amb probabilitat nul·la per les distàncies negatives i una cua que s'estén cap a l'infinit per a distàncies positives, que s'obté a partir de la **Equació 9**:

Equació 9:
$$g(d; \mu; \sigma) = \frac{1}{d\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(\ln d - \mu)^2 / 2\sigma^2}; \quad d > 0$$

On "d" representa la distància que ha recorregut el vehicle, "μ" és la mitja de la distribució log-normal, i "σ" és la desviació estàndard de la distribució normal corresponent. Així, l'estat de càrrega del VE que entra a l'aparcament es pot expressar com:

Equació 10:
$$SOC = 1 - \frac{d}{d_R}; \quad 0 < d < d_R$$

On SOC és l'estat de càrrega (%) del VE, "d" és la distància que ha viatjat des de l'última càrrega completa (que és una variable aleatòria subjecte a la distribució log-normal) i d_R és el rang màxim del VE amb un 100% de càrrega.

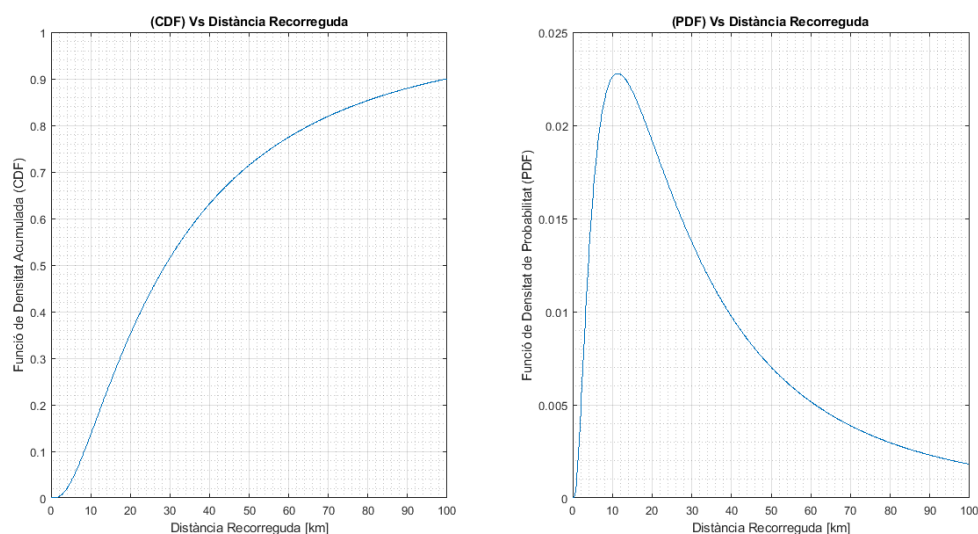


Figura 7. Funció de densitat de probabilitat en funció de la distància recorreguda (dreta) i funció de densitat acumulada (esquerra) generades amb l'eina MATLAB

A fi d'ajustar la funció a la mobilitat de Mallorca, i degut a la inexistència de dades relacionades amb el quilometratge dels turismes a nivell local o estatal, s'han establert els següents paràmetres basant-se en els estudis de mobilitat fets a altres països [29], [30]: des de l'última recàrrega un 10% dels vehicles haurà recorregut 5 km o menys, mentre que un 50% haurà recorregut 28,9 km o menys, obtenint la funció de densitat de probabilitat i la funció de densitat acumulada que es mostren a la **Figura 7**.

FASE 3: PLANIFICACIÓ DE LES INFRAESTRUCTURES DE RECÀRREGA

En aquesta fase de la metodologia, es determina minut a minut, el nombre de VE que accediran a l'aparcament per un cert nivell de penetració del VE i per un flota local de vehicles elèctrics. Específicament, la metodologia proposada utilitza una matriu amb el mateix nombre d'elements que minuts en el període d'avaluació $Num_{ocup} \in \mathbb{Z}^{Num_{Repeat} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60}$. A continuació, per cada VE que, d'acord amb els resultats de la fase 1, s'espera que estacioni a l'aparcament, el valor de la matriu s'incrementarà en una unitat entre el minut d'entrada i el minut de sortida del vehicle, determinats en la fase 2. D'aquesta manera, s'obté el resultat del nombre de vehicles elèctrics que haurien estacionat en cas de no haver-hi cap tipus de limitació o restricció. Aquesta informació ens servirà de base per a la planificació de les infraestructures de càrrega, determinant els percentils P_{99} i $P_{99,6}$ dels intents d'estacionament de vehicles elèctrics. D'aquesta forma es podrà determinar el nombre suficient de punts de càrrega per tal de satisfer el 99% (percentil P_{99}) del nombre d'hipotètics estacionaments. A la vegada, la metodologia també determina el nombre mig de hores per any en que es donarà una falta de places d'aparcament específics per a vehicles elèctrics, perquè en cada cas es pugui avaluar des d'un punt de vista tècnic/científic, quins valors vinculats amb els percentils calculats son els òptims pel desplegament de les infraestructures de carrega del VE; tal i com es mostra a la **Taula 18**.

Taula 18. Resultats de planificació obtinguts amb la metodologia proposada amb una penetració del vehicle elèctric del 2,38%, a l'aparcament d'Antoni Maura.

Paràmetres calculats amb la metodologia	Resultats
Numero mig de estacionaments anuals a l'aparcament:	568.696
Numero mig d'intents d'estacionaments anuals de EV a l'aparcament:	13.476
Percentil 99%, numero de places d'estacionament EV necessàries:	16
Període amb una demanda major de places d'estacionament que percentil 99% [h/any]:	76,97
Percentil 99,6%, numero de places d'estacionament EV necessàries:	18
Període amb una demanda major de places d'estacionament que percentil 99.6% [h/any]:	24,57

GENERACIÓ FOTOVOLTAICA

PARÀMETRES AMBIENTALS

Per tal de poder estimar amb precisió l'energia generada per a una instal·lació fotovoltaica, és indispensable disposar d'una eina que simulació numèrica, que a partir de les característiques del parc fotovoltaic i les condicions meteorològiques de la ubicació d'aquesta, sigui capaç d'estimar la generació elèctrica, per un interval de temps i un període d'avaluació prefixat; d'almenys un any. Per a tal fi, en aquest treball s'ha desenvolupat un mòdul, basat en MATLAB, que s'encarrega de simular la generació elèctrica, minut a minut, d'una instal·lació fotovoltaica donada durant almenys un període d'un any.

A la vegada, per a obtenir uns resultat acurats, és fonamental disposar d'unes dades meteorològiques de qualitat de l'emplaçament on s'ubicarà la instal·lació o d'una estació meteorològica propera, com es el cas de les estacions de l'*Agència Estatal de Meteorologia (AEMET)* [31]. Concretament, en aquest treball s'han fet servir essencialment dades de les estacions meteorològiques, de la AEMET, que aporten la informació meteorològica d'entrada essencial perquè el model desenvolupat pugui operar. Les dades d'entrada del model son bàsicament les següents: la irradiància solar global horària (DGI), la irradiància solar difusiva horària (DHI) i la irradiància directe normal horària (DNI), així com la temperatura ambient horària de l'any de referència. A continuació, les dades de radiació horària es re-escalen temporalment, obtenint la irradiància en intervals d'un minut, interpolant els valors que falten i utilitzant un generador de números aleatoris basat en la distribució beta, que simula la presència de núvols al llarg del dia. Aquests valors interpolats es normalitzen a la radiació horària detectada pels sensors AEMET. Els valors de temperatura també s'interpolen minut a minut a partir de dades horàries a les que s'afegeix un terme aleatori, basat en una distribució Gaussiana, per a reproduir la component estocàstica present en la mesura de la temperatura real al llarg d'una hora.

RADIACIÓ DIRECTE SOBRE EL PANELL FOTOVOLTAIC INCLINAT

Un altre paràmetre fonamental per a la correcta estimació de la radiació solar que incideix sobre els mòduls fotovoltaics inclinats, és la posició exacta del sol al llarg de l'any. Aquesta s'obté mitjançant l'algorisme de la *Plataforma Solar d'Almeria (PSA)* [32], que ens permet determinar la posició exacte del sol respecte a les coordenades de les plaques fotovoltaïques en qualsevol instant de temps, generant com a element de sortida una matriu que ens aporta el valor dels diferents angles solars (azimut, declinació, zenit i elevació) per a cada minut al llarg de l'any. Aquest algorisme és de gran utilitat gràcies a la bona precisió i la gran eficiència computacional que presenta. Un altre factor que s'ha de tenir en compte a l'hora de desenvolupar el model proposat és la presència d'ombres que impedeixen l'arribada de la radiació solar sobre els panells fotovoltaics. Per tal de poder calcular per a quins angles solars els obstacles circumdants (vegetació, edificis, etc.), s'inicialitza amb un fitxer

Excel extern (.csv) amb les alçades i les coordenades en que es troben aquests obstacles. A partir d'aquesta informació, l'algoritme desenvolupat calcula per a quins angles solars, és a dir, en quins instants de temps, la radiació solar directe incident sobre el panell serà bloquejada i, per tant, la generació fotovoltaica serà nul·la o només disposarà de de la component difusa.

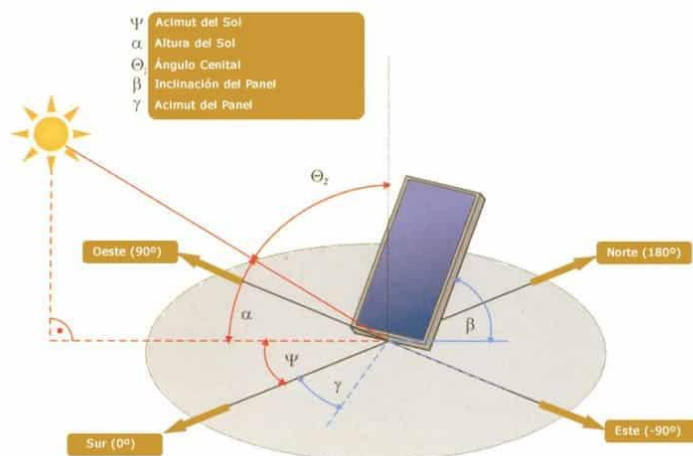


Figura 8. Posició del sol, angles d'inclinació, d'incidència i d'orientació (azimut) dels panells solars. Font: [33]

Una vegada desenvolupats els càlculs previs, l'algoritme passa a calcular la radiació solar (global i difusa) incident sobre els diferents panells fotovoltaics, depenent de la inclinació i l'azimut dels panells, **Figura 8**. La radiació directe sobre cada un dels panells (ID_i) es calcula a partir del cosinus entre la normal del panell fotovoltaic respecte a la superfície i la posició del sol, seguint relacions geomètriques bàsiques, com es mostra a l'**Equació 11**.

$$\cos \gamma = A + B + C + D + E$$

$$A = \sin \delta \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta$$

$$B = -\sin \delta \cdot \cos \psi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha$$

Equació 11:

$$C = \cos \delta \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta \cdot \cos h$$

$$D = \cos \delta \cdot \sin \psi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \cdot \cos h$$

$$E = \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin h$$

On α és l'azimut del panell, β és la inclinació d'aquest, δ és la declinació solar, ψ és la latitud i h l'angle solar. A la vegada, a partir d'aquí, la radiació directe incident sobre la superfície del panell es pot obtenir amb l'**Equació 12**.

Equació 12:

$$ID = DNI \cdot \cos \gamma$$

MODEL DE RADIACIÓ DIFUSA

Una vegada obtinguda la radiació directe que incideix sobre la superfície inclinada del panell, el següent pas consisteix en obtenir la radiació difusa que ens incideix sobre aquesta. En aquest treball s'ha optat pel model proposat per Pérez *et al.* [34] que es basa en la representació de la cúpula del cel com a fons isotròpic superposant els efectes de l'horitzó i els efectes circumsolars. Aquest model es pot expressar a partir de la següent fórmula:

$$\text{Equació 13:} \quad IDif = DHI \cdot [(1 - F1) \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + F1 \frac{a}{b} + F2 \sin \beta]$$

On $F1$ i $F2$ són els coeficients que expressen el grau d'anisotropia circumsolar i horitzontal respectivament. Els termes " a " i " b " es defineixen com:

$$\text{Equació 14:} \quad a = \max(0, \cos \gamma)$$

$$\text{Equació 15:} \quad b = \max(0.087, \cos Z)$$

Els coeficients d'il·luminació $F1$ i $F2$ es modelen amb un conjunt de coeficients validats per dades de diferents llocs del món, l'elevació del sol i la massa òptica d'aire. Aquest conjunt de coeficients, emmagatzemats en un fitxer extern (.csv), són llegits pel programa i s'apliquen les següents fórmules:

$$\text{Equació 16:} \quad F1 = F11 + F12 \cdot \Delta + F13 \cdot Z$$

$$\text{Equació 17:} \quad F2 = F21 + F22 \cdot \Delta + F23 \cdot Z$$

On $F11$, $F12$, $F13$, $F21$, $F22$, $F23$ són els coeficients del model de Pérez, Z és l'azimut i Δ és la longitud del camí òptic (relacionada amb la massa òptica).

RADIACIÓ SOBRE LA CEL·LA FOTOVOLTAICA

Un altre factor que modifica la quantitat de radiació que pot aprofitar el panell fotovoltaic està relacionat amb la quantitat de radiació que es reflecteix en la coberta protectora. Aquests efectes poden ser significatius per a angles d'incidència superiors a 65° . L'efecte de l'absorció i la reflexió de la radiació en funció de l'angle incident s'expressa en funció del modificador d'angle d'incidència (IAM), que es descriu com la proporció entre la radiació absorbida pel panell en qualsevol angle d'incidència ($\tau(\gamma)$) dividit per l'absorció a incidència normal ($\tau(0)$).

$$\text{Equació 18:} \quad IAM(\gamma) = \frac{\tau(\gamma)}{\tau(0)}$$

L'absorció també depèn del coeficient d'extinció del vidre (K) i del gruix del vidre (L), que es carreguen a l'eina mitjançant un fitxer que inclou els descriptors (.csv) de cada model de panell/mòdul

fotovoltaic. Una bona aproximació per la transmissió del sistema de cobertura, tenint en compte les pèrdues reflectants i l'absorció a l'interior del vidre, ve donat per la següent expressió [35]:

Equació 19:
$$\tau(\gamma) = e^{-\left(\frac{KL}{\cos\gamma_r}\right)} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\gamma_r - \gamma)}{\sin^2(\gamma_r + \gamma)} + \frac{\tan^2(\gamma_r - \gamma)}{\tan^2(\gamma_r + \gamma)} \right) \right]$$

On l'angle de reflexió (γ_r) s'obté a partir de la llei de Snell:

Equació 20:
$$\gamma_r = \arcsin(n \sin \gamma)$$

On "n" és correspon amb un índex efectiu de refracció de la coberta del panell. On un valor de 4 m^{-1} pel coeficient d'extinció és considera com a raonable per al vidre "blanc d'aigua" i un valor d'aproximadament $0,002 \text{ m}$ és també raonable per a la majoria de panells fotovoltaics recoberts de vidre i, en el cas del vidre, "n" pren un valor mig de 1,526.

L'IAM calculat modifica la quantitat d'irradiància directa que absorbeix el panell, així, la irradiància directa efectiva que el panell fotovoltaic absorbeix ve donada per:

Equació 21:
$$ID_{ef} = ID \cdot IAM(\gamma)$$

Finalment, la irradiació total (IG) sobre el mòdul fotovoltaic serà la suma de les dues components, la directa (ID_{ef}) i la difusiva (ID_{if}), com es veu a la següent expressió:

Equació 22:
$$IG = ID_{ef} + ID_{if}$$

Per aconseguir una estimació més acurada de la potència generada per cada panell/mòdul fotovoltaic, és necessari tenir en compte els efectes de la temperatura, en aquest treball s'implementa el model "Sandia PV Array Performance Model (SAPM)" [36] a tals efectes. Aquest model permet diferenciar entre dues tipologies d'instal·lació diferents de la instal·lació fotovoltaica: muntatge al sostre o muntatge en bastidor obert. El tipus de muntatge ha de ser el mateix per a tots els mòduls / panells de la instal·lació, perquè es defineix al descriptor principal de l'eina numèrica desenvolupada (al fitxer init.xml).

MODEL TÈRMIC

Es requereix d'un model tèrmic basat en condicions ambientals locals per a poder ajustar la producció energètica dels mòduls, a les diferents condicions ambientals. En aquest cas, a partir de les dades de l'estació meteorològica de l'AEMET més propera, es calcula la temperatura de la cel·la fotovoltaica mitjançant un model tèrmic empíric desenvolupat pels Laboratoris Sandia. Aquest model s'ha demostrat que és adequat per als sistemes fotovoltaics amb una precisió d'aproximadament $\pm 5^\circ\text{C}$, que té un impacte inferior al 3% sobre la potència de sortida.

Equació 23:

$$T_m = E \cdot (e^{a+b \cdot WS}) + T_a$$

On, T_m és la temperatura del mòdul de la superfície posterior (°C), T_a és la temperatura de l'ambient (°C), E és la irradiació solar a la superfície del mòdul (W/m^2), WS és la velocitat del vent (m/s), a és un coeficient determinat empíricament que estableix el límit superior per a la temperatura del mòdul amb velocitats del vent baixes i alta irradiació solar; finalment, b és un coeficient empíric que estableix la velocitat a la qual la temperatura del mòdul disminuirà a mesura que la velocitat del vent augmenta.

En conseqüència, trobem que els coeficients empírics "a" i "b" venen a representar diferents configuracions de muntatge i tipus de mòdul. A l'eina numèrica desenvolupada només s'ha inclòs el tipus de mòdul de vidre i dues configuracions de muntatge diferents: muntatge al sostre o muntatge en bastidor obert, amb els coeficients que es presenten a la **Taula 19**.

Taula 19. Coeficients segons la configuració del muntatge.

Configuració del muntatge	a	b	ΔT (°C)
Bastidor obert	-3.47	-0.0594	3
Muntatge al sostre	-2.98	-0.0471	1

La temperatura de la cel·la es pot relacionar amb la temperatura de la superfície posterior del mòdul mitjançant una relació senzilla, basada en l'assumpció d'una conducció tèrmica unidimensional a través dels materials del mòdul darrere de la cel·la. Es calcula de la següent manera:

Equació 24:

$$T_c = T_m + \frac{E}{E_0} \cdot \Delta T$$

On T_c és la temperatura de la cel·la (°C), T_m és la temperatura calculada de la superfície posterior (°C), E_0 és la irradiància solar de referència del mòdul ($1000 W/m^2$).

L'increment de la temperatura de la cel·la fotovoltaica disminueix el voltatge generat per aquesta, de manera que la potència generada serà menor. Es suposa que l'eficiència disminuirà a velocitat constant en funció de l'augment de temperatura, governada per un coeficient de temperatura γ (% / °C) que depèn del model de cel·la fotovoltaica utilitzat en cada cas. Per tal de poder disposar de la informació de gran part dels models de cel·les fotovoltaïques presents al mercat, el mòdul carrega a l'eina numèrica una base de dades de la *California Energy Commission* [37], que conté tots els paràmetres necessaris per a realitzar els càlculs energètics corresponents, entre ells el coeficient de temperatura (γ).

Equació 25:

$$P_{dc} = \frac{I_{tr}}{1000} P_{dc0} (1 + \gamma(T_c - T_{ref}))$$

Finalment, s'obté la potència generada en W a partir de la **Equació 25**, on I_{tr} és la irradiància transmesa i T_{ref} és la temperatura de referència de 25°C. Aquesta és la potència generada en corrent contínua de cada un dels panells, a partir d'aquestes dades i tinguent en compte les pèrdues del cablejat per efecte Joule, s'obté la potència total generada per a cada una de les matrius de panells fotovoltaics que comparteixen inversor.

MODEL DE L'INVERSOR FOTOVOLTAIC

El model d'inversor utilitzat en el present treball és el proposat per PVWatts, i que utilitza la base de dades elaborada per la *California Energy Commission (CEC)*. Aquest model es basa en dades experimentals on les dades d'eficiència es varen ajustar a un model de pèrdues quadràtiques. Els resultats obtinguts es presenten a l'**Equació 26**. L'eficiència de l'inversor de referència a partir de les dades CEC de l'inversor típic més real és de 0,9637 (P_{aco} / P_{dco}). L'eficiència nominal (η_{ref}) per defecte és de 0,96.

Equació 26:

$$\eta = \frac{\eta_{nom}}{\eta_{ref}} - 0.0162 \cdot \xi - \frac{0.0059}{\xi} + 0.9858; \quad \text{On } \xi = \frac{P_{dc}}{P_{dco}} \quad \text{i} \quad P_{dco} = \frac{P_{aco}}{\eta_{nom}}$$

Finalment, quan la sortida del corrent altern de l'inversor (AC) prevista supera la potència nominal, aquesta es limita al seu valor màxim, com es mostra en la **Equació 27**.

Equació 27:

$$P_{AC} = \begin{cases} \eta P_{dc} & : 0 < P_{dc} < P_{dco} \\ P_{aco} & : P_{dc} \geq P_{dco} \\ 0 & : P_{dc} = 0 \end{cases}$$

A la vegada s'han pres en consideració les pèrdues degudes al cablejat del sistema (pèrdues per efecte Joule), tenint en compte la seva resistivitat, la seva gruixa i la seva longitud que depenen de la potència instal·lada en cada un dels casos a analitzar.

GENERADOR DE LA DEMANDA BASE HORÀRIA

A fi de generar la corba de demanda base, de l'aparcament, es parteix d'un fitxer extern a l'eina (*.csv) per a cada aparcament a estacionar, on es detalla tota la informació referent a la tarifa d'accés contractada, a partir de factures elèctriques mensuals. Aquest fitxer conté les dades de cada factura mensual introduïda com una fila de dades, que a la vegada incorpora tota la informació d'un peatge d'accés 3.0A ($P_{cont} \geq 15kW @ 400V_{AC}$), amb els costos dels diferents períodes de facturació desglossats (P1|P2|P3), així com l'energia activa consumida mensualment per període. El format dels fitxers i els diferents camps que contenen es presenta a la **Taula 20**.

Taula 20. Format del fitxer CSV amb les dades de la informació de les facturacions històriques mensuals, exemple factures de l'aparcament d'Antoni Maura.

Camps del fitxer	Data d'inici del període de facturació	Data de fi del període de facturació	Numero del comptador elèctric	Potència contractada al període P ₁ [kW]	Potència contractada al període P ₂ [kW]	Potència contractada al període P ₃ [kW]	Consum d'energia activa en el període P ₁ [kWh]	Consum d'energia activa en el període P ₂ [kWh]	Consum d'energia activa en el període P ₃ [kWh]	Consum d'energia reactiva en el període P ₁ [kVAh]	Consum d'energia reactiva en el període P ₂ [kVAh]	Consum d'energia reactiva en el període P ₃ [kVAh]
Nom del camp:	Period_start	Period_end	Num_contador	Pot_con_P1	Pot_con_P2	Pot_con_P3	Consum_act_P1	Consum_act_P2	Consum_act_P3	Consum_reac_P1	Consum_reac_P2	Consum_reac_P3
Factura #1	30/11/2016	31/12/2016	87672716	200	200	200	6.070	14.472	10.319	50	112	51
Factura #2	01/01/2017	31/01/2017	87672716	200	200	200	6.181	15.125	11.216	52	121	53

La metodologia proposada en aquest treball s'ha centrat en els peatges d'accés 3.0A, és a dir, una tarificació que presenta discriminació horària en tres períodes diferenciats: P₁ (pic), P₂ (pla), P₃ (vall), ja que és la que es té contractada tots els aparcaments públics de Palma. Sobre aquest consum base horari de l'aparcament, s'hi haurà d'afegir posteriorment el consum degut a la recàrrega del VE, així com la generació energètica de la instal·lació fotovoltaica que es proposi desplegar en cada aparcament.

El resultat que ens dona aquest mòdul és el consum mig diari de l'aparcament en cada un dels tres períodes de facturació (P₁|P₂|P₃), a partir de l'històric de facturació elèctrica. Per a fer-ho, el consum energètic es distribueix uniformement al llarg dels diferents períodes de facturació ($P_1 \rightarrow \frac{4h}{day} \mid P_2 \rightarrow \frac{12h}{day} \mid P_3 \rightarrow \frac{8h}{day}$) per a obtenir, finalment, la demanda base horària $P_{base}(t_i)[W]$, és a dir, la potència instantània mitja, minut a minut. On $i \in [(1, \dots, \#N_{repetitions}) \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60]$, dividint la demanda horària entre 60 minuts i repartint el resultat uniformement en cada minut que conforma l'hora, ja que normalment la demanda base segueix un consum regular degut als seus principals consums deriven de: la ventilació de l'espai (renovació d'aire i extracció dels gasos de combustió dels vehicles) i la seva il·luminació.

GENERADOR DE L'OCUPACIÓ REAL I ESTIMACIÓ DE LA DEMANDA ENERGÈTICA

Aquest mòdul determina la demanda energètica real de l'aparcament un cop s'han fixat el nombre de punts/estacions de càrrega per a satisfer el P₉₉ i el P_{99,6} dels estacionaments de VE, limitant així el nombre de vehicles que es poden carregar al hora. Per tal d'assolir aquest objectiu, la metodologia proposada comença ordenant en ordre ascendent la taula tots els intents d'estacionament de VE, depenent del minut d'arribada. En cas de que en el minut d'arribada el nombre de vehicles elèctrics estacionats als punts de recàrrega sigui igual al nombre de punts de recàrrega aquest vehicle no podrà

satisfereix la seva necessitat energètica i, per tant, tampoc contribuirà a incrementar la demanda elèctrica de l'aparcament.

A continuació, es creen dues matrius unidimensionals, amb tants d'elements com minuts en el període d'avaluació. La primera s'utilitza per a emmagatzemar la ocupació de VE real minut a minut, incrementant en una unitat entre el minut d'entrada i el minut de sortida del VE sempre i quan el nombre de VE no superi el nombre de places de recàrrega de VE fixada prèviament, en cas contrari el vehicle serà descartat.

La segona matriu incrementarà el seu valor amb el consum instantani dels VE que s'estan recarregant durant el període fixat de la duració del seu estacionament. Per tal de fixar la demanda de cada VE_i, s'ha de determinar l'índex "k" de la matriu de la "corba associada a la càrrega" que està associada al model de VE que hagi accedit a l'aparcament, com s'ha detallat anteriorment, i que es correspon amb el valor del percentatge de bateria més semblant al valor prefixat aleatòriament. A partir d'aquest índex k, la metodologia relaciona el percentatge de bateria amb l'instant de temps del procés de càrrega completa, $t_{i,k}$ [min] relacionat a l'hora amb la potència instantània consumida $Pot_{Charge}(t_{i,k})$ [W]. Així, coneixent el temps total de recàrrega del model de VE que ha entrat a l'aparcament, la metodologia obté el temps que resta per a la recàrrega completa d'aquest $t_{i,rest} = t_{i,k} - t_{i,k}$. Si el temps per a la recàrrega completa és menor o igual a la durada de l'estacionament, la metodologia assignarà minut a minut, la potència consumida per aquest. En canvi, si la durada de l'estacionament és major que el temps de recàrrega completa, un cop completada la recàrrega es deixarà d'agregar cap valor a la demanda. Sent el procediment resseguit per a determinar el consum minut a minut el que es presenta en la següent expressió:

$$\text{Equació 28: } Pot_{Charge_EV} = \sum_{i=1}^{Num_{EV}} \sum_{j=t_{in,i}}^{t_{out,i}} \begin{cases} (Pot_{Charge_{EV}}(j) + Pot_{Charge}(j)) , & \text{si } t_{out,i} \leq t_{i,rest} \\ (Pot_{Charge_{EV}}(j) + 0) & , \text{si } t_{out,i} > t_{i,rest} \end{cases}$$

Finalment, aquest mòdul combinarà, minut a minut, les diferents demandes energètiques, és a dir, la potència base demandada de l'aparcament i el consum elèctric associat a la càrrega dels VE, amb la generació elèctrica de la instal·lació fotovoltaica corresponent. Obtenint així la demanda neta de l'aparcament que, a l'hora, es farà servir per a determinar la demanda energètica horària i quart horària; a fi de determinar el cost energètic associat.

INTEGRADOR DE LA DEMANDA

Aquest mòdul s'encarrega d'integrar la demanda energètica neta minut a minut de l'aparcament en períodes de 15 minuts (quarto horària) i en períodes horaris, determinant el consum energètic [kWh] d'ambdós intervals. On el consum en intervals quarto horaris ens servirà per a determinar la

contribució del màxímetre [kW], mentre que el consum horari s'utilitzarà per a determinar la contribució al terme d'energia [kWh]. Aquestes dues contribucions seran la base del mòdul de facturació energètica, imprescindible per a obtenir la facturació energètica mensual.

Aquest mòdul també analitzarà estadísticament la demanda energètica màxima al llarg del període d'avaluació amb el percentil del 99% i del 99,6%, així com la demanda instantània màxima en tot l'interval. Aquests resultats seran útils per a planificar les infraestructures de càrrega dels vehicles elèctrics de l'aparcament.

FACTURACIÓ ENERGÈTICA

Finalment, aquest darrer mòdul s'encarrega de calcular la factura mensual [38] per a un peatge d'accés 3.0A, el més habitual als aparcaments públics operats en regim de rotació. És important remarcar que no hi ha un mercat regulat per a aquest tipus de facturació, sinó que és el govern Espanyol el que estableix el preu dels peatges d'accés per potència i consum, però cada comercialitzadora pot aplicar el marge de comercialització i les condicions contractuals (com compromisos de permanència) que cregui convenients. Aquest tipus de tarifa sempre aplica una discriminació horària en tres períodes diferenciats: P1(Punta), P2(Pla) i P3(Vall); i cada període correspon a un interval horari diferent, en els que el preu de l'energia i de la potència contractada són diferents. El preu final dependrà de diferents paràmetres, com es detalla a continuació:

TERME DE POTÈNCIA

Aquest tipus de facturació, la potència contractada pot ser diferent per a cada un dels períodes horaris, però en tot cas ha de ser superior a 15kW. El propòsit d'aquest primer terme és el de facturar el cost de la reserva de la disponibilitat de potència per part del sistema elèctric, a fi de generar l'energia suficient per a satisfer aquesta demanda per a cada període de facturació. El preu del cost anual del terme de potència contractada per $kW_{contractat}$ i any el que es mostra a la **Taula 21**.

Taula 21. Cost actual del terme de potència per un patge d'accés 3.0A.

Període de facturació	Cost [€/kW·any]
Període P1:	41,950752
Període P2:	25,170444
Període P3:	16,780296

On el cost del terme de potència es calcula mensualment com es mostra a la **Equació 29**.

$$\text{Equació 29: } Terme_{potencia} = (Pot_{p1} \cdot Cost_{p1} + Pot_{p2} \cdot Cost_{p2} + Pot_{p3} \cdot Cost_{p3}) \cdot \frac{\#dies_{període}}{365}$$

El preu del terme de potència pot variar depenent de la potència contractada i, a més, depèn de la potència registrada pel màxímetre, que s'encarrega de mesurar la potència mitja consumida en

períodes quart horaris. El funcionament del terme de potència regulat pel màxímetre es detalla a la

Taula 22.

Taula 22. Procediment per avaluar el terme de potència en funció de la potència registrada pel màxímetre.

Demanda quart horàriament (enregistrada pel màxímetre)	Potència a facturar
La potència es inferior al 85% de la potència contractada.	Es facturarà el 85% de la potència contractada. Actualment aquest punt no s'aplica a les tarifes actual d'Endesa.
La potència es troba entre el 85% i el 105% de la potència contractada.	Es facturarà la potència contractada.
La potència es superior al 105% de la potència contractada.	Es facturarà la potència contractada a més d'una penalització; que es correspon al doble de la diferència entre el valor enregistrat i el valor corresponent al 105% de la potència contractada, en concepte de penalització.

TERME D'ENERGIA ACTIVA

El terme d'energia activa s'encarrega d'avaluar el cost de l'energia activa consumida horàriament [kWh], que s'obté multiplicant els kWh consumits a cada període de facturació pel cost de l'energia en aquest mateix període [€/kWh].

Equació 30:

$$Terme_{energia_activa} = \left(\sum_h P_1[kWh](h) \cdot Cost_{p_1} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] + \sum_h P_2[kWh](h) \cdot Cost_{p_2} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] + \sum_h P_3[kWh](h) \cdot Cost_{p_3} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \right) [\text{€}]$$

PENALITZACIÓ PER ENERGIA REACTIVA

L'energia reactiva [kVArh] està relacionada amb el factor de potència de la instal·lació. Aquesta no es factura directament, sinó que s'aplica una penalització regulada per llei quan l'energia reactiva és més gran que el 33% de l'energia activa consumida en un determinat període de facturació. Les penalitzacions per energia reactiva no s'han inclòs en el present treball, ja que es necessitaria informació molt específica referent al model elèctric equivalent de la instal·lació elèctrica de cada apartament a estudiar.

IMPOST DE L'ENERGIA

Una vegada calculats els diferents termes de facturació, aquests es sumen i, finalment, s'hi aplica l'impost energètic corresponent. Aquest impost es regulat pel govern central i s'aplica abans d'imputar l'IVA. Actualment aquesta taxa és del 5,112693%. Per tant, el seu valor es pot obtenir amb la següent expressió:

Equació 31:

$$Impost_{electricitat} = (Cost_{terme_energia_activa} + Cost_{terme_energia_reactiva} + Cost_{terme_potencia}) \cdot 0,05112693 [\text{€}]$$

LLOGUER DELS EQUIPS DE MESURA

A la factura energètica apareixen termes menors, com es el cas del lloguer dels equips de mesura i el seu manteniment a càrrec de l'empresa distribuïdora. Que te un cost anual associat fixat per a cada

distribuïdora de zona, que s'abona de manera fraccionada proporcionalment al nombre de dies del període de facturació. Cient la formula emprada pel seu càlcul:

Equació 32:
$$Lloguer_{equips} = Cost_{lloguer_equips} [\text{€/any}] \cdot \frac{\#dies_{periode}}{365 \text{ dies/any}}$$

IMPORT FINAL DE LA FACTURA ENERGÈTICA

Finalment, l'import total de la factura energètica mensual és la suma de tots els calculats anteriorment, més un 21% corresponent a l'impost del valor afegit (IVA). A **Equació 33** es mostra la fórmula emprada per a realitzar aquest darrer càlcul.

Equació 33:
$$Cost_{factura} = (Cost_{terme_energia_activa} + Cost_{terme_energia_reactiva} + Cost_{terme_potencia} + Impost_{energia} + Cost_{lloguer_equips}) \cdot (1 + IVA) [\text{€}]$$

CAPÍTOL 4

RESULTATS

En el present capítol s'aplica la metodologia proposada a l'anterior capítol a dues tipologies d'aparcaments ben diferenciades, ambdues operades en regim de rotació, a fi de poder analitzar els resultats obtinguts per la metodologia. Concretament la metodologia s'aplica en primera instància a un aparcament públic subterrani com el d'Antoni Maura, caracteritzat per la seva situació privilegiada al casc antic de Palma i el gran nombre de rotacions anuals que presenta, una demanda elèctrica base elevada i amb ocupacions màximes coincidents amb els moments de màxima irradiància solar. En aquest primer aparcament s'analitzarà la mitigació que tindrà la incorporació d'una instal·lació fotovoltaica sobre l'increment de la demanda elèctrica associada a la carrega dels vehicles elèctrics. Concretament s'abordaran dos escenaris de desplegament d'una capacitat de generació fotovoltaica en regim d'autoconsum de 100 i 200 kWp.

Seguidament, la metodologia s'aplica a un l'aparcament públic en superfície com es el de Comte d'Empúries, un aparcament només obert al públic de les 07h a les 22h, que presenta una demanda base baixa degut a la baixa demanda associada a l'enllumenat i a la inexistència de sistema de ventilació mecànica. En aquest segon aparcament s'analitzarà novament la mitigació que tindrà sobre l'increment de la demanda elèctrica associada a la carrega dels vehicles elèctrics. Concretament, en aquest cas el baix nombre de places d'estacionament disponibles que condueixen a un baix nombre de rotacions anuals a l'aparcament, han fet que s'abordin dos escenaris de desplegament d'una capacitat de generació fotovoltaica en regim d'autoconsum significativament inferiors als dels primer aparcament con son de 4,05 i 8,10 kWp.

En ambdós casos s'ha partit de les dades històriques vinculades a les butlletes d'estacionament provistes per la SMAP, a fi de caracteritzar el comportament de cada aparcament. Per a seguidament començar a planificar els punts/estacions de càrrega necessaris, per a cada aparcament, per a cobrir la demanda de estacionament/carrega dels VE, amb una cobertura del percentil 99%, pels diferents nivells de penetració estimats pels pròxims 5 anys [0,31 – 2,38%]. Finalment, es presentaran y discutiran els resultats associats a la demanda energètica de la carrega dels vehicles elèctrics y

l'impacte de la generació fotovoltaica que te sobre la mitigació d'aquests. Per a continuació abordar els corresponents impactes econòmics associats a les variacions del consum energètic.

PRIMER CAS D'ESTUDI: APARCAMENT D'ANTONI MAURA

La metodologia proposada s'aplica sobre l'aparcament d'Antoni Maura, un aparcament públic, operat per la Societat Municipal d'Aparcaments de Palma (SMAP), situat al centre de Palma just devora la principal zona monumental de Palma i que disposa d'un fàcil accés des de l'avinguda Alfonso Suárez i l'avinguda Antoni Maura, tal i com es mostra a la **Figura 9**. Actualment l'aparcament disposa de 869 places d'estacionament, de les quals 748 places es troben en explotació en regim de rotació per la SMAP, i d'entre aquestes 5 estan equipades amb punts de carrega de vehicles elèctrics.

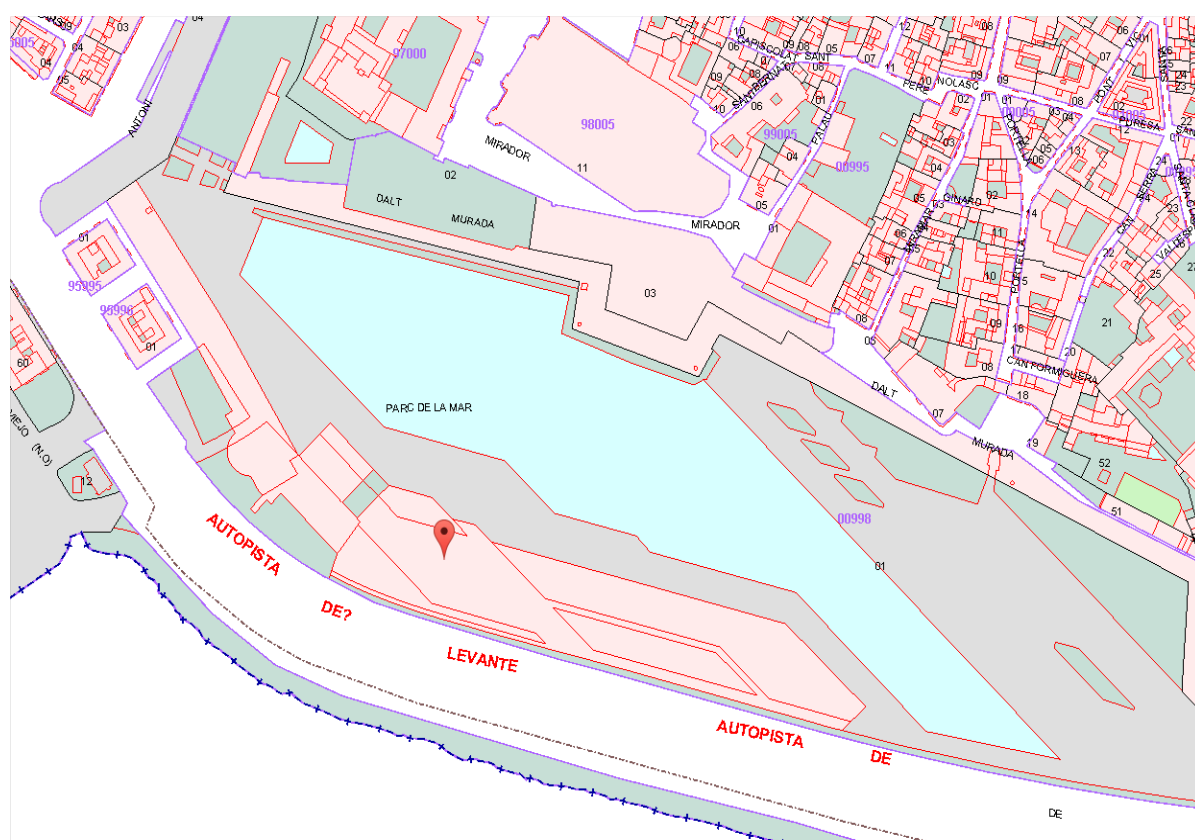


Figura 9. Ubicació de l'aparcament d'Antoni Maura

Concretament la metodologia desenvolupada s'aplicarà per a planificar el desplegament de noves infraestructures d'estacionament i càrrega del vehicle elèctric pels propers 5 anys, així com el subseqüent anàlisi de l'impacte energètic i econòmic per a dos escenaris diferents de generació fotovoltaica.

DADES DE PARTIDA

La modelització de l'aparcament s'inicia amb les dades de rotació d'estacionaments en l'aparcament d'Antoni Maura pel període 2008-2017, a la **Taula 23** es presenten les rotacions mensuals en el període indicat.

Taula 23. Rotacions de vehicles a l'Aparcament d'Antoni Maura. Font: SMAP

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Gener	28.698	26.754	26.098	29.743	28.065	26.288	25.857	26.620	27.058	27.251
Febrer	31.695	30.856	29.709	31.590	28.421	26.424	26.297	27.924	33.454	30.883
Març	40.529	36.887	37.197	40.866	39.002	40.089	36.545	35.435	45.892	39.959
Abril	42.612	46.501	41.086	48.268	46.970	45.929	48.152	45.968	49.850	52.662
Maig	47.980	45.783	43.058	51.866	51.798	55.211	52.875	52.845	57.960	54.996
Juny	45.755	48.386	48.226	55.355	49.938	48.969	52.594	51.521	56.453	56.412
Juliol	51.665	52.217	54.597	59.582	58.701	58.193	59.281	59.087	60.654	63.702
Agost	52.507	45.743	58.367	60.802	58.468	59.069	60.035	58.232	62.790	64.591
Setembre	48.874	46.715	53.842	55.070	52.033	54.331	55.185	53.930	56.105	57.267
Octubre	48.147	44.171	46.278	49.942	50.012	50.247	51.576	46.889	52.183	53.237
Novembre	28.884	28.281	29.221	29.792	30.188	29.259	29.146	28.612	32.044	---
Desembre	34.781	30.546	29.690	30.188	28.975	28.983	32.910	32.993	32.773	---
T. baixa:	164.587	153.324	151.915	162.179	154.651	151.043	150.755	151.584	171.221	98.093
T. alta:	337.540	329.516	345.454	380.885	367.920	371.949	379.698	368.472	395.995	402.867
Total:	502.127	482.840	497.369	543.064	522.571	522.992	530.453	520.056	567.216	500.960
Contribució										
T. alta:	67,22%	68,25%	69,46%	70,14%	70,41%	71,12%	71,58%	70,85%	69,81%	---

Les dades de rotació, presentades a la **Taula 23**, mostren un volum mig d'unes 521.000 rotacions/any a l'aparcament, i s'aprecia clarament un patró d'ocupació estacional, concentrant un 70% de les rotacions als mesos de la temporada alta turística, és a dir, entra abril i octubre, quan li correspondria de mitja tan sols el 58,33% de les rotacions anuals si aquestes estiguessin distribuïdes equitativament al llarg de l'any. Mentre que durant els mesos de temporada baixa, de novembre a març, es pot apreciar com les rotacions en mantenen constants en tot el període, representant el 30% restant de les rotacions anuals.

L'aparcament té contractat un peatge d'accés 3,0A amb una potencia contractada de 200kW per a cada un els tres períodes de facturació (P1 | P2 | P3) i presenta un consum energètic mig anual de 398.686 kWh/any.

PATRÓ ANUAL D'ESTACIONAMENTS

Com s'ha indicat al capítol 3 un aparcament operat en regim de rotació presenta dos tipus de patrons, ben diferenciats, associats a la seva ocupació. Concretament un associat a la distribució horària de l'ocupació a l'aparcament i l'altre associat a la duració dels estacionaments. On el patró associat a l'ocupació horària de l'aparcament està vinculat essencialment a la seva ubicació i a l'activitat socioeconòmica del seu entorn. Mentre que la distribució dels períodes d'estacionament dependrà entre altres del nombre de places en rotació, les mesures dissuasives de l'estacionament de llarga durada implantades, i novament l'activitat econòmica o social que es desenvolupa en l'àrea d'influència de l'aparcament.

A partir de les dades d'entrades i sortides de vehicles de l'aparcament, es construeix un histograma dels períodes d'estacionament per a intervals d'estacionament de 10 minuts en un rang de [0, 2000] minuts, a fi d'acotar l'interval de l'histograma, **Figura 10**. En conseqüència, en la construcció de l'histograma dels estacionaments s'han emprat el 99,87% de les dades, o 1.137.335 d'un total de 1.138.825 estacionaments en el període analitzat.

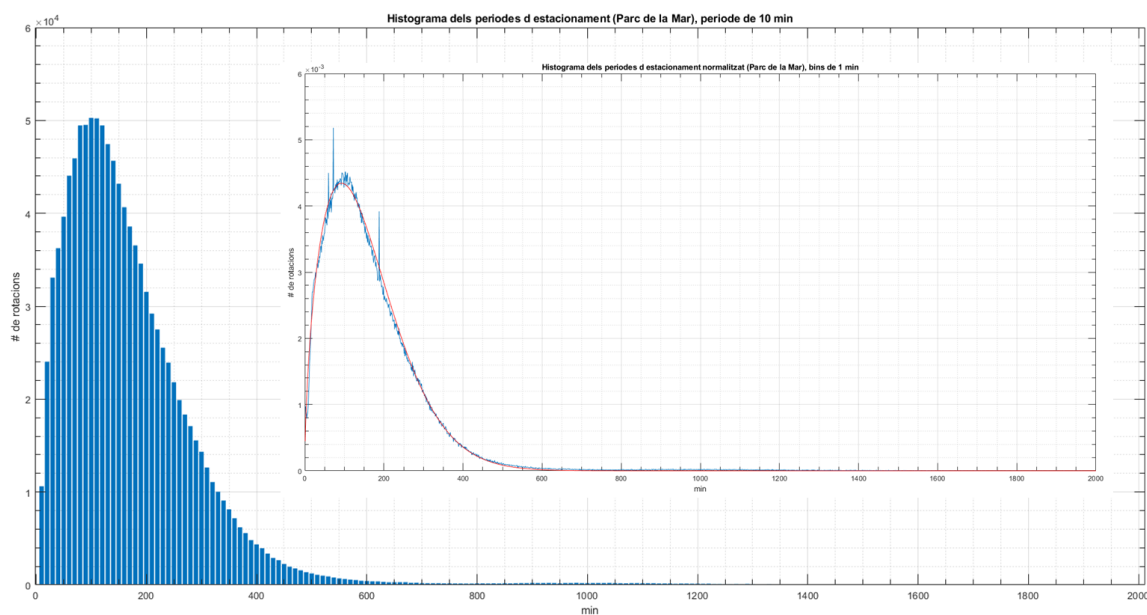


Figura 10. Histograma dels períodes d'estacionament de l'aparcament d'Antoni Maura, en el període 01/01/2016-31/12/2017

Si s'analitzen estadísticament els períodes d'estacionament emprats per a confeccionar l'histograma d'ocupacions de l'aparcament, emprant intervals de 10 minuts, s'han obtingut les mètriques de la distribució dels períodes d'estacionament que es presenten a la **Taula 24**.

Taula 24. Paràmetres estadístics de la distribució d'estacionaments, de l'aparcament d'Antoni Maura.

Moda / Repeticions	Mitja de la Mostra	Mitjana de la Mostra	Desviació estàndard mostral	Coefficient de variació
100 min (1,67h) / 50.272	170,65 min (2,84 h)	139 min (2,32 h)	170,14 min (2,84 h)	99,70 %

Com es pot apreciar a la **Figura 10** els períodes d'estacionament, en aquest aparcament, ressegueixen una distribució de Weibull, de la que n'extraurem la funció característica ajustant els paràmetres "k" i "λ" de la distribució; a partir de les dades experimentals dels períodes d'estacionament, normalitzats a la unitat, tot això mitjançant un algoritme de regressió no-lineal que s'ha implementat en una aplicació específica, codificada en MATLAB®. A la **Taula 25** es presenten els valors de la moda, mitja, mitjana, desviació estàndard de la distribució de Weibull ajustada als períodes de l'estacionament, i els paràmetres característics, "k" i "λ" d'aquesta distribució. A la vegada, en la mateixa taula es presenta el valors de la densitat probabilitat acumulada (CDF) per un període de 30 minuts, que es el temps d'estacionament gratuït que actualment ofereix als vehicles elèctrics en els seus aparcament per a fomentar la seva implantació. A fi de descriure també les característiques de l'aparcament, es presenten els valors de la inversa de la densitat de probabilitat acumulada (ICDF) per a intervals del 50%, 68%, 95% i 99.7% del períodes d'estacionament.

Taula 25. Paràmetres de la distribució de Weibull ajustada, de l'aparcament d'Antoni Maura.

Moda	Mitja	Mitjana	Desviació estàndard	λ	k	CDF per a 30 min
92,88 min (1,55 h)	156,65 min (2,61 h)	138,47 min (2,18 h)	86,26 min (1,44 h)	174,5436	1,5832	23,82 %
Percentatge d'aparcaments [%]				ICDF [minuts]		
50,0 %				138,47 min (2h18)		
68,0 %				189,54 min (3h09)		
95,0 %				349,05 min (5h49)		
99,7 %				530,34 min (8h50)		

DIAGRAMA D'OCUPACIÓ HORÀRIA MITJANA

El diagrama d'ocupació horària mitjana es confeccionà a partir de les dades obtingudes de les butlletes de facturació individual dels anys (2016-2017), període que s'ha cregut més ajustat a les condicions actuals, que detallen l'hora d'entrada i sortida de cada vehicle estacionat a l'aparcament.

Per a generar el diagrama d'ocupació, primerament, s'ha procedit a determinar el percentatge d'hores en que l'aparcament supera una ocupació màxima fixada, **Taula 26**, en el nostre cas s'ha fixat al 90% d'ocupació, és a dir, en que hi hagin 644 places o més ocupades.

Taula 26. Paràmetres de l'ocupació màxima de l'aparcament d'Antoni Maura.

Nº hores de l'aparcament analitzades	Nº hores amb l'aparcament complet	[%] hores amb l'aparcament complet	90% de les places en rotació, llinda d'ocupació màxima
17.544 h	736 h	4,1552 %	644

Seguidament s'ha procedit a integrar per a cada una de les hores del dia el nombre d'entrades, sortides i estacionaments que s'han donat al llarg, del conjunt de dies, del període analitzat, per a finalment normalitzar els valors obtinguts pel nombre de dies integrat; obtenint així el diagrama d'ocupació horària mitja, que es presenta en la **Figura 11**. El resultat obtingut mostren una forta vinculació a la ocupació horària mitja de l'aparcament, i que servirà com a base per a determinar l'evolució dels estacionaments dels vehicles elèctrics i el seu impacte sobre la demanda energètica de l'aparcament.

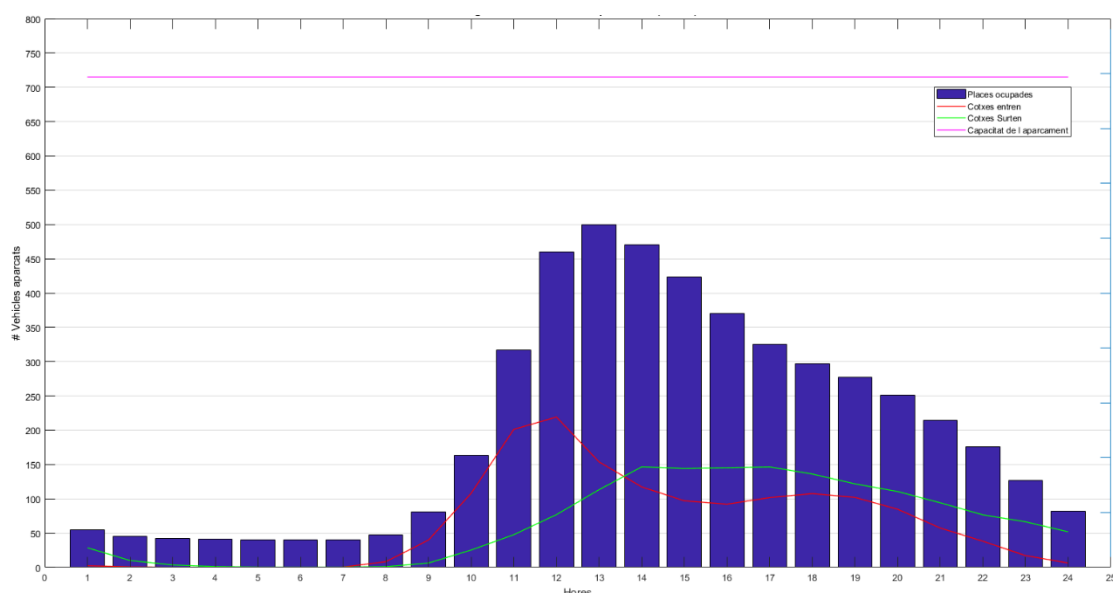


Figura 11. Diagrama d'ocupació horària mitja de l'aparcament d'Antoni Maura, pel període de 01/01/2016-01/01/2018.

A partir dels resultats obtinguts, a la **Figura 11**, es pot apreciar com el període horari on es concentra l'ús d'aquest aparcament es troba comprès entre les 09h i les 01h, amb un màxim d'ús en el període del migdia, entre les 12h i les 14h, amb valors mitjos d'ocupació superiors a 450 vehicles. Al llarg del període nocturn de les 2h a les 8h l'ocupació de l'aparcament roman pràcticament constant, presentant molt poques entrades i sortides de vehicles.

DEMANDA BASE HORÀRIA

L'aparcament d'Antoni Maura disposa d'una potència elèctrica contractada major a 15 kW, i te contractada una potència de 200kW amb un peatge d'accés 3.0A; destinada a clients que compren energia elèctrica en baixa tensió, subministrament trifàsica, amb tres períodes horaris de facturació:

període punta (P1) de les 18-22h, període pla (P2) de les 8-18h i de les 22-24h, i finalment el període vall (P3) de les 0- 8h.

A fi de determinar els consums mitjans horaris de l'aparcament ha consistit en comptabilitzar, a partir de les factures elèctriques mensuals aportades per l'SMAP, l'energia consumida per als diferents períodes de tarifació al llarg d'un any; obtenint el consum mig horari que s'ha fixat com a constant al llarg de cada un dels tres períodes de tarifació. Donat que no es disposava de mes informació i que els consums dels aparcaments són relativament estàtics. La corba de consum obtinguda per aquest aparcament es presenta a la **Figura 12**.

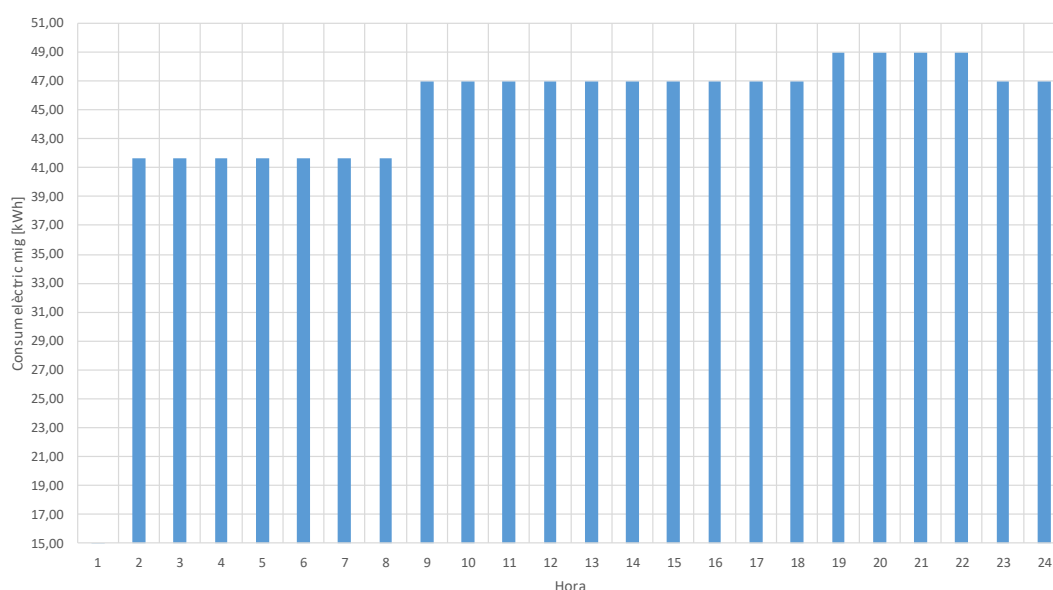


Figura 12. Corba base de consum elèctric mig horari, aparcament d'Antoni Maura

Com es pot apreciar a la **Figura 12**, l'aparcament presenta un consum mig en les hores de punta de 48,95kWh, mentre que en el període pla es de 46,97kWh i en el període vall es de 41,61kWh. A la vegada, el consum de l'aparcament es bastant constatat al llarg de les 24 hores del dia, augmentant tant sols un 15% entre les 9h i les 24h respecte al període nocturn de la 1h a les 8h.

PLANIFICACIÓ

Per a portar a terme la anàlisi econòmic i energètic vinculat al desplegament del VE a l'aparcament, es fonamental realitzar en primera instància la planificació dels punts/estacions de càrrega necessàries, a partir de la metodologia proposada. Amb aquesta finalitat, s'han obtingut el valors del nombre d'estacions de càrrega i places d'estacionament per a donar servei als percentils P_{99} i $P_{99,6}$ de demanda d'estacionament del VE pels nivells de penetració prèviament predits pels pròxims 5 anys (2021 - 2025).

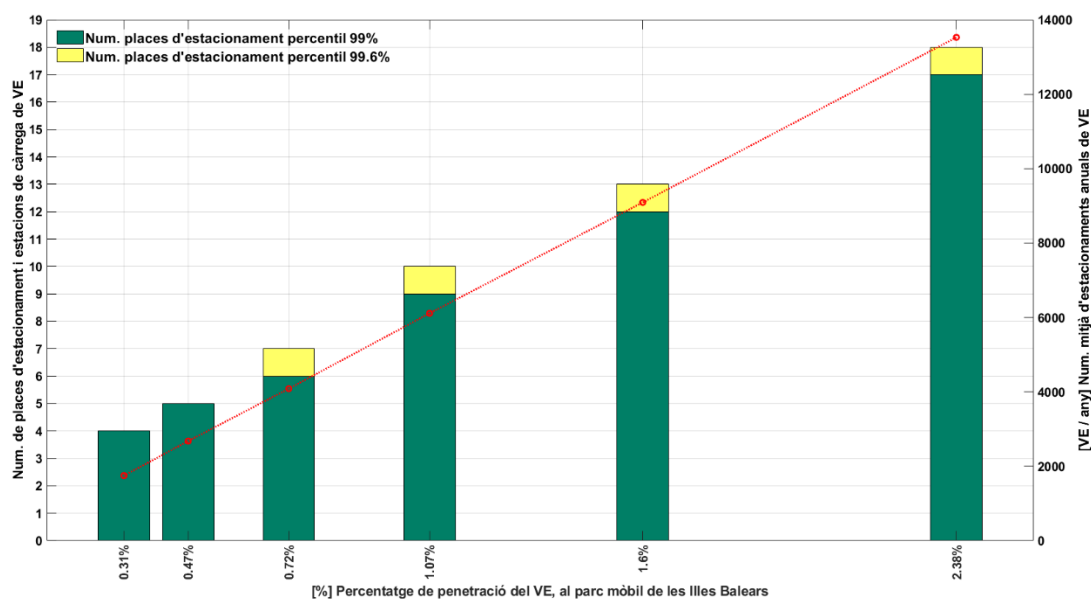


Figura 13. Previsió de l'evolució de les places d'estacionament i estacions de càrrega intel·ligents necessàries per a donar suport al VE. En verd, les places d'aparcament necessàries per cobrir el 99% dels intents d'estacionament PEV i en groc per cobrir el 99,6%.

En el cas de l'aparcament d'Antoni Maura, els resultats obtinguts que es mostren a la **Figura 13**, pels diferents percentils és una mica diferent però, al mateix temps, es pot veure com el nombre d'infraestructures de recàrrega (N_{infra_EV}) necessàries per a donar suport al el vehicle elèctric creix linealment amb el percentatge de penetració del vehicle elèctric (p_{EV}). Sient la relació que guarden ambdues variables per aquest aparcament, la que es mostra a continuació:

Equació 34: $N_{infra_EV} = 6,33 \cdot p_{EV} [\%] \mid R^2 = 0,995$

Un cop avaluats el requeriments d'infraestructures de recarrega per l'aparcament d'Antoni Maura, pels propers 5 anys, a la **Taula 27** es presenten els requeriments de noves places d'estacionament i punts de recàrrega intel·ligents (SAVE) que s'haurien d'instal·lar anualment.

Taula 27. Planificació del desplegament de noves places d'estacionament i estacions de càrrega intel·ligents pels propers 5 anys, aparcament d'Antoni Maura.

Any	Nº total de places d'estacionament EV	Nº total de punts de recarrega intel·ligent (SAVE)	Nº de noves places d'estacionament a instal·lar	Nº de nous punts de recarrega intel·ligent (SAVE)
2019 (referència)	5	5	0	0
2020	5	5	0	0
2021	5	5	0	0
2022	6	6	1	1
2023	9	9	3	3
2024	12	12	3	3
2025	17	17	5	5

ANÀLISIS ENERGÈTIC

A continuació, la metodologia proposada s'encarrega d'estimar el consum elèctric relacionat amb la càrrega dels VE en funció del nivell de penetració del VE, en per a intervals de minut a minut, que seguidament es combinarà amb la demanda base de l'aparcament. Aquestes demandes s'integraran en períodes horaris i quart-horaris per a determinar el consums elèctric als diferents períodes de facturació d'un peatge d'accés 3.0A, i que serviran per a posteriors anàlisis.

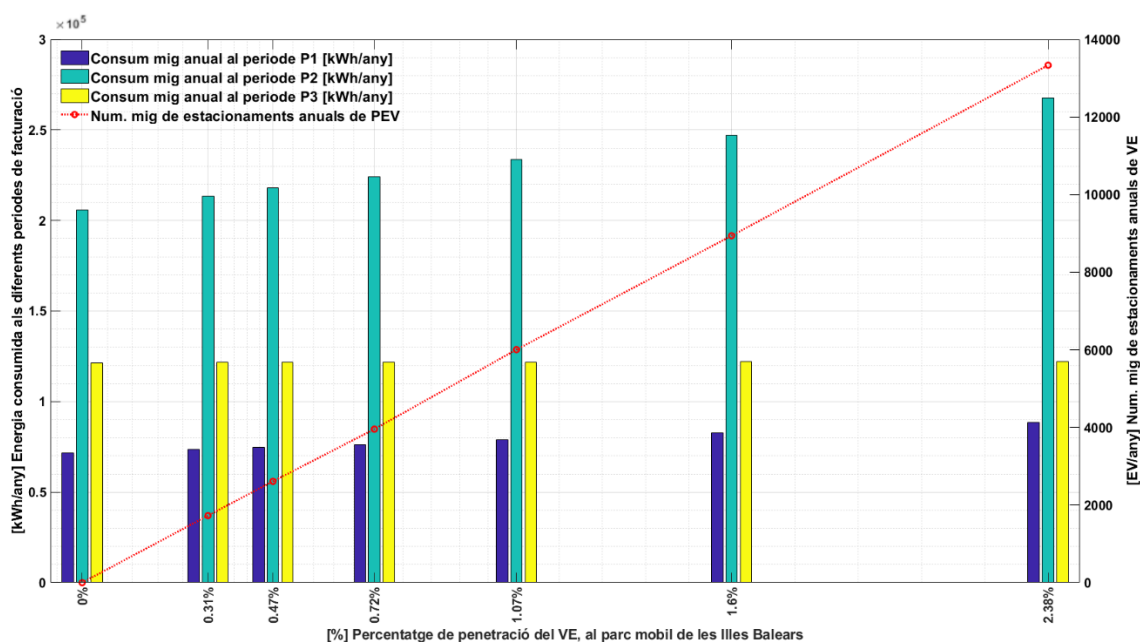


Figura 14. Evolució del consum energètic mig anual per període de facturació i per a diferents penetracions del VE a l'aparcament d'Antoni Maura.

A la vegada, si s'analitza l'increment de la demanda global ($p_1+p_2+p_3$) anual en funció de l'evolució del percentatge de penetració del vehicle elèctric p_{EV} , en la flota de turismes, pels propers 5 anys, **Figura 14**, s'aprecia com a aquest aparcament la demanda creixerà linealment amb la penetració del EV resseguint la següent expressió:

Equació 35: $\Delta Pot_{Global} = 26,053 \cdot p_{EV} [\%] \mid R^2 = 0,999$

Dels resultats presentats a la **Taula 28**, on es mostren les demandes energètiques de l'any de referència i la seva variació respecte a aquest, es desprèn que en tan sols 5 anys i amb una penetració de només el 2,38% de VE a la flota de les Illes Balears s'arribarà a assolir un augment de la demanda energètica del 20,01 %, respecte als valors actuals. Tot i així, es pot apreciar que la major part d'aquest augment es concentra en el període de facturació P2 (08-18h i 22-24h), coincidint amb les hores de major irradiació solar i, per tant, amb el pic de generació fotovoltaica.

Taula 28. Increment de la demanda energètica degut a la recàrrega de VE pels pròxims 5 anys.

Any	Penetració del PEV [%]	ΔP_{total} [%] respecte l'any de referència [kWh]	ΔP_1 [%] respecte l'any de referència [kWh]	ΔP_2 [%] respecte l'any de referència [kWh]	ΔP_3 [%] respecte l'any de referència [kWh]
2017 (referència)	0,00%	398.686	71.469	205.719	121.498
2020	0,31%	2,57	3,06	3,87	0,09
2021	0,47%	3,92	4,64	5,92	0,12
2022	0,72%	5,91	7,07	8,87	0,21
2023	1,07%	8,93	10,43	13,51	0,28
2024	1,60%	13,47	16,11	20,24	0,46
2025	2,38%	20,01	23,57	30,22	0,64

Seguidament, la metodologia proposada estima la demanda energètica incorporant els dos escenaris d'autoconsum PV pels diferents nivells de penetració del VE; obtenint així les demandes energètiques combinades pels diferents períodes facturació elèctrica (quart-horaris i horaris), i els seus respectius percentils P_{99} i pics de la demanda. Analitzant els resultats obtinguts a la **Taula 28** es pot apreciar com, donats els escenaris de penetració del VE pels propers 5 anys, la demanda màxima quarto horària en cap superarà els 200kW de la potència contractada a l'aparcament pels tres períodes. Aquest resultat és especialment rellevant a l'estar vinculada la demanda quarto-horària amb la potència que enregistra el màxímetre de la instal·lació (ubicat a l'interior del comptador elèctric de l'aparcament); que en el model de facturació espanyola [38] s'utilitza per a determinar el terme de potència de la instal·lació. En el supòsit que sigui superior al 105% de la potència contractada en el període, serà la que es farà servir per a confeccionar la factura elèctrica mensual.

Taula 29. Característiques tècniques dels panells fotovoltaics i els inversors

Característiques dels panells SunPower SPR-P17-330-COM de 330W			
Potència Nominal [W]	330	Inclinació	35°
Eficiència	16%	n - Índex de refracció del vidre	1,526
Coefficient de Temperatura [%/°C]	-0,37	Energia de bandgap [eV]	1,121
Superfície del panell [m²]	2,063	Dependència de la energia de bandgap amb la temperatura [1/°C]	-0.0002677
Característiques dels inversors Yaskawa Solectria Solar, model XGI 1500-166/166 [600V]			
V_{Ac} output [V]	600	P_{so} [W]	268,33
P_{DCo} [W]	167936,16	P_{ACo} [W]	165140
I_{DCmax} [A]	159,94	V_{DCmax} [V]	1250

Per a determinar la generació elèctrica dels dos escenaris de generació fotovoltaica proposats per aquest aparcament, els de 100 kWp i de 200 kWp, es proposa una tipologia de planta PV que farà servir panells SunPower SPR-P17-330-COM de 330W, connectats a inversors model Yaskawa Solectria

Solar, model XGI 1500-166/166 [600V]. A la **Taula 29** s'especifiquen les característiques tècniques de la instal·lació fotovoltaica proposada en els dos escenaris.

Taula 30. Evolució de la demanda energètica de l'aparcament per als diferents escenaris d'autoconsum fotovoltaic.

Any / Penetració del PEV [%]	2017 (ref)	2020 (0,31%)	2021 (0,47%)	2022 (0,72%)	2023 (1,07%)	2024 (1,60%)	2025 (2,38%)
Escenari 1: planta fotovoltaica 100 kWp							
ΔP_{total} [%] respecte l'any de referència	0	-32,66%	-31,87%	-30,62%	-28,64%	-25,57%	-20,58%
ΔP_1 [%] respecte l'any de referència	0	-1,26%	0,09%	2,61%	6,23%	11,61%	19,22%
ΔP_2 [%] respecte l'any de referència	0	-60,32%	-59,29%	-57,77%	-55,23%	-51,28%	-44,34%
ΔP_3 [%] respecte l'any de referència	0	-4,30%	-4,25%	-4,19%	-4,11%	-3,91%	-3,75%
Escenari 2: planta fotovoltaica 200 kWp							
ΔP_{total} [%] respecte l'any de referència	0	-38,08%	-37,55%	-36,74%	-35,52%	-33,66%	-30,97%
ΔP_1 [%] respecte l'any de referència	0	-4,53%	-2,96%	-0,65%	2,77%	8,03%	15,23%
ΔP_2 [%] respecte l'any de referència	0	-68,63%	-68,18%	-67,45%	-66,33%	-64,63%	-62,02%
ΔP_3 [%] respecte l'any de referència	0	-6,07%	-6,04%	-5,95%	-5,89%	-5,74%	-5,57%

El resultat de l'evolució de la demanda energètica de l'aparcament, **Taula 30**, mostren sota cap mena de dubte com la incorporació de generació PV en règim d'autoconsum té un efecte benèfic, reduint la demanda energètica global. Especialment en el període de facturació P2, on coincideixen la màxima aflluència de VE i, per tant, un augment de demanda energètica per part de l'aparcament amb les hores de màxima generació de la instal·lació PV. Com es pot apreciar, la instal·lació d'un parc fotovoltaic ens permetrà compensar de sobres l'augment de demanda energètica degut a la càrrega dels VE, generant excedents energètics en ambdós casos que s'injectaran a la xarxa. Es pot apreciar com a l'escenari 1 s'arriba a una reducció mitjana del 37,01% pels diferents nivells de penetració del VE analitzats, mentre que per l'escenari 2 aquesta reducció arriba a un 43,59%. La màxima reducció respecte a l'actual demanda es produirà en el cas de tenir la instal·lació proposada en l'escenari 2 amb una penetració del VE del 1,60%, on s'arribaria a reduir el consum energètic en un 50,81%. A la vegada en el període P2 es pot apreciar una clara reducció de la demanda energètica, en el període de facturació P1 (18-22h) la aportació solar aconseguiria reduir lleugerament l'augment de la demanda. Això es deu bàsicament a les poques hores de sol en aquest període, especialment en els mesos d'hivern.

ANÀLISIS ECONÒMIC

La determinació de la factura elèctrica mensual associada al desplegament d'infraestructures de càrrega de vehicles elèctrics per a diferents nivells de penetració de vehicles elèctrics, és la fase

preliminar per poder analitzar els augments dels costos energètics en comparació amb l'any de referència (2017), així com els estalvis derivats dels diferents escenaris de generació fotovoltaica proposats per aquest aparcament. Per abordar i desglossar posteriorment els costos associats al desplegament combinat de les infraestructures de càrrega i l'autoconsum PV, i així poder avaluar la viabilitat econòmica de la inversió a realitzar pel desplegament d'aquestes instal·lacions. Seguidament, a partir de la tarifa d'accés que té contractada l'aparcament, així com les demandes energètiques en els diferents períodes de facturació obtingudes a l'apartat anterior, la metodologia desenvolupada s'encarrega de calcular l'import mensual i anual de la facturació energètica (a partir de les facturacions mensuals).

Taula 31. Facturació energètica associada a la demanda energètica de l'aparcament per als diferents escenaris d'autoconsum PV a l'aparcament d'Antoni Maura.

Any / Penetració del PEV [%]	2017 (ref)	2020 (0,31%)	2021 (0,47%)	2022 (0,72%)	2023 (1,07%)	2024 (1,60%)	2025 (2,38%)
Sense PV							
Δ Terme d'energia [%]	40.615,09	2,80%	4,27%	6,43%	9,71%	14,65%	21,76%
Δ Terme de potència [%]	0	0	0	0	0	0	0
Import factura [€/any]	73.500,91	74.946,38	75.705,05	76.820,70	78.515,01	81.070,08	84.743,37
Δ Import factura anual [%]	0	1,97%	3,00%	4,52%	6,82%	10,30%	15,30%
Escenari 1: planta fotovoltaica de 100 kWp							
Δ Terme d'energia [%]	40.615,09	-37,72%	-36,62%	-34,94%	-32,32%	-28,44%	-22,35%
Δ Terme de potència [%]	0	0	0	0	0	0	0
Import factura [€/any]	73.500,91	54.185,29	54.736,30	55.593,59	56.926,32	58.901,05	62.019,02
Δ Import factura anual [%]	0	-26,28%	-25,53%	-24,36%	-22,55%	-19,86%	-15,62%
Import Excedents [€/any]	0	1.354,45	1.264,01	1.142,49	962,77	755,12	500,58
Importe Energia regalada [€/any]	0	0	0	0	0	0	0
Escenari 2: planta fotovoltaica de 200 kWp							
Δ Terme d'energia [%]	40.615,09	-58,47%	-57,54%	-56,18%	-54,08%	-50,97%	-46,50%
Δ Terme de potència [%]	0	0	0	0	0	0	0
Import factura [€/any]	73.500,91	44.222,44	44.683,58	45.365,50	46.412,00	47.976,46	50.204,51
Δ Import factura anual [%]	0	-39,83%	-39,21%	-38,28%	-36,86%	-34,74%	-31,70%
Import Excedents [€/any]	0	7.476,67	7.340,52	7.157,77	6.859,36	6.444,59	5.850,92
Importe Energia regalada [€/any]	0	0	0	0	0	0	0

L'anàlisi de l'evolució dels costos energètics associats a l'augment de la demanda d'energia a l'aparcament, parirà dels costos energètics de l'any de referència (2017), que inclouen bàsicament els costos d'explotació de l'aparcament com serien la il·luminació, la ventilació, etc. Per a seguidament analitzar com evolucionarien els costos energètics amb i sense la incorporació dels diferents escenaris de generació PV proposats. Els resultats obtinguts es presenten a la **Taula 31**, on els imports energètics es troben desglossats en euros [€] per a l'escenari sense aportació de PV; mentre que els

escenaris d'autoconsum PV es presenten de manera percentual, per a facilitar-ne l'anàlisi, respecte als costos energètics de l'any 2017, any de referència.

A la vegada els resultats presentats a la **Taula 31** mostren com la factura energètica augmenta fins i tot per a valors relativament baixos de la penetració del VE al parc de turismes de les Illes Balears, arribant a incrementar en un 15,30% en tan sols 5 anys. Els resultats mostren com la incorporació de la generació PV permetria disminuir dràsticament l'import de la factura energètica, amb una mitja d'un 29,17% d'estalvi en la factura elèctrica per l'escenari 1 i un 43,27% en el cas de l'escenari 2 respecte a l'escenari sense generació PV. Es pot afirmar que els augments dels costos energètics només estaran relacionats amb el terme energètic; mentre que el terme de potència es mantindrà constant; donat que potència demandada en els intervals quart-horaris no superarà mai la contractada i, per tant, el màxim la demanda elèctrica de la instal·lació no impactarà sobre el terme de potència dels diferents períodes de facturació, ja que la potència contractada es molt elevada respecte al seu consum actual.

Pel que fa a l'impacte de l'autoconsum PV sobre la facturació energètica es veu clarament una reducció significativa del terme d'energia de la facturació elèctrica pels dos escenaris d'autoconsum PV. Arribant per al escenari 2 una reducció del 58,47% del terme d'energia respecte a el de l'any de referència. Mentre que l'impacte sobre el terme de potència ha resultat ser nul pels percentatges de penetració del VE estimats pels pròxims 5 anys.

SEGON CAS D'ESTUDI: L'APARCAMENT DE COMTE D'EMPÚRIES

L'aparcament de Comte d'Empúries es troba situat a les coordenades (39°34'38,9"N | 2°39'16,3"E), al centre de Palma i es troba orientat al nord-oest. Aquest aparcament disposa de 83 places d'estacionament explotades en règim de rotació, de dilluns a dissabte, i amb un horari d'apertura de les 7h a les 22h. En aquests moments l'aparcament disposa d'un punt o estació de càrrega de VE. L'aparcament disposa un peatge d'accés 3.0A amb una potencia contractada de 15 kW pels tres períodes de facturació i presenta un consum mig anual de 8.022 kWh. Tot això el fa idoni per a abordar l'anàlisi de l'impacte energètic i econòmic que comportaria la incorporació d'un autoconsum fotovoltaic, en la modalitat de "excedents aollits a compensació", emmarcat dins l'estratègia de desplegament d'infraestructures de càrrega i estacionament per al VE que està impulsant el sector públic.

Concretament, per aquest aparcament s'analitzaran dos escenaris d'autoconsum fotovoltaic tenint en compte l'evolució anual dels nivells de penetració del VE per als propers 5 anys i les infraestructures de càrrega que es preveuen instal·lar. Ja que la seva evolució hauria impactar significativament sobre el terme de potència de la factura energètica també en aquest cas.

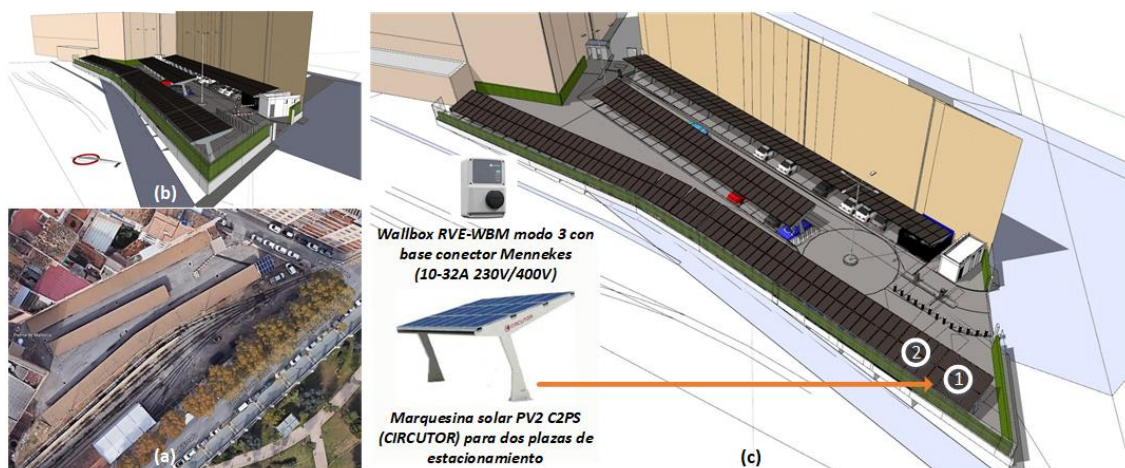


Figura 15. Aparcament de Comte d'Empúries. a: Ubicació de l'aparcament. b: Orientació de l'aparcament. c: Descripció i ubicació de les marquesines solars.

DADES DE PARTIDA

Novament, amb objecte d'obtenir unes dades precises sobre els moviments dels vehicles a l'aparcament estudiat, es parteix de les dades de les butlletes de facturació individual proporcionats per l'SMAP, referents al període 2016-2017, presentant una mitja de 32.827 rotacions anuals.

Taula 32. Rotacions de vehicles a l'aparcament de Comte d'Empúries. Font: SMAP

	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
2016	2.543	2.404	2.459	2.830	2.697	2.775	2.734	2.433	2.763	2.707	2.675	2.930
2017	2.662	2.487	2.743	2.555	2.870	2.917	2.817	2.428	3.111	3.163	3.058	2.893

Com es pot apreciar a l'analitzar les dades de rotacions presentades, **Taula 32**, a diferència del primer cas presentat, aquest aparcament no presenta una estacionalitat clara, ja que la distribució de les rotacions es manté pràcticament constant amb una petita disminució al llarg del mes d'Agost. Com ja s'ha indicat anteriorment, l'aparcament té contractada un tarifa d'accés 3.0A amb una potencia de 15kW per a cada un els tres períodes de facturació (P₁ | P₂ | P₃) i presenta un consum energètic mig anual de 8.022 kWh/any.

PATRO ANUAL D'ESTACIONAMENTS

A partir de les dades d'entrades i sortides de vehicles de l'aparcament, al llarg dels anys 2016 i 2017, s'ha construït un histograma, que es mostra a la **Figura 16**, a partir dels períodes d'estacionament per a intervals de 10 minuts en un rang de [0, 2000] minuts. D'aquesta manera, s'ha tingut en compte en la construcció de l'histograma el 99,87% de les estacionaments, o 151.042 estacionaments d'un total de 151.246 estacionaments en el període complet analitzat.

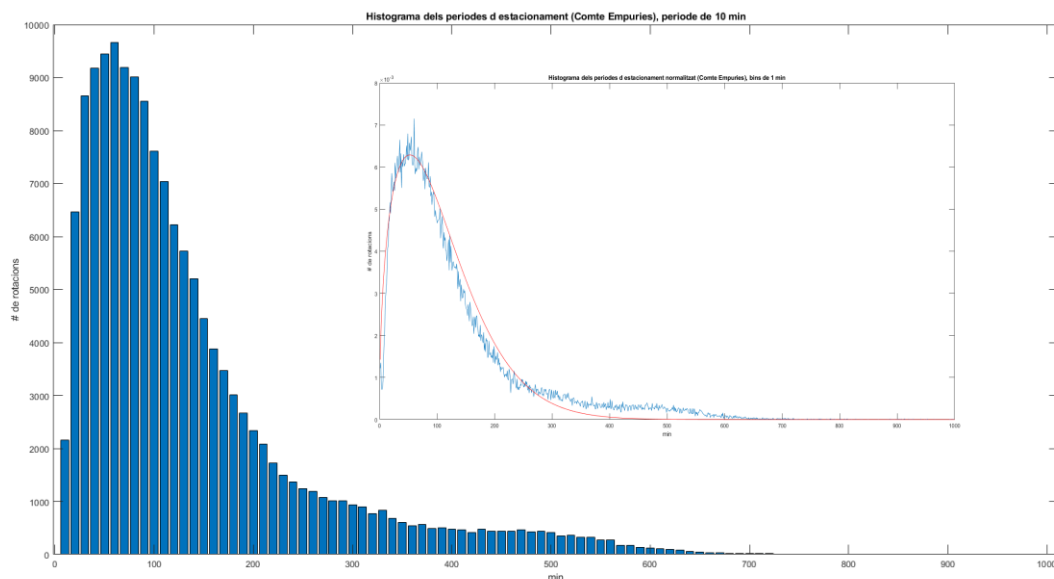


Figura 16. Histograma dels períodes d'estacionament de l'aparcament d'Antoni Maura, en el període 01/01/2016-31/12/2017

Si s'analitzen estadísticament els períodes d'estacionament emprats per a confeccionar l'histograma d'ocupacions de l'aparcament, amb intervals de 10 minuts, s'han obtingut les següents mètriques de la distribució dels períodes d'estacionament, que es presenten de forma resumida a la **Taula 33**.

Taula 33. Paràmetres estadístics de la distribució d'estacionaments, de l'aparcament de Comte d'Empúries.

Moda / Repeticions	Mitja de la Mostra	Mitjana de la Mostra	Desviació estàndard mostral	Coefficient de variació
60 min (1h) / 9.665	134,31 min (2,24 h)	95 min (1,58 h)	185,82 min (3,097 h)	138,35 %

Com es pot apreciar, en aquest cas cas la distribució dels períodes d'estacionament també ressegueix una distribució de Weibull, encara que amb diferències més significatives que en el cas de l'aparcament d'Antoni Maura degut al menor nombre de vehicles que estacionen a l'aparcament. D'aquest histograma se n'extraurà la funció característica ajustant els paràmetres "k" i "λ" de la distribució de Weibull sobre les dades experimentals dels períodes d'estacionament, mitjançant un algoritme de regressió no-lineal implementat en MATLAB®, que s'aplicarà sobre les dades experimentals dels períodes d'estacionament proveïdes per la SMAP.

A la **Taula 34** es presenten els valors de la moda, mitja, mitjana, desviació estàndard de la distribució de Weibull ajustada als períodes de l'estacionament, i dels ses paràmetres característics, "k" i "λ". A la vegada, en la mateixa taula es presenta el valors de la densitat probabilitat acumulada (CDF) per un període de 30 minuts, que es el temps d'estacionament gratuït que actualment ofereix als vehicles elèctrics en els seus aparcament per a fomentar la seva implantació. A fi de descriure també les

característiques de l'aparcament, es presenten els valors de la inversa de la densitat de probabilitat acumulada (ICDF) per a intervals del 50%, 68%, 95% i 99,7% del períodes d'estacionament.

Taula 34. Paràmetres de la distribució de Weibull ajustada, de l'aparcament situat a Comte d'Empúries.

Moda	Mitja	Mitjana	Desviació estàndard	λ	k	CDF per a 30 min
52,73 min (0,88 h)	106,61 min (1,78 h)	91,39 min (1,52 h)	66,22 min (1,10 h)	117,6139	1,4529	23,42 %

Percentatge d'aparcaments [%]

50,0 %

68,0 %

95,0 %

99,7 %

ICDF [minuts]

91,39 min (1h31)

128,67 min (2h09)

250,28 min (4h10)

394,80 min (6h35)

DIAGRAMA D'OCUPACIÓ HORÀRIA MITJANA

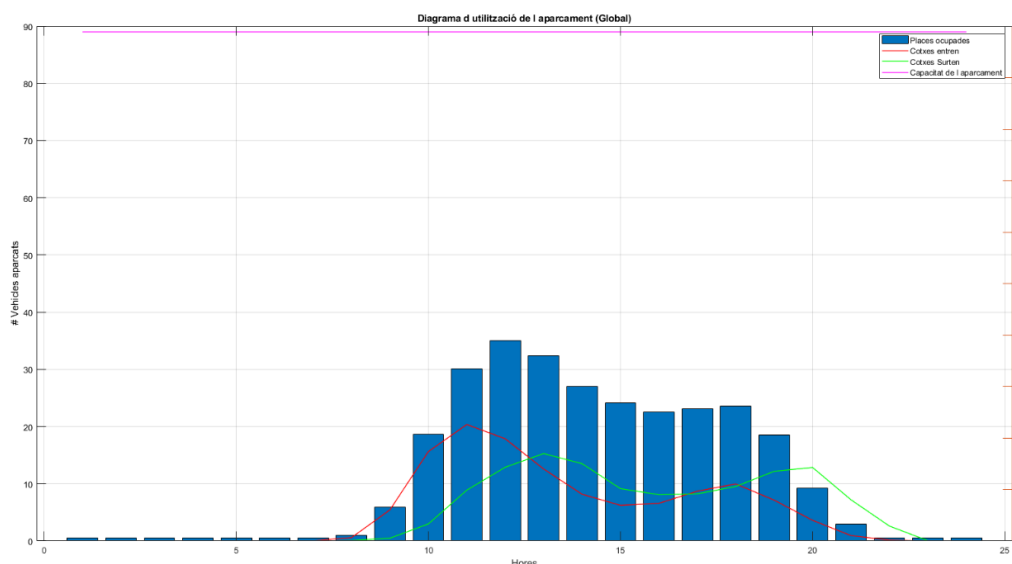


Figura 17. Diagrama d'ocupació horària mitja de l'aparcament d'Antoni Maura, pel període de 01/01/2016-01/01/2017.

Novament, per obtenir el diagrama d'ocupació horària mitja, s'ha procedit a integrar per a cada hora del dia el nombre d'entrades, sortides i estacionaments que s'han donat al llarg del conjunt de dies del període analitzat. Per a seguidament normalitzar els valors obtinguts pel nombre de dies integrat; obtenint així el diagrama d'ocupació horària mitja, que es presenta en la següent **Figura 17**.

Al mateix temps, s'ha determinat el percentatge d'hores en que l'aparcament supera una ocupació màxima fixada, en aquest cas el 90% d'ocupació, és a dir, en que hi ha 80 places o més ocupades, els resultats es mostren a la **Taula 35**.

Taula 35. Paràmetres de l'ocupació màxima de l'aparcament de Comte d'Empúries.

Nº hores de l'aparcament analitzades	Nº hores amb l'aparcament complet	[%] hores amb l'aparcament complet	90% de les places en rotació, llinda d'ocupació màxima
26.280 h	141 h	0.5366 %	80

Aquesta informació està vinculada a la ocupació horària mitja de l'aparcament i servirà de base per a determinar l'evolució dels estacionaments de vehicles elèctrics i el seu impacte sobre la demanda energètica dels estacionaments.

DEMANDA BASE HORÀRIA

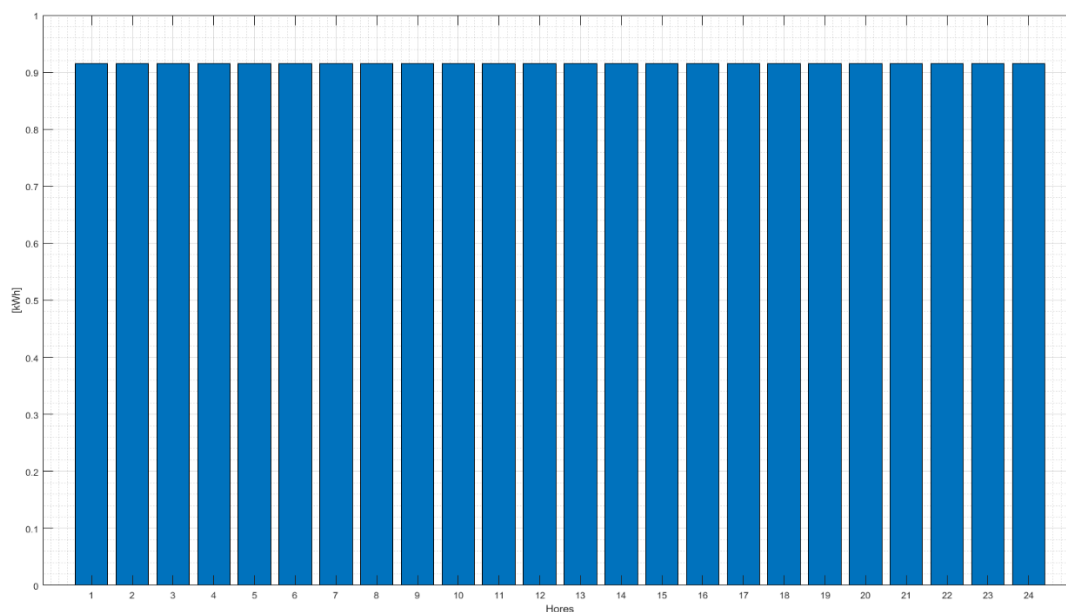


Figura 18. Corba base de consum elèctric mig horari, aparcament de Comte d'Empúries.

L'aparcament de Comte d'Empúries disposa d'un subministrament trifàsic en baixa tensió, i té contractada una tarifa d'accés 3.0A y una potencia contractada pels tres períodes de facturació de 15 kW. El peatge d'accés 3.0A es caracteritza per incorporar una discriminació horària en tres períodes ben diferenciats: període punta de les 18-22h, període pla de les 8-18h i de les 22-24h, i finalment el període vall de les 0- 8h. Novament, a partir de les factures elèctriques aportades per l'SMAP es comptabilitza l'energia consumida pels diferents períodes de tarifació al llarg d'un any amb l'objectiu d'obtenir la corba base mitja horària de consum, fixant-la com a constant al llarg de cada un dels tres períodes de tarifació. La corba de consum obtinguda per aquest aparcament es presenta a la **Figura 18**, on es pot apreciar com el consum es manté pràcticament constant al llarg dels tres períodes de facturació.

PLANIFICACIÓ

A l'igual que en l'aparcament anterior caldrà partir de la planificació de les infraestructures de càrrega de vehicles elèctrics pels pròxims 5 anys. Concretament, la planificació de les infraestructures de càrrega dels vehicles elèctrics s'ha dissenyat per a donar suport als percentils P_{99} i $P_{99,6}$ dels estacionaments de VE que es determinaran a partir dels nivells de penetració VE predits pels propers 5 anys. Els resultats presentats a la Figura 19 mostren com tant si pretenem cobrir el percentil P_{99} com pel $P_{99,6}$ del nombre d'estacionaments de VE, en els pròxims 5 anys, es requeriran, tant sols, de 2 places d'estacionament i estacions de càrrega de VE; tot per poder donar servei a l'increment de demanda prevista.

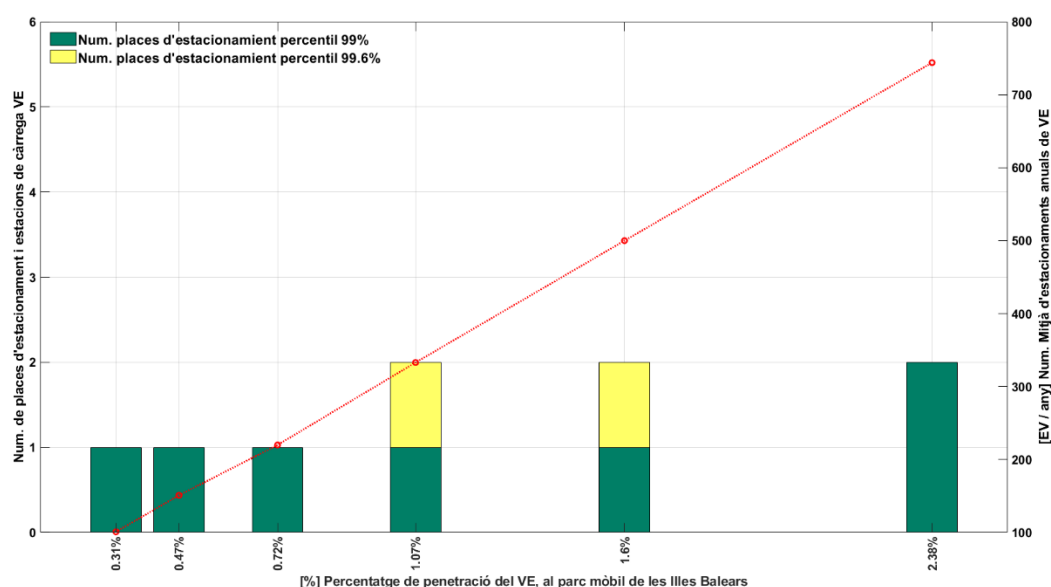


Figura 19. Planificació de les places i estacions de càrrega de VE requerides els pròxims 5 anys, de l'aparcament Comte d'Empúries.

Com es pot apreciar a la **Figura 19**, la planificació del desplegament de estacions de càrrega en el període dels pròxims 5 anys, mostra una evolució una mica diferent del desplegament pels diferents percentils, però majoritàriament coincideixen degut al baix nombre d'estacionaments que presenta aquest aparcament. Al mateix temps, es pot apreciar com el nombre d'infraestructures de recàrrega (N_{infra_EV}) necessàries per a donar suport al vehicle elèctric creix linealment amb el percentatge de penetració del vehicle elèctric (p_{EV}). Sent la relació que guarden ambdues per aquest aparcament, la que es mostra a continuació:

Equació 36:
$$N_{infra_EV} = 0,59 \cdot p_{EV} [\%] \mid R^2 = 0,995$$

ANÀLISIS ENERGÈTIC

Una vegada obtinguda la previsió d'estacions de càrrega i places d'estacionament per a VE necessàries pels propers 5 anys, a l'aparcament estudiat, la metodologia procedeix a estimar la demanda energètica base de l'aparcament combinada amb la que provindrà de la càrrega dels EV en funció d'un nivell de penetració anualment establert, en intervals de minut a minut.

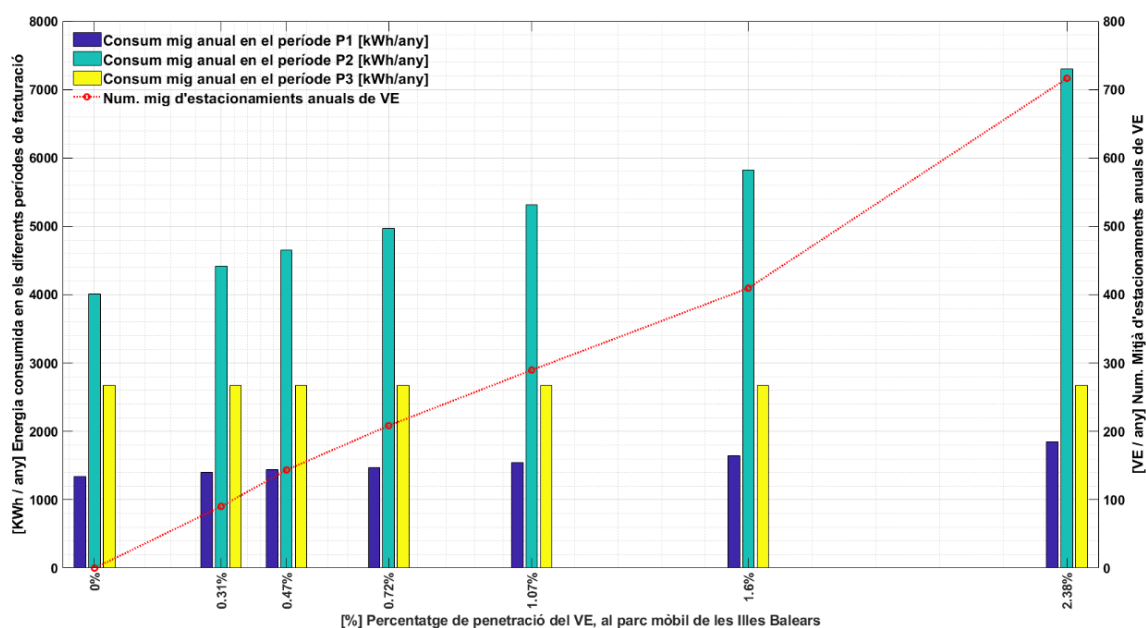


Figura 20. Evolució del consum energètic mig anual per període de facturació i per a diferents penetracions del VE, a l'aparcament de Comte d'Empúries.

Els resultats obtinguts s'integren posteriorment en períodes horaris i quart-horaris que serviran de referència per a posteriors anàlisis. Concretament, aquestes dades s'empraran per a avaluar l'increment de demanda energètica anual pels diferents períodes de facturació en funció de la penetració del vehicle elèctric, tal com es mostra a la **Figura 20**. Si analitzem els resultats obtinguts, presentats a la **Taula 37**, es pot apreciar com la demanda energètica total (P1+P2+P3) de l'aparcament es veurà incrementada en un 47,16%, en tan sols 5 anys, mentre que la demanda energètica del període P1 (18-22h) es veurà incrementat en un 40,58%, la del període P2 (8-18h i 22-24h) un 80,66% i la del període P3 (00-08h) es mantindrà essencialment inalterada. Els resultats obtinguts pel període P3 es deuen a que l'aparcament es manté tancat entre les 22h i les 07h, mentre que el major increment de demanda es donarà al llarg del període P2, el que podria implicar que es requereix d'una modificació de la potència contractada per l'aparcament.

A continuació, la metodologia proposada estimarà la demanda energètica pels diferents percentatges de penetració del VE establerts incorporant l'autoconsum fotovoltaic. Així s'obtidran les demandes combinades per a cada període de facturació, tan horàries com quart-horàries, així com

els seus respectius percentils $P_{99,6}$ i pics de demanda. Aquest resultats es presenten de forma detallada a la **Taula 36**.

Taula 36. Demanda energètica pels diferents escenaris d'autoconsum PV, a l'aparcament de Compte d'Empúries.

Sense PV/ Penetració del VE	(2017) 0%	(2020) 0,31%	(2021) 0,47%	(2022) 0,72%	(2023) 1,07%	(2024) 1,60%	(2025) 2,38%
Num. Places / Estacions càrrega	0/0	1/1	1/1	1/1	1/1	2/2	2/2
Dem. Anual P₁ [kWh]	1.337	4,50%	6,57%	10,83%	17,16%	26,29%	40,98%
Dem. Anual P₂ [kWh]	4.011	10,53%	15,18%	23,41%	32,38%	56,59%	80,66%
Dem. Anual P₃ [kWh]	2.674	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Dem. Anual Total [kWh]	8.022	6,01%	8,68%	13,51%	19,05%	32,68%	47,16%
P₉₉ Dem. Quart-horària [kWh]	0	2,05	4,60	5,26	7,52	7,52	10,13
Pic Dem. Quart-horària [kWh]	0	5,79	7,52	8,28	8,28	10,68	14,39
P₉₉ Dem. Horària [kWh]	0	2,97	4,17	4,64	5,65	6,67	8,28
[Escenari 1]: 1 x Marquesina PV2-2 –(4,05 kWp)							
Dem. Anual P₁ [kWh]	1.337	3,53%	5,61%	9,86%	16,19%	25,30%	39,98%
Dem. Anual P₂ [kWh]	4.011	-37,82%	-33,73%	-26,53%	-18,56%	3,04%	24,53%
Dem. Anual P₃ [kWh]	2.674	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Dem. Anual Total [kWh]	8.022	-18,40%	-16,02%	-11,71%	-6,67%	5,65%	18,84%
P₉₉ Dem. Quart-horària [kWh]	0	1,80	3,83	4,60	5,77	7,52	9,08
Pic Dem. Quart-horària [kWh]	0	4,60	6,72	7,52	8,28	11,46	13,55
P₉₉ Dem. Horària [kWh]	0	2,33	3,38	4,13	4,89	6,64	7,65
[Escenari 2]: 2 x Marquesines PV2-2 –(8,10 kWp)							
Dem. Anual P₁ [kWh]	1.337	2,69%	6,26%	11,05%	15,05%	25,79%	35,73%
Dem. Anual P₂ [kWh]	4.011	-43,88%	-39,00%	-33,73%	-26,89%	9,05%	8,75%
Dem. Anual P₃ [kWh]	2.674	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Dem. Anual Total [kWh]	8.022	-21,58%	-18,54%	-15,11%	-11,02%	-0,31%	-10,24%
P₉₉ Dem. Quart-horària [kWh]	0	0,94	2,70	4,17	4,91	6,76	8,28
Pic Dem. Quart-horària [kWh]	0	4,59	5,73	7,51	8,10	9,38	12,44
P₉₉ Dem. Horària [kWh]	0	1,81	2,89	3,74	4,59	5,28	7,41

Concretament, els dos escenaris proposats de generació fotovoltaica consistiran en la instal·lació d'una o dues marquesines fotovoltaiques, model PV2 del fabricant *Circutor*. Les principals especificacions tècniques, d'aquest model, es presenten a la **Taula 37**, i s'instal·laran a les zones amb major irradiància solar de l'aparcament, tal com es mostra a la **Figura 15c**.

Taula 37. Paràmetres associats als dos escenaris d'autoconsum PV, a l'aparcament de Compte d'Empúries.

Escenari	Núm. Mòduls PV (270 W _p)	[kW _p] Potència PV	Núm. Inversors x [kW] P _{Nominal}	Núm. Places / Núm. Estacions de càrrega mode 3
1: 1 x Marquesina PV2-2	15	4,05	1 x 3,70	2 / 1
2: 2 x Marquesina PV2-2	30	8,10	1 x 7	4 / 2

Els valors presentats a la **Taula 36** mostren, sense cap mena de dubte, com la incorporació de la generació fotovoltaica en règim d'autoconsum té un efecte beneficiós, donat que redueix significativament el terme d'energia de la demanda energètica del conjunt de l'aparcament. Arribant

a una reducció de la demanda mitja d'un 25,47% pels diferents nivells de penetració del VE a l'escenari 1, mentre que a l'escenari 2 aquesta reducció s'incrementa fins a un 28,65%. Concretament la reducció màxima la demanda es dona a l'escenari 2 amb una disminució del 36,54% de la demanda anual i una penetració del VE de l'1,60%; per tant, aquesta reducció es dona amb una baixa penetració del VE.

ANÀLISIS ECONÒMIC

Una vegada determinat l'impacte energètic vinculat a la càrrega dels vehicles elèctrics, incloent l'aportació de la instal·lació fotovoltaica, es procedeix a determinar el cost de la factura elèctrica mensual que portarà associat el desplegament de les infraestructures de càrrega del VE, en mode 3, pels diferents nivells de penetració del VE.

La fase prèvia per a estimar els estalvis associats als dos escenaris d'autogeneració PV contemplats en el present treball. Per a posteriorment avaluar la viabilitat econòmica de la inversió a realitzar pel desplegament combinat de les infraestructures de càrrega i l'autoconsum fotovoltaic. A partir de la informació vinculada amb tarifa d'accessos que té contractada l'aparcament i les demandes energètiques obtingudes en la secció anterior s'ha procedit, mitjançant el submòdul de facturació, a determinar l'import anual de l'energia elèctrica consumida per l'aparcament (agregant les facturacions mensuals de l'aparcament). Per tal de facilitar l'anàlisi posterior dels costos energètics avaluats pels diferents nivells de penetració del VE i que es mostren a la **Taula 38**, s'ha optat per presentar els imports energètics desglossats en euros [€] per a l'escenari sense aportació de PV; mentre que els escenaris d'autoconsum PV es presenten de forma percentual al respecte dels costos energètics de l'any 2017, que s'ha pres com a any de referència.

Els resultats obtinguts, **Taula 38**, mostren com inclús petites penetracions del vehicle elèctric al parc de turismes implicaran augments significatius en l'import de la factura energètica. En tan sols cinc anys, a l'any 2023, la factura energètica de l'aparcament es veurà incrementada en un 34,39% amb tant sols un 2,38% de penetració del VE.

Concretament, l'escenari 1 d'autoconsum fotovoltaic s'aconsegueix de mitjana un estalvi de la factura energètica per als diferents nivells de penetració del VE del 13,52%, mentre que per a l'escenari 2 l'estalvi augmenta fins al 20,64%. A la vegada s'aprecia com l'increment del cost dels termes d'energia i potència ressegueixen la mateixa tendència de creixement a mesura que augmenta la penetració del VE. Això es deu al fet que el terme de potència de la factura energètica creix al superar la demanda quart-horària la potència contractada per als diferents períodes, que estadísticament és més probable que es doni a l'augmentar el nombre de mitjà de càrregues / estacionaments de vehicles elèctrics.

Taula 38. Facturació energètica associada a la demanda energètica de l'aparcament per als diferents escenaris d'autoconsum PV, a l'aparcament de Comte d'Empúries.

<i>Sense aportació PV/ Penetració del VE</i>	(2017) Ref.	(2020) 0,31%	(2021) 0,47%	(2022) 0,72%	(2023) 1,07%	(2024) 1,60%	(2025) 2,38%
<i>Δ Terme d'energia [%]</i>	855,99€	6,54%	9,56%	14,57%	21,42%	36,39%	51,48%
<i>Δ Terme de potència [%]</i>	1.258,52€	3,56%	6,75%	9,00%	12,54%	23,26%	33,33%
<i>Import factura [€/any]</i>	3.191,18	3.319,50	3.403,28	3.493,88	3.625,19	3.959,71	4.285,27
<i>Δ Import factura anual [%]</i>	0	4,02%	6,65%	9,49%	13,60%	24,08%	34,28%
[Escenari 1]: 1 x Marquesina PV2-2 → (4,05 kWp)							
<i>Δ Terme d'energia [%]</i>	855,99€	-29,62%	-26,88%	-22,12%	-15,73%	-1,74%	12,48%
<i>Δ Terme de potència [%]</i>	1.258,52€	2,50%	4,48%	6,85%	9,70%	19,88%	30,10%
<i>Import factura [€/any]</i>	3.191,18	2.919,48	2.980,91	3.070,52	3.185,40	3.500,04	3.817,83
<i>Δ Import factura [%]</i>	0	-8,51%	-6,59%	-3,78%	-0,18%	9,68%	19,63%
<i>Import Excedents [€/any]</i>	0	86,57	85,31	84,14	81,99	77,44	73,36
<i>Import Energia regalada [€/any]</i>	0	0	0	0	0	0	0
[Escenari 2]: 2 x Marquesines PV2-2 → (8,10 kWp)							
<i>Δ Terme d'energia [%]</i>	855,99€	-50,60%	-46,93%	-42,82%	-37,72%	-24,91%	-12,22%
<i>Δ Terme de potència [%]</i>	1.258,52€	1,44%	4,58%	6,05%	7,01%	17,93%	27,05%
<i>Import factura [€/any]</i>	3.191,18	2.692,71	2.782,37	2.850,44	2.920,48	3.233,50	3.516,39
<i>Δ Import factura [%]</i>	0	-15,62%	-12,81%	-10,68%	-8,48%	1,33%	10,19%
<i>Import Excedents [€/any]</i>	0	236,25	233,31	230,29	224,80	215,10	204,87
<i>Import Energia regalada [€/any]</i>	0	0	0	0	0	0	0

CONCLUSIONS

En aquest treball s'ha desenvolupat i presentat tota una metodologia per a planificar el desplegament de les infraestructures d'aparcament i estacions intel·ligents de càrrega necessàries per a permetre el desplegament del vehicle elèctric, i alhora predir els impactes tan energètics com econòmics que implicarà l'increment de la penetració del VE sobre els aparcaments que ofereixin el servei de càrrega. Tot i que, l'eina numèrica, basada sobre la metodologia proposada, s'hagi previst per a estudiar els efectes que tindria l'electrificació del transport privat a les Illes Balears, es podria extrapolar a qualsevol aparcament en règim de rotació del que es disposés de dades històriques horàries de rotació, donat que, la metodologia proposada pren com a dades de partida, tant sols, les butlletes de facturació individuals de les pròpies instal·lacions i l'històric de les factures elèctriques mensuals.

Els resultats obtinguts han mostrat, per ambdós aparcaments públics estudiats, com amb uns nivells de penetració relativament baixos (0,31-2,38%) del vehicle elèctric, l'impacte en l'increment de demanda energètica és significatiu, arribant a assolir augments de fins el 47,16% en la demanda energètica en el cas de l'aparcament de Comte d'Empúries i del 20,01% a l'aparcament d'Antoni Maura. Així i tot, s'ha de remarcar que en ambdós casos la demanda energètica es concentra en els dos períodes diürns (P1 i P2), mentre que al llarg del període nocturn (P3) l'increment de demanda energètica és mínim. Per aquest fet, la incorporació de generació renovable mitjançant una instal·lació fotovoltaica pot permetre reduir notablement l'impacte energètic associat al desplegament del VE, i ajudar a descongestionar la xarxa elèctrica. Els resultats obtinguts mostren clarament que la incorporació de fonts d'energies renovables es possible i indispensable per tal de poder acometre el desplegament del VE i reduint-ne l'impacte energètic que tindrà sobre el sistema de distribució elèctric per a nivells majors de penetració com els proposats per la IEA [39]. On l'EIA estableix que per aconseguir els objectius de l'escenari augment de la temperatura mitja del planeta no superior els 2°C, seria necessari substituir el 10% dels vehicles lleugers de passatgers, basats en motors de combustió interna, per a vehicles elèctrics abans de l'any 2030.

A la vegada l'anàlisi de l'impacte econòmic de la penetració del VE ha mostrat com nivells de penetració del VE relativament petits porten associats increments molt significatius dels costos energètics, vinculats tant al terme de potència com al terme d'energia de la factura. On una penetració del vehicle electric a les Illes Balears de tant sols el 2,38%, comportarà un increment del 15,30% en la factura energètica de l'aparcament d'Antoni Maura i un 34,28% a l'aparcament de Comte d'Empúries. Aquesta diferència en l'increment de la factura elèctrica es deu essencialment a que l'aparcament d'Antoni Maura no hi haurà cap increment en el terme de potència, degut essencialment a que la potència contractada actualment es sobredimensionada. Davant aquesta situació, l'autoconsum PV resulta ser un mecanisme efectiu per mitigar l'increment del cost de la factura energètica, impactant sobretot sobre el terme d'energia, al menys pels nivells de penetració del VE analitzats en aquest treball.

A la vegada, els resultats del desplegament de la generació fotovoltaica en règim d'autoconsum obtinguts per l'aparcament d'Antoni Maura, els dos escenaris fotovoltaics proposats representen un clar estalvi tant des del punt de vista energètic com econòmic. En el cas de l'escenari 1 (100 kWp), s'ha aconseguit una reducció del consum electric de fins al 40,54% (2,38% de penetració el VE) que s'ha traduït en una reducció del 30,89% en la factura elèctrica. Mentre que per l'escenari 2 (200 kWp) la reducció en la demanda elèctrica s'ha vist reduïda en un 50,81% (2,38% de penetració el VE), el que s'ha traduït en una reducció de la factura elèctrica del 46,86%. Les reduccions, tan significants, en la factura elèctrica s'han aconseguit degut a que als aparcaments analitzats coincideix la màxima demanda associada a càrrega dels VE amb el màxim de la generació fotovoltaica; efent que en l'escenari 2 de generació PV, només un 2,61% de l'energia generada s'hagi venut a la xarxa.

En quan als resultats obtinguts per l'aparcament de Comte d'Empúries, en el primer escenari d'autoconsum PV proposat (4,05 kWp), representa una reducció del 28,32% de la demanda energètica anual respecte a l'escenari sense generació PV en tan sols 5 anys. En el cas proposat per l'escenari 2 (8,10 kWp), la reducció de la demanda energètica és del 36,54%. Pel que fa a l'impacte de l'autoconsum PV sobre la facturació energètica, es pot apreciar una dràstica reducció del terme d'energia de la factura elèctrica, per ambdós escenaris d'autoconsum PV; arribant una reducció del 50% del terme d'energia respecte a l'any de referència per l'escenari 2. Mentre que l'impacte sobre el terme de potència és pràcticament imperceptible per a nivells inferiors al 0,72 % de penetració del VE. Ara bé, per a nivells de penetració del VE majors al 0,72%, l'impacte sobre el terme de potència és fa visible. Tot i que, en cap dels dos escenaris s'aconsegueix reduir la demanda energètica als valors de l'any de referència. Aquest fet es deu que tant l'autoconsum PV com l'estacionament i càrrega dels VE són processos estocàstics, i per tant, van variant aleatòriament amb el temps, el que implica que gran part de el temps es superarà la potència contractada pels diferents períodes de facturació, i en

conseqüència el cost del terme de potencia es veurà incrementat significativament. Per tant, seria recomanable augmentar la potencia contactada de l'aparcament de Comte d'Empúries. A diferència de l'aparcament d'Antoni Maura, en aquest aparcament el percentatge d'energia que no ha pogut ser auto consumida és major, encara que, l'escenari 1 d'autoconsum presenta uns imports anuals pels excedents PV, que no han pogut ser auto consumits, molt inferiors als de l'escenari 2. En conseqüència, des del punt de vista econòmic, l'escenari 1 és molt més òptim degut a la legislació vigent que regula l'autoconsum amb excedents a collits a compensació, recollit al RD244/2019, i que estableix una compensació asimètrica pels excedents de la generació abocats a la xarxa elèctrica. Finalment, indicar que si l'aparcament ha analitzar presenta una demandada energètica base realment baixa i que alhora presenta poques rotacions anuals, combinat amb escenaris de penetració del VE relativament baixos ($\leq 1\%$), no té sentit desplegar una gran instal·lació fotovoltaica amb molts de kWp, ja que aquesta potencia no podrà ser absorbida per la instal·lació i la venda dels excedents a la xarxa presenta un retribució massa petita per fer-la rentable. Així doncs, l'escenari d'autoconsum més interessant, per a l'aparcament de Comte d'Empúries és el compost per tan sols una marquesina PV, amb 4,05 kwp de generació PV, al no tenir sentit economic desplegar instal·lacions PV de major potencia pic.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "The Global Climate in 2015–2019," 2020.
- [2] D. Lüthi *et al.*, "High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present," *Nature*, vol. 453, no. 7193, pp. 379–382, May 2008.
- [3] WMO, "Greenhouse Gas Concentrations in Atmosphere Reach New Record," *Wmo*. 2019.
- [4] UNFCCC, "Synthesis Report on the Aggregate Effect of INDCs," 2015.
- [5] IEA, "Energy related CO₂ emissions 1990-2019," 2019.
- [6] REN21, "Renewables 2020 Global Status Report," 2020.
- [7] IEA and IRENA, "Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System," *Int. Energy Agency*, p. 204, 2017.
- [8] A. Foley, B. Tyther, P. Calnan, and B. Ó Gallachóir, "Impacts of Electric Vehicle charging under electricity market operations," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 93–102, Jan. 2013.
- [9] M. Alsabaan, W. Alasmay, A. Albasir, and K. Naik, "Vehicular Networks for a Greener Environment: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1372–1388, 2013.
- [10] P. J. Tulpule, V. Marano, S. Yurkovich, and G. Rizzoni, "Economic and environmental impacts of a PV powered workplace parking garage charging station," *Appl. Energy*, vol. 108, pp. 323–332, Aug. 2013.
- [11] R. S. Levinson and T. H. West, "Impact of public electric vehicle charging infrastructure," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 64, pp. 158–177, Oct. 2018.
- [12] P. Nunes, R. Figueiredo, and M. C. Brito, "The use of parking lots to solar-charge electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 679–693, Dec. 2016.
- [13] P. Nunes, T. Farias, and M. C. Brito, "Day charging electric vehicles with excess solar electricity for a sustainable energy system," *Energy*, vol. 80, pp. 263–274, Feb. 2015.
- [14] M. para la T. Ecológica, "Real Decreto 244/2019," *Boe*, no. 90, pp. 68–71, 2019.
- [15] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2020," *Glob. EV Outlook 2020*, pp. 1–276, 2020.
- [16] International Energy Agency, "Global Electric car stock, 2010- 2019," 2020.
- [17] European Comission, "European Alternative Fuels Observatory," 2020. [Online]. Available: <http://www.eafo.eu/countries>.
- [18] D. Hall, S. Wappelhorst, P. Mock, and N. I. C. Lutsey, "European Electric Vehicle Factbook 2019 / 2020," 2020.
- [19] Dirección General de Trafico (DGT), "Parque de vehículos - Tablas Auxiliares Anuario - 2019." .
- [20] Ministerio de Industria Energía y Turismo, "Estrategia de Impulso del vehículo con energías alternativas (VEA) en España (2014-2020)," p. 12, 2015.
- [21] ANFAC, "Informe anual ANFAC 2019," 2020.
- [22] T. M. Choi, Y. Yu, and K. F. Au, "A hybrid SARIMA wavelet transform method for sales forecasting," *Decis. Support Syst.*, vol. 51, no. 1, pp. 130–140, 2011.
- [23] "Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC)." [Online]. Available: <https://anfacs.com/>.

- [24] "Ideauto." [Online]. Available: www.ideauto.com.
- [25] SAE, "SAE J1772: Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler." SAE, PA, USA, 2010.
- [26] IEC, "IEC 62196-2 ed1.0: Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles." 2011.
- [27] IEC, "IEC 61851-1 ed2.0: Electric vehicle conductive charging system – Parts 1, 21, 23, 24." 2010.
- [28] P. Zhang, K. Qian, C. Zhou, B. G. Stewart, and D. M. Hepburn, "A methodology for optimization of power systems demand due to electric vehicle charging load," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1628–1636, 2012.
- [29] NSW Transport Data Centre, "Key Transport Indicators by Local Government Area," 2009.
- [30] NSW Department of Transport, "2008/09 Household Travel Survey Summary Report," 2010.
- [31] "AEMET." [Online]. Available: <http://www.aemet.es>.
- [32] M. Blanco-Muriel, D. C. Alarcón-Padilla, T. López-Moratalla, and M. Lara-Coira, "Computing the solar vector," *Sol. Energy*, vol. 70, no. 5, pp. 431–441, 2001.
- [33] SFE Solar, "Sun fields Europe," 2007. .
- [34] R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart, and D. Menicucci, "A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces," *Sol. Energy*, vol. 39, no. 3, pp. 221–231, 1987.
- [35] J. A. Duffie, W. A. Beckman, and J. McGowan, "Solar Engineering of Thermal Processes," *Am. J. Phys.*, vol. 53, no. 4, pp. 382–382, 1985.
- [36] D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil, D. L. King, W. E. Boyson, and J. A. Kratochvil, "Photovoltaic Array Performance Model," in *Sandia National Laboratories*, 2004, pp. 2004–3535.
- [37] G. S. California, "Incentive Eligible Photovoltaic Modules in Compliance with SB1 Guidelines," 2016.
- [38] Ministerio de Industria Energía y Turismo, "Resolución de 23 de mayo de 2014, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se establece el contenido mínimo y el modelo de factura de electricidad," p. 28, 2014.
- [39] OCED / IEA, "Energy Technology Perspectives 2017," 2017.

ANEXES

- I. **Contribució al congrés ICSC-CITIES (2019):** "Impacto del autoconsumo fotovoltaico sobre las instalaciones de carga del vehículo eléctrico ubicadas en aparcamientos públicos", V. Canals, E. Alcover, A. Salas, R. Pujol-Nadal, V. Martínez-Moll, J. L. Rosselló i B. Mas
- II. **Contribució a la 18a Conferència Internacional sobre Energies Renovables i Qualitat de l'Energia (2020):** "Energetic and economic analysis of the Electric Vehicles charge impacts on public parking lots", E. Alcover, B. Mas, V. Martínez-Moll, J.L. Rosselló, M. Roca i V. Canals
- III. **Contribució al congrés EUROSUN (2020):** "Photovoltaic self-consumption in electric vehicle charging stations", E. Alcover , R. Pujol-Nadal, J. L. Rosselló, M. Roca, V. Martínez-Moll, B. Mas i V. Canals
- IV. **Contribució al congrés ICSC-CITIES (2020):** "Economic Optimization of Photovoltaic Generation System with Hydrogen Storage", E. Alcover, R. Pujol-Nadal, V. Martínez-Moll, J.L. Rosselló i V. Canals

Impacto del autoconsumo fotovoltaico sobre las instalaciones de carga del vehículo eléctrico ubicadas en aparcamientos públicos

V. Canals, E. Alcover, A. Salas, R. Pujol-Nadal, V. Martínez-Moll, J. L. Rosselló, B. Mas

Universidad de las Islas Baleares, Palma, Ctra. Valldemossa km 7.5, Campus UIB, Islas Baleares ES07122, España
v.canals@uib.es

Abstract. El presente trabajo aborda el impacto energético y económico que conllevará la incorporación del autoconsumo fotovoltaico (PV) en su modalidad de excedentes acogidos a compensación, en el marco del RD244/2019, en aparcamientos públicos que presten servicios de carga de vehículos eléctricos (EV). Presentándose las diferentes metodologías desarrolladas e integradas en una herramienta encargada de: planificar estadísticamente el número de plazas de estacionamiento necesarias para un determinado nivel de penetración del EV basándose en datos históricos de la facturación individualizada de los estacionamientos, estimar la demanda energética relacionada con la carga a intervalos de un minuto de forma estadística simulando un parque móvil de EV representativo, y estimar la generación de una instalación fotovoltaica conectada a red tomando en cuenta diferentes efectos limitadores de la generación (sombras, ensuciamiento de las placas, efecto de la temperatura ambiente, rendimiento del inversor). Finalmente, se describe el módulo de facturación para instalaciones con una tarifa de acceso 3.0A acogidas a la modalidad de autoconsumo con excedentes compensados. Concretamente se analizan dos escenarios de generación fotovoltaica mediante la instalación de diferente número de marquesinas PV provistas de puntos dobles de carga en modo 3 en un aparcamiento ubicado en el centro de Palma de Mallorca, tomando en cuenta la evolución de los niveles de penetración del EV para los próximos 5 años. Los resultados muestran como con bajas penetraciones del EV, como es un 2,35%, los incrementos en la demanda y la facturación energética son relevantes, alcanzando un 45,82% y un 34,39% respectivamente. Mientras que los diferentes escenarios de autoconsumo PV conllevaran reducciones significativas del término de energía y en el importe de la factura energética, alcanzando un 29,74% y un 20,08% respectivamente. Ahora bien, en ninguno de los casos analizados los ahorros alcanzados permiten amortizar las inversiones a realizar en un periodo razonable.

Keywords: Electric vehicles, Parking lot, Renewable energy, Solar energy, Statistical methods, Monte Carlo simulation.

1 Introducción

Las naciones acordaron en la convención de las Naciones Unidas (UN) sobre el Cambio Climático, celebrado en París en el año 2015, reducir las emisiones a fin de limitar el aumento de la temperatura media del planeta a largo plazo a un máximo de 2°C sobre los niveles preindustriales [1]. Esto conlleva irremediablemente una reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI), y más concretamente las emisiones de CO₂, el más común de los GEI emitidos por las actividades humanas en términos de cantidades liberadas a la atmosfera e impacto sobre el calentamiento global del planeta. Los objetivos de reducción de un 70% de las emisiones de CO₂ para el año 2050 en comparación a las emisiones de 2015 [2], requieren de la transformación del sistema energético global. Dicha transformación solo puede conseguirse con un despliegue masivo de fuentes de energía renovables (eólica, fotovoltaica, solar térmica...), en el cual se involucren todos los niveles de la sociedad – desde los gobiernos, comunidades, hasta los diferentes sectores públicos y privados.

En este marco, el sector del transporte de pasajeros y mercancías representa un 25% del consumo energético mundial [3]. Siendo el petróleo (gasolina y diésel) y los otros combustibles líquidos (GNL, GLP, Biocombustibles, entre otros) las principales fuentes de energía vinculadas a dicho sector, que son las grandes responsables de la polución en las ciudades modernas y de la lluvia acida [4]. Por ello, muchos países están buscando reemplazar los vehículos de combustión interna por otros mucho más ecológicos [5]. Como son los vehículos híbridos enchufables (PHEV) y los vehículos eléctricos puros (EV), a priori más respetuosos con el medio ambiente y que presentan costes de operación muy inferiores [6]. Ahora bien, esta transición requiere de una infraestructura eléctrica capaz de satisfacer la demanda asociada a la carga de los EV [7], y con unas emisiones asociadas de GEI inferiores a las que producirían el conjunto de vehículos de combustión interna a sustituir [8]. En consecuencia, la infraestructura eléctrica y su gestión [9] jugarán un papel crucial en el despliegue del EV [6]. Por ello, tanto gobiernos nacionales como locales están trabajando para adaptar las ciudades a las nuevas necesidades de la movilidad eléctrica, apoyando la repotenciación de líneas eléctricas y subvencionando el despliegue de las infraestructuras de carga [10]. Donde la infraestructura de carga para el EV en el espacio público es un factor esencial para la adopción por parte de los consumidores de los vehículos eléctricos [11, 12], aunque su implementación pública aún carece de viabilidad financiera, por lo que el sector público debe tomar la iniciativa en su despliegue [13].

Todo ello, en el marco de la transición energética en curso que conllevará la masiva penetración de fuentes renovables, principalmente de origen fotovoltaico (PV) en ámbitos urbanos relacionado con el autoconsumo. Donde la generación PV se caracteriza por un suministro de energía no despachable y variable en el tiempo, mientras que la demanda de carga de los VE se caracteriza por cargas controlables y capacidad de almacenamiento de energía, con lo cual tiene sentido combinar la carga de los EV con la generación PV [14]. Por un lado, la carga de los vehículos eléctricos puede ayudar a la red eléctrica a mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda, lo que permitirá una mayor penetración de las energías renovables [15]. A su vez, la producción energía de origen PV también podría posibilitar una mayor penetración de los vehículos eléctricos,

al no conllevar un aumento significativo de la demanda neta si los EV se cargan desde la PV. Aunque su integración deberá realizarse con sumo cuidado para no comprometer a estabilidad de la red eléctrica [16, 17], relacionada con la variabilidad de la generación PV [13] y el aumento de la demanda puntual que puede conllevar la carga de los EV.

A su vez, los aparcamientos para EV provistos de energía solar fotovoltaica pueden desplegarse en superficie en prácticamente en cualquier lugar que disponga de una infraestructura eléctrica básica, como son: centros comerciales, estaciones de trenes y autobuses, universidades, aparcamientos públicos y privados, ... Siendo el diseño típico de los aparcamientos solares para EV el de estacionamientos en batería recta u oblicua, con una superficie cada uno de entre 12-15 m², cubiertos por paneles solares que a su vez están soportados en el aire mediante unas estructuras metálicas o de madera; debajo de las cuales se ubican las diferentes estaciones de carga de los vehículos eléctricos. Siendo su disposición habitual la de grupos de dos filas de estacionamientos en paralelo separados por un vial de circulación entre medias [18].

El presente trabajo analiza el beneficio energético y económico que conllevaría la incorporación de la generación fotovoltaica en modalidad de autoconsumo con excedentes acogidos a compensación [19], recogido en el RD244/2019 recientemente aprobado en España, sobre la demanda de las instalaciones de carga de EV ubicadas en aparcamientos públicos, que con actuales los niveles de penetración del EV carecen de viabilidad financiera. Pero que desde el sector público se ha tomado la iniciativa de su implantación para impulsar la transición energética en el ámbito de la movilidad. Concretamente se analiza el impacto energético y económico sobre un aparcamiento en superficie ubicado en el centro de Palma de Mallorca, operado por la Sociedad Municipal de Aparcamientos Públicos (SMAP) del ayuntamiento de dicha ciudad, para los niveles de penetración del VE previstos para los próximos 5 años a nivel de la comunidad autónoma de las Islas Baleares.

Para ello, se ha partido de una herramienta numérica desarrollada por los autores a requerimiento de la SMAP para planificar las necesidades de nuevas infraestructuras de carga y el impacto energético que estas conllevaran sobre la demanda base de los diferentes aparcamientos públicos de Palma de Mallorca. A partir de los datos referentes a la facturación individual (importe, duración, hora de entrada y salida) del conjunto estacionamientos a lo largo del año 2017 (año de referencia). A dicha herramienta se le ha incorporado para este trabajo sendos módulos de estimación la generación fotovoltaica y de estimación de la facturación de energética en modalidad de autoconsumo con excedentes acogidos a compensación. El modulo destinado a estimar la generación de una instalación fotovoltaica toma en cuenta parámetros del rendimiento de placas e inversor, así como la ubicación de los paneles y de los obstáculos, afín de incorporar el efecto de las sombras sobre la generación.

El presente trabajo se estructura de la siguiente forma: en la segunda sección se presenta brevemente la metodología desarrollada para estimar los niveles de penetración del EV en el parque móvil de la Islas Baleares para los próximos 5 años. En la tercera sección se describe brevemente la estructura y la metodología propia que incorpora la herramienta desarrollada por los autores para la planificación de las infraestructuras de carga de EV y su demanda energética específica sobre la curva base de las instalaciones,

y finalmente combinada con la generación fotovoltaica que tendría asociada un aparcamiento solar con un numero de paneles e inversores dados, asociados a una pérgola fotovoltaica.

En la cuarta sección se presenta una descripción detallada del aparcamiento sobre el que se desarrolla el presente estudio, así como el conjunto de resultados asociados a la demanda energética y los costes energéticos asociados de la carga del EV para diferentes escenarios de penetración del EV y de la potencia fotovoltaica pico instalada. Finalmente, en el apartado de conclusiones se discuten en detalle los resultados obtenidos y sus implicaciones prácticas en el despliegue de aparcamientos solares destinados a la carga de EV.

2 Evolución de la penetración del VE

Disponer de una previsión de la evolución de la incorporación del vehículo eléctrico en el parque móvil, con un horizonte de al menos 5 años, es fundamental para establecer las prioridades y horizontes en el desarrollo de las infraestructuras de carga del VE y su impacto energético asociado. Ante la falta de previsiones oficiales nacionales e internacionales al respecto, se ha optado por predecir evolución de la penetración del vehículo eléctrico en el parque móvil de las Islas Baleares. Para ello se ha partido de datos históricos de las matriculaciones/ventas anuales de turismos a nivel nacional, y de datos históricos de la flota turismos a nivel la comunidad autónoma de las Islas Baleares (número de vehículos en circulación, ventas y bajas anuales) disponibles en la web de la *Dirección General de Tráfico* (DGT), y de la serie temporal de ventas de EV y PHEV mensuales a nivel nacional para el período comprendido entre el 01/01/2014 al 31/05/2018, provista por la *Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones* (ANFAC) [20]. A partir de las serie histórica de ventas mensuales de vehículos eléctricos y mediante un modelo estadístico Box-Jenkins de la familia *AutoRegressive Integrated Moving Average* (ARIMA), implementado sobre MATLAB®, específico para la previsión de series temporales a partir de observaciones pasadas de la propia serie y los errores previos de la previsión [21] se ha estimado las ventas mensuales de vehículos eléctricos (EV + PHEV) hasta diciembre de 2023. Para ello se han identificado los parámetros idóneos que modelan la serie temporal de ventas de EV+PHEV, cabe remarcar los modelos ARIMA muy sensible a variaciones de estos parámetros. El modelo se suele expresar como ARIMA (p, d, q) donde los parámetros p , d y q son números enteros que indican el orden de las diferentes componentes del modelo. Donde p establece el orden del coeficiente no estacional auto regresivo (AR), d establece el orden del término no estacional integrativo (I), y finalmente q establece el orden del término de la media móvil no estacional (MA). Expresándose el modelo como:

$$Y_t = (\phi_0 + \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta^d Y_{t-1}) + (Y_t - \Delta^d Y_t) + (\varepsilon_t - \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-1}) \quad (1)$$

Donde “d” se corresponde al número de diferencias o derivadas a realizar para convertir la serie temporal de entrada en estacionaria, los términos ϕ_1, \dots, ϕ_p son los coeficientes de la parte autoregressiva del modelo, los términos $\theta_1, \dots, \theta_p$ son los coeficientes de la parte de medias móviles del modelo, ϕ_0 es una constante, ε_t es el término del error, y

$\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$ representa el resto entre el valor de salida de la serie temporal en el instante t y el instante anterior $t-1$.

Concretamente el modelo implementado es un *Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average* (SARIMA), a fin de incorporar el efecto de la estacionalidad de la venta de vehículos a lo largo del año en el modelo. Una vez analizada la serie temporal e identificadas sus componentes básicas, se ha implementado un modelo con una $\phi_o = 0$, un número de diferencias igual a $d=1$ a fin de convertir la serie temporal en estacionaria, un término de la media móvil no estacional de orden $q=1$, y finalmente un término estacional de periodo 12 (meses) y orden unitario del *Seasonal Moving Average* SMA=1, periodo que se corresponde con un año. Los resultados de la previsión de las ventas mensuales de EV+PHEV se ha integrado anualmente a fin de estimar las ventas anuales para los próximos 5 años, que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Previsión de la cuota de mercado del vehículo eléctrico en España, para el periodo (2018-2023).

Año	Estimación de ventas anuales de turismos	Previsión de ventas anuales de EV+PHEV	Cuota de mercado del EV+PHEV
2018	926.427	14.016	1,50%
2019	926.427	23.427	2,50%
2020	926.427	39.883	4,26%
2021	926.427	67.898	7,25%
2022	926.427	115.592	12,34%
2023	926.427	196.787	21,01%

Finalmente, a partir de la estimación de la cuota de mercado eléctrico y los valores medios del volumen de la flota de turismos de las islas baleares, el número de matriculaciones, el número de bajas, todas ellas obtenidas de la web de la DGT [22], se ha procedido a estimar la penetración del vehículo eléctrico en el parque móvil de las Islas Baleares para el periodo 2018-2023, en la Tabla 2.

Tabla 2. Previsión de la penetración del vehículo eléctrico en la flota de turismos de las Islas Baleares, para el periodo (2018-2023).

Año	Volumen de la flota de turismos	Matriculaciones anuales de turismos	Bajas anuales de turismos	Previsión de matriculaciones de EV+PHEV	EV+PHEV en circulación	Penetración del EV+PHEV en la flota de turismos
2018	659.702	30.538	25.174	458	1.053	0,16%
2019	659.702	30.538	25.174	763	1.817	0,28%
2020	659.702	30.538	25.174	1.301	3.117	0,47%
2021	659.702	30.538	25.174	2.214	5.331	0,81%
2022	659.702	30.538	25.174	3.768	9.100	1,38%
2023	659.702	30.538	25.174	6.416	15.516	2,35%

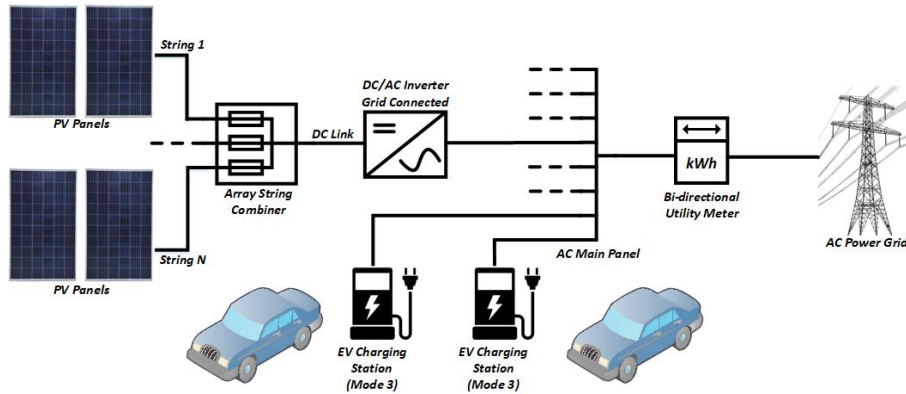


Fig. 1. Arquitectura del sistema de generación PV conectada a red, para dar soporte a la carga del EV.

Siendo los datos de penetración de EV+PHEV presentados en la Tabla 2 para la comunidad autónoma de las Islas Baleares para el periodo 2019-2023, los que usaran para estimar el impacto energético de la carga del vehículo eléctrico en el presente trabajo.

3 Planificación y estimación de la demanda del VE

La carga de los EV en la Unión Europea (UE) se rige por unos estándares electrotécnicos IEC 92196 y SAE J1772 [23, 24] que establecen las características de los conectores de carga y los modos en los que debe desarrollarse esta, mientras que el estándar IEC 61851 [25] establece las características de las infraestructuras de carga de VE y sus parámetros de compatibilidad electromagnética. Con respecto a los conectores de carga, la gran mayoría de fabricantes de vehículos eléctricos europeos y más recientemente los japoneses han optado para la carga AC en monofásica y trifásica por el conector Mennekes (tipo 2) en modo 3 (dando soporte a la carga normal/lenta, semi-rápida y rápida). Sin embargo, la tendencia de los fabricantes a medio plazo es la de optar por la carga en DC en modo 4 (dando soporte mayoritariamente a la carga semi-rápida y rápida), a fin de retirar el circuito cargador AC/DC del interior de los vehículos y dar soporte a la implantación del *Vehicle-to-Grid* (V2G), para la que los VE de fabricantes europeos harán uso de conectores para carga combina CCS (compatible físicamente con el Mennekes pero que además incorpora tomas para la carga en DC), mientras que los fabricantes japoneses mayoritariamente incorporarán conectores CHAdeMO. En cuanto al modo de carga de los VE, la mayoría de fabricantes han optado por implementar recargas lentas en AC modo 3 ($10A-32A@230V_{AC}$) y rápidas ($>40kW$) en DC modo 4. Mientras que las recargas AC semi-rápidas ($16A-32A@400V_{AC}$) son implementadas actualmente por solo dos fabricantes, Renault y BMW. Finalmente, remarcar que los fabricantes han reservado la carga lenta en Modo 2 ($10A@230V_{AC}$) para la carga de emergencia.

Concretamente la metodología que se presenta en este trabajo se ha enfocado a analizar la demanda de la carga AC normal/lenta y semi-rápida en modo 3 de los VE en un rango de potencias de carga de [2,3-22kW] en aparcamientos públicos en régimen de rotación, para un rango de niveles de penetración del VE relativamente bajos [0-2,35%] que son los que se esperan para el próximo lustro. Por ello, y unido al coste infinitamente superior de las estaciones de carga DC en modo 4 frente a las AC en modo 3; hacen a día de hoy innecesaria e inviable económicamente su instalación en aparcamientos públicos de rotación. Por lo que respecta a la generación de energía en el aparcamiento se ha optado por analizar una instalación fotovoltaica conectada a red, compuesta por un número dado de paneles fotovoltaicos (PV) cuyos strings en DC se interconectarán a uno o varios inversores, encargados de la convertir la tensión DC a la tensión y frecuencia AC de la red eléctrica interior; sobre la cual se interconectarán las diferentes estaciones de carga de los EV en modo 3 y el resto de servicios de la instalación interior, como se presenta en la Fig. 1.

3.1 Metodología

La metodología propuesta se ha implementado en una herramienta sobre MATLAB®, encargada de planificar las infraestructuras de carga y estimar su demanda energética, que a su vez es soportada por 8 sub-módulos que implementan partes específicas de la metodología desarrollada. Cabe remarcar que la metodología implementa en su núcleo un algoritmo Montecarlo que realizará una simulación, minuto a minuto, del aparcamiento para una serie temporal de 10 repeticiones del año de referencia (2017). A su vez, en la Fig. 2 se presenta la arquitectura de la herramienta desarrollada, detallando la interconexión de los diferentes sub-módulos y los flujos de información. La metodología desarrollada en cada uno de los sub-módulos se presenta a continuación:

Análisis y Modelado de la Ocupación del Aparcamiento

Este sub-módulo se encarga de ajustar la distribución estadística de los periodos de estacionamiento y el diagrama horario de ocupación media para el aparcamiento, para dos periodos anuales (temporada alta y baja). Todo ello a partir de la información histórica de facturación de los estacionamientos individuales (tickets de estacionamiento) de los años 2016 y 2017, que se carga mediante un fichero externo. Para conocer la distribución de los periodos de estacionamiento se construye el histograma de las duraciones de estacionamiento para intervalos de 10 minutos en un rango de [0, 2000] minutos, eliminando así periodos de estacionamiento atípicos. Cuya forma resigue perfectamente una distribución continua como la de Weibull $W_e(x; \lambda, k)$, definida dos parámetros; el parámetro de forma $k > 0$ y el parámetro de escala de la distribución $\lambda > 0$. Los cuales se determinan sobre los datos normalizados del histograma anteriormente construido, mediante un método de mínimos cuadrados. Mientras que el diagrama de ocupación horaria media del aparcamiento por periodo, se construye determinando el número medio de vehículos que inician y finalizan su estacionamiento en una determinada franja horaria a lo largo de un determinado periodo; en este caso se ha establecido también dos periodos anuales.

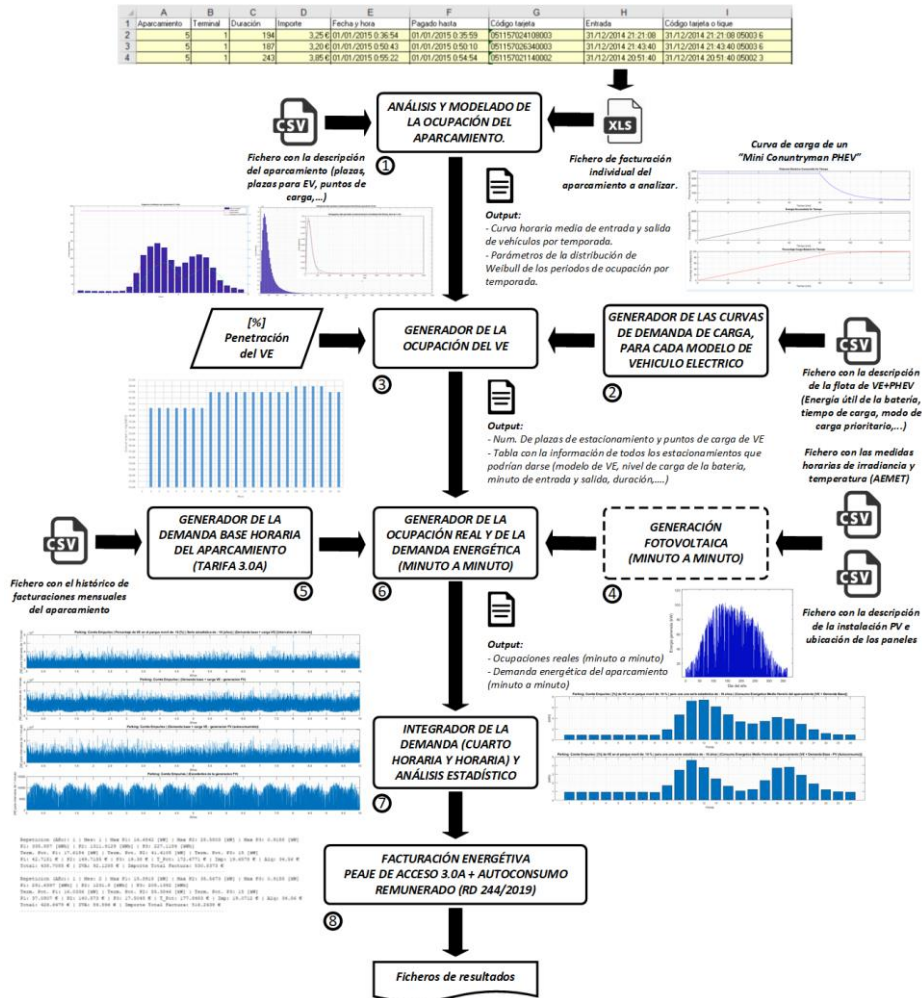


Fig. 2. Arquitectura de la herramienta de planificación y estimación de la demanda del EV.

Generador de Curvas de la demanda de carga

Genera las curvas de carga de las baterías de los vehículos que conforman la flota conformada de EV. Concretamente el parque móvil se incorpora mediante un fichero externo en el cual se incorporan una columna para cada EV que conforma la flota, en la cual se detallan: el porcentaje absoluto de penetración el modelo en el parque móvil, la energía útil de la batería, el tiempo de carga y la potencia nominal de carga del vehículo, además de otros parámetros. Concretamente el parque móvil usado en este trabajo se ha conformado con 10 vehículos, 5 son eléctricos puros y 5 híbridos enchufables como se muestra en la Tabla 3, cuyo porcentaje de penetración se ha establecido acorde al actualmente existente en el parque móvil eléctrico nacional.

Tabla 3. Características de los vehículos que conforman la flota EV

Modelo	[%] Penetración en la flota EV nacional	[%] Penetración del modelo en la flota EV	[kWh] Energía útil de la batería	[kW] Potencia nominal de carga	[min] Tiempo de carga
Renault Zoe Z40	8,71	21,44	41	17,28	189
Nissan Leaf e+	6,88	16,93	40	6,60	410
BMW i3	5,06	12,45	27,2	11	195
Renault Kangoo ZE	3,90	9,60	33	7,36	315
Nissan e-nv200	3,98	9,78	40	6,60	410
Mitsubishi Outlander PH	7	16,97	13,8	3,68	271
Volkswagen Golf GTE	1,50	3,68	8,7	3,68	188
Mercedes GLC 350e	1,37	3,37	6,2	3,68	147
BMW 225ex	1,44	3,55	5,7	3,68	139
Mini Countryman PHEV	0,91	2,33	5,7	3,68	139

A partir de estos datos, la metodología genera la curva de demanda (AC) de la estación de carga modo 3 vinculada a la batería de litio-ión de cada uno de los vehículos de la flota. Concretamente, la metodología desarrollada pretende emular la demanda asociada a la carga de la batería, mediante una función a dos tramos. Un primer tramo a potencia nominal constante $P_{car}(t_i) = P_{car,nom}/60$ y una segunda a potencia variable que decrecerá exponencialmente $P_{car}(t_i) = P_{car,nom}e^{-at}/60$. Que se iniciará cuando la energía que resta para finalizar la carga t_{rest} es inferior a la energía que se cargaría a potencia nominal en una hora, el método ajusta el parámetro “a” de la función exponencial negativa de la potencia nominal mediante integración numérica, a fin que la energía restante se cargue en dicho periodo.

Generador de la Ocupación del EV

Determina la ocupación del EV a partir del valor de penetración del EV en el parque móvil y de los datos de ocupación horaria media del aparcamiento, que proveerán el número medio de entradas/estacionamientos de vehículos para todos los intervalos horarios del periodo de evaluación. Entonces la metodología propuesta generará tantos números uniformemente distribuidos $U(0,1)$ como vehículos se prevé que accedan al aparcamiento en un determinado intervalo horario, para determinar si el vehículo que ha accedido al aparcamiento es eléctrico o no; concretamente si el valor del número aleatorio generado es menor al valor de penetración del EV se considerara que ha accedido un EV. De esta forma la metodología reproduce la componente estocástica que tiene asociado el estacionamiento real de vehículos. Seguidamente para cada EV que acceda al aparcamiento se generaran tres nuevos números aleatorios. El primero consistirá en un numero aleatorio uniformemente distribuido $U(1,60)$ y encargado de fijar aleatoriamente el minuto a lo largo del intervalo horario en el que el vehículo accederá

al aparcamiento. Mientras que el segundo se generará mediante un generador de números aleatorios que sigue una distribución de Weibull “ $t_{est} = W_e(\lambda, k, U(0,1))$ ”, y fijará aleatoriamente la duración del estacionamiento característica del aparcamiento. Mientras que el tercero usará un generador aleatorio uniformemente distribuido $U(0,1)$ que servirá determinar el modelo de EV que ha accedido al aparcamiento.

Finalmente, la metodología determina los percentiles P_{99} y $P_{99,6}$ de la serie horaria de ocupaciones del EV de todo el periodo de evaluación, a fin de establecer los requerimientos de plazas de estacionamiento y estaciones de carga de EV.

Generación Fotovoltaica

Para poder estimar la generación PV con precisión es fundamental disponer de datos meteorológicos de calidad de la ubicación o de alguna estación meteorológica cercana a ella. Para ello se hará uso de datos horarios de la irradiancia solar horizontal global (DGI), la irradiancia solar difusa horizontal (DHI) y la irradiancia directa normal (DNI) y temperatura ambiental, todos ellos provistos por la ($AEMET$) para el año de referencia; que en esta aplicación se ha establecido como el año 2017. A su vez, para evaluar la irradiancia incidente sobre los diferentes orientaciones e inclinaciones de los paneles fotovoltaicos, que conforman una instalación PV, es fundamental conocer la posición del sol en cada instante. Para este propósito, se ha incorporado el algoritmo de la *Plataforma Solar de Almería (PSA)* [26] para la determinación de la altitud, azimut y declinación solar para cualquier momento del año. Entonces, a partir de la posición solar y las medias horarias de irradiancia aplicando métodos geométricos puede determinarse la irradiancia difusa (ID_{if}) que incidirá sobre un panel fotovoltaico dado, tomando en cuenta su orientación e inclinación. Obteniendo la radiación directa sobre el plano horizontal multiplicando la irradiancia directa normal (DNI) por el seno la elevación solar, y conociendo el ángulo que forman el panel PV respecto a la posición del sol, se puede fácilmente determinar la cantidad de irradiancia que incidirá perpendicularmente (ID) sobre el panel PV. Donde la irradiancia aprovechable (GI_{ef}) por un panel/modulo fotovoltaico vendrá dada por la suma de las componentes directa efectiva (ID_{ef}) y difusa efectiva ($IDif_{ef}$), como se muestra en la siguiente expresión:

$$GI_{ef} = IDif_{ef} + ID_{ef} \quad (2)$$

A su vez, para determinar la cantidad de energía generada por un panel PV para una irradiancia dada es fundamental incorporar un parámetro que modele el grado de suciedad del panel PV. Ya que la suciedad altera las propiedades ópticas angulares de los paneles a la vez que reduce la transmitancia del cristal/material protector del panel [27], limitando tanto la irradiancia directa ID_{ef} , como la difusa $IDif_{ef}$. Por lo que respecta al rendimiento de la conversión de la irradiancia incidente a energía eléctrica en los paneles fotovoltaicos, se ha optado por la incorporación de un modelo que determina la potencia P_{DC} de salida de los módulos PV que toma en cuenta la temperatura. Al depender directamente el rendimiento de las células fotovoltaicas de la temperatura a la que se haya en cada instante el módulo PV. Concretamente, para este efecto se ha optado por implementar el modelo *Sandia PV Array Performance Model (SAPM)* [28] que toma en consideración la metodología de instalación de los paneles. Finalmente, para determinar la potencia eléctrica P_{AC} entregada por el inversor a la red se ha optado

por el modelo de *PVWatts* del *NREL* [29] que propone para la estimación del rendimiento del inversor una función empírica escalada de acuerdo a la eficiencia nominal del inversor PV. A su vez, el módulo de generación fotovoltaica desarrollada toma en consideración las sombras debidas a los obstáculos colindantes a la instalación.

Generador de la Demanda Base Horaria

Para la generar la curva base se parte de un fichero externo provisto de la información de diversas facturaciones mensuales, incorporando para cada una de ellas una fila con toda la información de las facturas históricas del suministro eléctrico para un peaje de acceso 3.0A ($P_{\text{cont}} \geq 15\text{kW}@400\text{V}_{\text{AC}}$), en la cual se detallarán: periodo de facturación mensual, potencia contratada para los periodos de facturación horaria P1/P2/P3, energía activa consumida mensualmente por periodo. Para finalmente estimar el consumo medio horario, y minuto a minuto del aparcamiento.

Generador de la Ocupación Real y de la Demanda Energética

Determina la ocupación real del aparcamiento, una vez se ha fijado el número de plazas de aparcamiento y estaciones para el EV. Para a continuación determinar la demanda energética asociada a la de la carga del EV. Para ello metodología empieza ordenando de forma ascendente la tabla con la información de cada uno de los estacionamientos de EV en función del minuto de inició del estacionamiento. Seguidamente se crean dos matrices unidimensionales, de tantos elementos como minutos del periodo de evaluación. La primera almacenara la ocupación real minuto a minuto de las plazas de EV, incrementando su valor en una unidad entre el minuto de entrada del vehículo en el aparcamiento y su salida, mientras que el número de vehículos estacionados no exceda el número de estacionamientos prefijado anteriormente; en tal caso se descartara el estacionamiento. Mientras que en la segunda matriz se incrementará con la potencia instantánea consumida por la carga del VE en el periodo prefijado para el estacionamiento. Finalmente, este módulo combina las diferentes demandas energéticas (curva base, demanda del EV, generación PV) para su posterior análisis.

Integrador de la Demanda

Se encarga de integrar la demanda energética de los energética en periodos cuatro horarios y horarios, para su posterior análisis y evaluación de la facturación eléctrica.

Facturación Energética

Se encargara de calcular la factura energética mensual [30] para un peaje de acceso 3.0A, tipología habitual de los aparcamientos públicos de rotación. Cabe destacar, que no existe un mercado regulado para la tarifa vinculada a un peaje de acceso 3.0A; donde el gobierno español marca el precio de los peajes de acceso para potencia y el consumo, pero cada comercializadora puede aplicar el margen de comercialización y las condiciones contractuales (como compromisos de permanencia) que crea convenientes. Es una tarifa que utiliza siempre discriminación horaria en tres periodos: P1 (Punta), P2 (Plan) y P3 (Valle); y cada período le corresponde una franja horaria diaria donde el coste de la energía y de la potencia contratada es diferente. Las tarifas integradas en la

herramienta se presentan en la Tabla 4, las cuales también incorporan el término de alquiler de los equipos (414,72€/año), el impuesto sobre la electricidad (5,11%) y el IVA (21%)

Tabla 4. Tarifa de acceso 3.0A

Tarifa / Rango de potencia	[€] Termino potencia P1	[€] Termino potencia P2	[€] Termino potencia P3	[€] Termino energía P1	[€] Termino energía P2	[€] Termino energía P3
Tarifa 1 / 15 a 30 kW	41,95	25,17	16,78	0,1272	0,1141	0,0853

Los cálculos del término de energía se realizan a partir de la energía consumida horariamente, mientras que los cálculos del término de potencia se realizaran a partir de la potencia contratada en cada uno de los periodos de facturación y la potencia demandada cuarto-horariamente registrada por el maxímetro. A su vez, se ha integrado en este sub-módulo el autoconsumo para instalaciones de generación ($P \leq 100kW$) en su modalidad de autoconsumo con excedentes con compensación simplificada, recientemente introducida en el RD244/2019 [19], que introduce una variante del balance cero que en vez de compensar los [kWh] consumidos y producidos propone una compensación económica asimétrica mensual. Donde los [kWh] inyectados a la red se pagarán según acuerdo de compensación de excedentes con la comercializadora para cada periodo, en un rango de entre [0,04-0,05 €/kWh]; en este trabajo se ha tomado un precio de 0,04018 €/kWh para los tres periodos. A su vez, si el importe producido es igual o mayor al consumido el valor del término de energía será de 0 €; lo que implica regalar el excedente al sistema.

4 Resultados

La metodología desarrollada se ha aplicado sobre el aparcamiento de *Comte d'Empúries* ubicado en las coordenadas ($39^{\circ}34'38,9''N$ / $2^{\circ}39'16,3''E$) en el centro de Palma de Mallorca, Fig. 3a, y orientado hacia el noroeste, Fig. 3b. Las 83 plazas de este aparcamiento son operadas por la *SMAP* en régimen de rotación, de lunes a sábado con un horario de las 7 a las 22h. El aparcamiento actualmente no dispone de ninguna plaza de estacionamiento ni infraestructura de carga que de soporte al EV. A su vez, el aparcamiento tiene asociada una tarifa de acceso 3.0A con una potencia contratada de 15kW para los tres periodos de facturación, y un consumo energético medio anual de 8.022 kWh. Todo ello lo hace idóneo para abordar el análisis del impacto energético y económico que conllevaría la incorporación de un autoconsumo fotovoltaico, en su modalidad de “*excedentes acogidos a compensación*”, en la estrategia de despliegue de infraestructuras de carga y estacionamiento para el EV que está impulsando el sector público. Concretamente se analizan dos escenarios de autoconsumo fotovoltaico tomando en cuenta la evolución anual de los niveles de penetración del EV para los próximos 5

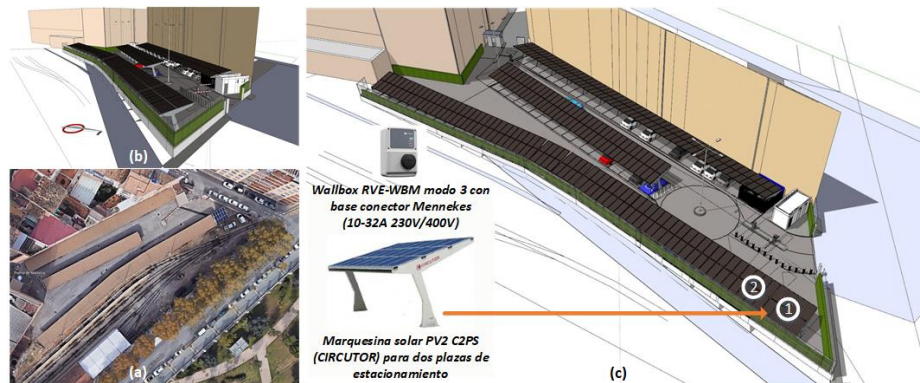


Fig. 3. a: Ubicación del aparcamiento. b: Orientación del aparcamiento. c: Descripción e ubicación de las marquesinas solares.

años y las infraestructuras de carga que se prevén instalar. Puesto que su evolución debería impactar significativamente sobre el término de potencia de la factura energética.

4.1 Planificación y Análisis Energético

La planificación de las infraestructuras de carga del EV es la fase previa a cualquier análisis energético y/o económico que se quiera llevar a cabo, con la metodología propuesta. Para ello se ha estimado el número de estaciones de carga y plazas de estacionamiento de EV necesarias para dar soporte de al número de estacionamientos de EV cubiertos por los percentiles P_{99} y $P_{99,6}$ que se darán con los niveles de penetración EV para los próximos 5 años. Como puede apreciarse en la Fig. 4a, tanto si se opta por una planificación basada en el percentil P_{99} o el percentil $P_{99,6}$ en los próximos 5 años se requerirá de 2 plazas de estacionamiento y estaciones de carga de EV, para dar soporte a la demanda del estacionamiento de EV. A su vez, los dos escenarios planteados de generación fotovoltaica consistirán en la instalación de 1 o 2 marquesinas modelo PV2 del fabricante Circutor, cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 5, según se muestra en la Fig. 3c. Ambos escenarios cumplen con los requerimientos de plazas y estaciones de carga para el periodo analizado.

Tabla 5. Parámetros asociados a los dos escenarios de autoconsumo PV

Escenario	Núm. Módulos PV (270 W _p)	[kW _p] Potencia PV	Núm. Inversores x [kW] P _{Nominal}	Núm. Plazas / Núm. Estaciones de carga modo 3
1: 1 x Marquesina PV2-2	15	4,05	1 x 3,70	2 / 1
2: 2 x Marquesina PV2-2	30	8,10	1 x 7	4 / 2

A continuación, la metodología procede a estimar la demanda energética base del aparcamiento combinada con asociada a la carga de los EV en función del nivel de penetración anualmente establecido, en intervalos de minuto a minuto. Para posteriormente

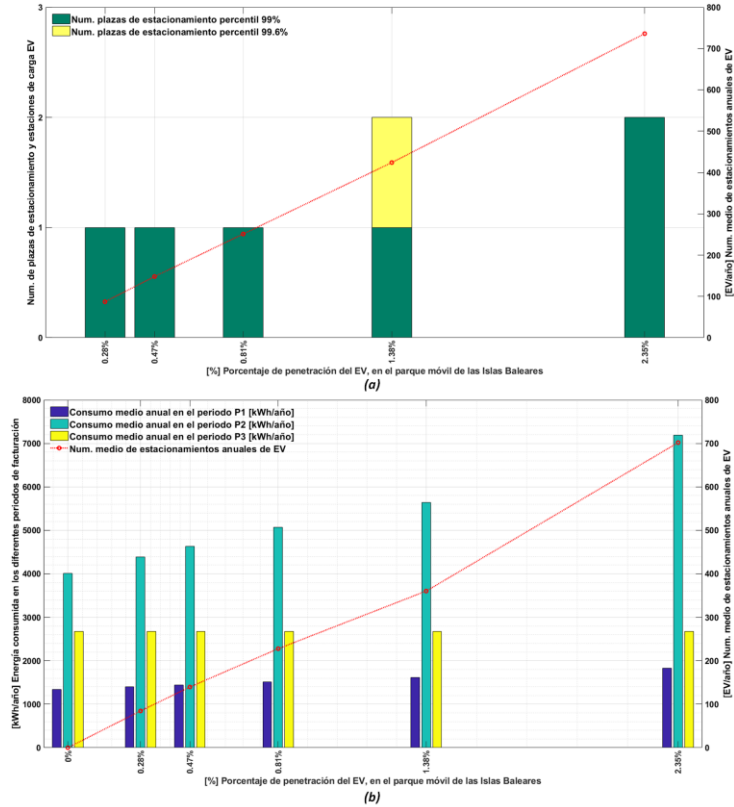


Fig. 5. a: Planificación de los requerimientos de plazas y estaciones de carga de VE. b: Impacto de la penetración del EV sobre la demanda energética, para los diferentes periodos de facturación.

integrarlos en periodos cuarto-horarios y horarios que servirán de demanda energética de referencia, para posteriores análisis. Concretamente, si analizamos la evolución de la demanda energética anual por periodo horario de facturación y el número medio de estacionamientos anuales de EV en función del nivel de penetración del EV y de, Fig. 4b. Donde la demanda energética total (P1+P2+P3) se verá incrementada en tan solo 5 años en un 45,82%. A su vez, la demanda energética actual del periodo P1 (18-22h) se verá incrementada entre un [36-39%], la del periodo P2 (8-18h y 22-24h) entre un [79-82%], y la del periodo P3 (00-08h) se mantendrá prácticamente inalterada. Los resultados obtenidos para el periodo P3 se deben a que el estacionamiento permanece cerrado en el periodo de las 22h a las 07h. Mientras que el mayor incremento de la demanda se dará en el periodo P2, hecho a tener muy presente en el supuesto que se pretenda modificar la contratación energética.

Seguidamente, la metodología estima la demanda energética incorporando los dos escenarios de autoconsumo PV para los diferentes niveles de penetración del VE; obteniendo así las demandas energéticas combinadas por periodo de facturación (cuarto-horarios y horarios), y sus respectivos percentiles P_{99} y picos de la demanda. A fin de

facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, las demandas para los diferentes escenarios de penetración de EV y autoconsumo PV se presentan en la Tabla 6 de forma porcentual con respecto a la demanda base del año 2017 de referencia para este aparcamiento.

Tabla 6. Demanda energética del aparcamiento para los diferentes escenarios de autoconsumo PV

Sin aporte PV/ Penetración del VE	(2017)	(2019)	(2020)	(2021)	(2022)	(2023)
	0%	0,28%	0,47%	0,81%	1,38%	2,35%
Num. Plazas / Estaciones carga	0/0	1/1	1/1	1/1	1/1	2/2
Dem. Anual P1 [kWh]	1.337	4,92%	7,95%	13,14%	20,64%	36,81%
Dem. Anual P2 [kWh]	4.011	9,42%	15,42%	26,44%	40,54%	79,34%
Dem. Anual P3 [kWh]	2.674	0%	0%	0%	0%	0,04%
Dem. Anual Total [kWh]	8.022	5,53%	9,03%	15,41%	23,71%	45,82%
<i>P₉₉</i> Dem. Cuarto-horaria [kWh]	0	1,69	4,60	6,20	7,52	9,88
Pico Dem. Cuarto-horaria [kWh]	0	5,42	7,52	8,28	10,13	14,39
<i>P₉₉</i> Dem. Horaria [kWh]	0	2,85	4,20	4,99	6,39	8,28
[Escenario 1]: 1 x Marquesina PV2-2 → (4,05 kWp)						
Dem. Anual P1 [kWh]	1.337	3,43%	6,65%	9,72%	19,44%	36,61%
Dem. Anual P2 [kWh]	4.011	-38,31%	-33,96%	-23,87%	-11,34%	24,59%
Dem. Anual P3 [kWh]	2.674	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Dem. Anual Total [kWh]	8.022	-18,67%	-15,96%	-10,40%	-2,52%	18,31%
<i>P₉₉</i> Dem. Cuarto-horaria [kWh]	0	1,32	3,22	4,80	6,57	9,10
Pico Dem. Cuarto-horaria [kWh]	0	4,86	5,98	7,52	9,44	13,67
<i>P₉₉</i> Dem. Horaria [kWh]	0	2,15	3,22	4,40	5,41	7,66
[Escenario 2]: 2 x Marquesinas PV2-2 → (8,10 kWp)						
Dem. Anual P1 [kWh]	1.337	3,60%	5,55%	10,26%	19,14%	39,05%
Dem. Anual P2 [kWh]	4.011	-43,50%	-39,65%	-31,91%	-21,83%	6,82%
Dem. Anual P3 [kWh]	2.674	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Dem. Anual Total [kWh]	8.022	-21,24%	-18,98%	-14,33%	-7,81%	9,83%
<i>P₉₉</i> Dem. Cuarto-horaria [kWh]	0	0,92	2,38	4,60	6,19	8,28
Pico Dem. Cuarto-horaria [kWh]	0	4,37	5,40	7,52	8,28	12,34
<i>P₉₉</i> Dem. Horaria [kWh]	0	1,44	2,70	4,03	4,88	7,32

Los resultados presentados muestran a todas luces como la incorporación de generación PV en régimen de autoconsumo tiene un efecto beneficio, reduciendo la demanda energética global. Alcanzando el escenario 1 una reducción de la demanda media del 25,81% para los diferentes niveles de penetración del EV, mientras que el escenario 2 incrementa esta reducción hasta el 29,74%. Concretamente la máxima reducción con respecto a la demanda se ha alcanzado para el escenario 2, con un 21,24% base para

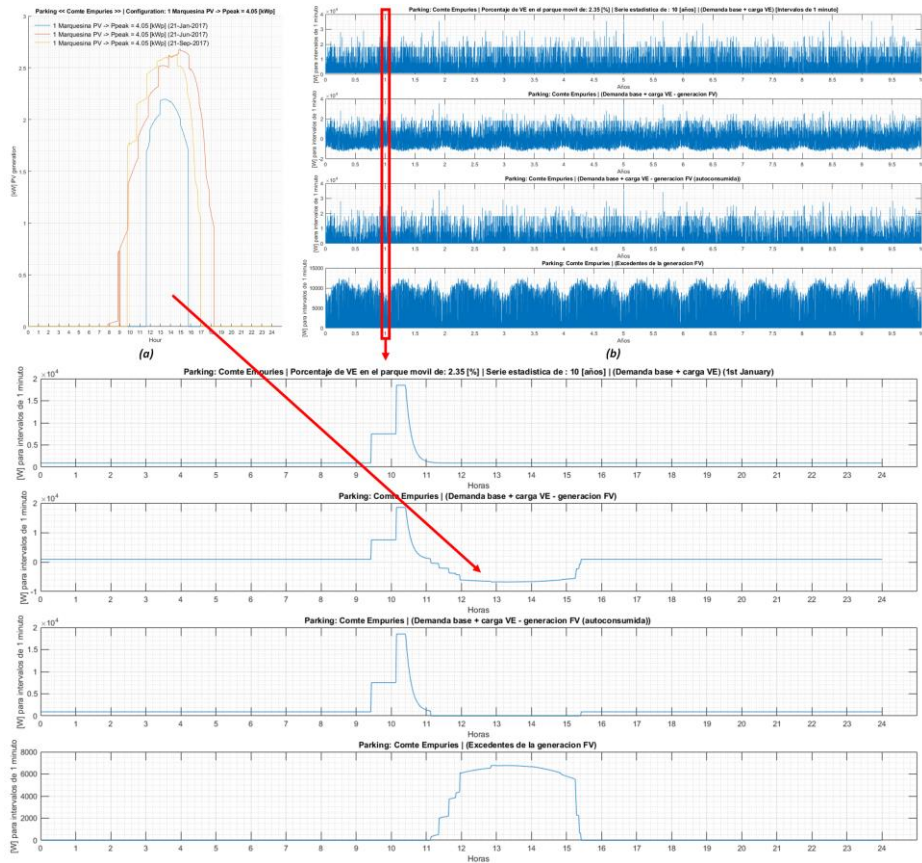


Fig. 6. a: Generación minuto a minuto de la marquesina PV nº 1, para diferentes fechas. b: Demandas y generaciones minuto a minuto para una penetración de 2,35% del EV, y el escenario 2 de autoconsumo PV.

una penetración del EV del 0,28%. Concentrándose la mayor parte de los ahorros energéticos en el periodo P2 (08-18h). A su vez, en el periodo P1 (18h-22h) la aportación solar tan solo alcanza a contener ligeramente el incremento de la demanda. Este hecho se debe principalmente a la ubicación del aparcamiento, confinado entre edificios y con presencia árboles en su parte sur, actualmente despejada, lo que provoca que las sombras limiten el aporte solar al periodo P1, como puede apreciarse en la Fig. 6a. A su vez, para penetraciones $\leq 1\%$ del EV en el parque móvil se obtienen reducciones semejantes de la demanda anual para los dos escenarios de autoconsumo PV. Mientras que a medida que la penetración del EV aumenta $> 1\%$, y por consiguiente la demanda energética aumenta, se aprecia como el escenario 2 de autoconsumo PV aporta mayores reducciones de la demanda energética.

Ahora bien, este hecho está vinculado a que la reducción de la demanda proviene del autoconsumo, es decir de la resta de potencia instantánea demanda con la generada para cada instante de tiempo, como se muestra en la Fig. 6b. Mientras que los excedentes,

energía generada que no pueden auto-consumirse instantáneamente no puede descontarse de la demanda energética global para un determinado periodo de facturación de acuerdo con el RD244/2019, como si sucede con el balance neto en otros países de la UE [30]. En el caso español el excedente se descuenta monetariamente del importe de la demanda hasta que esta se haga cero para un periodo mensual de facturación eléctrica, siendo el balance entre importe de compra de la energía y el de venta completamente asimétrico, como se discutirá en la siguiente sub-sección.

Finalmente, si se analiza la evolución del percentil P_{99} de la demanda energética cuarto-horaria se puede apreciar como con los escenarios 1 y 2 de autoconsumo PV se consigue reducir de media 0,95kWh y 1,60kWh respectivamente del valor de la demanda energética sin aporte PV. Lo cual es sumamente interesante al estar vinculada la demanda cuarto-horaria con la potencia registrada por el maxímetro de la instalación (ubicado en el contador bidireccional, Fig. 1); que en el modelo facturación eléctrica española [26] es usada para determinar el termino de potencia de la instalación, que en el supuesto que sea superior al 105% de la potencia contratada por periodo será el que se facture finalmente.

4.2 Análisis Económico

La determinación del coste de la factura energética que llevará asociado el despliegue de las infraestructuras de carga de VE en modo 3 para diferentes niveles de penetración EV, es la fase previa a estimar los ahorros asociados a los dos escenarios de autogeneración PV contemplados en el presente trabajo. Para posteriormente abordar los costes asociados al despliegue combinado de las infraestructuras de carga y el autoconsumo PV con objeto de evaluar la viabilidad económica de la inversión a realizar.

A partir de la información vinculada con tarifa de accesos que tiene contratada el aparcamiento y las demandas energéticas obtenidas en la sección anterior se ha procedido mediante el sub-módulo de facturación a determinar el importe anual de la facturación energética (agregando las facturaciones mensuales del aparcamiento). Para facilitar el análisis posterior de los costes energéticos evaluados por los diferentes niveles de penetración del EV y que se muestran en la Tabla 7, se ha optado por presentar los importes energéticos desglosados en euros para el escenario *sin aporte de PV*; mientras que los escenarios de autoconsumo PV se presentan de forma porcentual con respecto a los costes energéticos del año 2017, tomado de referencia.

Tabla 7. Facturación energética asociada a la demanda energética del aparcamiento para los escenarios de autoconsumo PV

Sin aporte PV/ Penetración del VE	(2017)	(2019)	(2020)	(2021)	(2022)	(2023)
	0%	0,28%	0,47%	0,81%	1,38%	2,35%
Δ Termino de energía [%]	855,99€	6,01%	9,16%	15,57%	25,59%	51,33%
Δ Termino de potencia [%]	1.258,52€	4,65%	6,59%	9,08%	13,60%	33,66%
Importe factura [€/año]	3.191,18	3.330,95	3.396,40	3.506,01	3.687,42	4.288,72
Δ Importe factura anual [%]	0	4,38%	6,43%	9,87%	15,55%	34,39%

[Escenario 1]: 1 x Marquesina PV2-2 \rightarrow (4,05 kWp)

ΔTermino de energía [%]	855,99€	-30,16%	-27,21%	-21,27%	-11,79%	12,30%
ΔTermino de potencia [%]	1.258,52€	3,11%	4,82%	7,09%	11,26%	29,99%
Importe factura [€/año]	3.191,18	2.923,31	2.982,63	3.083,46	3.252,99	3.814,22
ΔImporte factura [%]	0	-8,39%	-6,54%	-3,38%	1,94%	19,52%
Importe Excedentes [€/año]	0	86,58	85,58	83,46	80,93	73,26
Importe Energía regalada [€/año]	0	0	0	0	0	0
[Escenario 2]: 2 x Marquesinas PV2-2 → (8,10 kWp)						
ΔTermino de energía [%]	855,99€	-50,19%	-47,18%	-41,16%	-33,58%	-13,25%
ΔTermino de potencia [%]	1.258,52€	2,64%	3,08%	7,02%	10,39%	25,85%
Importe factura [€/año]	3.191,18	2.716,22	2.755,70	2.883,65	3.019,29	3.486,08
ΔImporte factura [%]	0	-14,88%	-13,65%	-9,64%	-5,39%	9,24%
Importe Excedentes [€/año]	0	236,51	232,82	228,57	221,84	204,92
Importe Energía regalada [€/año]	0	0	0	0	0	0

Los resultados que se presentan en la tabla anterior muestran a todas luces como, incluso pequeñas penetraciones del EV en el parque móvil implicaran argumentos significativos en el importe de la factura energética. Por ejemplo, en tan solo cinco años, 2023, la factura energética del aparcamiento se verá incrementada en un 34,39% con solo un 2,35% de penetración de EV. Concretamente, el escenario 1 de autoconsumo PV alcanzara de media un ahorro de la factura energética para los diferentes niveles de penetración del EV del 13,25%, mientras que para el escenario 2 el ahorro aumenta hasta el 20,08%. A su vez se aprecia como el incremento del coste de los términos de energía y potencia son prácticamente idénticos. Esto se debe a que el término de potencia de la factura energética crece al superar la demanda cuarto-horaria la potencia contratada para los diferentes periodos. Que estadísticamente es más probable que se dé al aumentar el número de medio de cargas/estacionamientos de EV.

Con respecto al impacto del autoconsumo PV sobre la facturación energética se parecía claramente una drástica reducción del termino de energía en la facturación para los dos escenarios de autoconsumo PV. Alcanzando para el escenario 2 una reducción del 50% del termino de energía respecto al del año de referencia. Mientras que el impacto sobre el termino de potencia es prácticamente imperceptible para niveles $\leq 1,38\%$ de penetración del EV, conteniendo dicho termino en un pequeño porcentaje. Ahora bien, para niveles $> 1,38\%$ de penetración del EV el impacto sobre el termino de potencia es más visible. Aunque en ningún caso se alcanzan reducir estos valores al nivel del año de referencia. Este hecho se debe a que tanto el autoconsumo PV como el estacionamiento y carga de los EV son procesos estocásticos, que van variando aleatoriamente con el tiempo, lo que implica que gran parte del tiempo se supere la potencia contratada para determinados periodos de facturación.

Con respecto a la idoneidad de los dos escenarios PV, ninguno de ellos genera energía suficiente para ningún nivel de penetración del EV para alcanzar a compensar el término de energía mensual, y por ello verse obligado a regalar los excedentes de generación a la red de distribución. Ahora bien, el escenario 1 de autoconsumo PV presenta

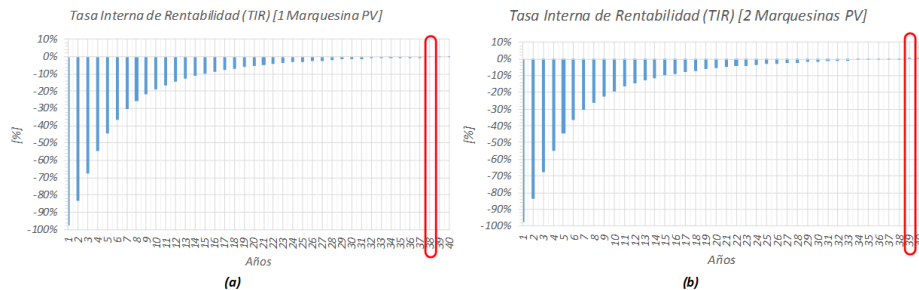


Fig. 7. a: Tasa Interna de Rentabilidad para el escenario 1 de autoconsumo PV. b: Tasa Interna de Rentabilidad para el escenario 2 de autoconsumo PV.

unos importes anuales por los excedentes PV, que no han podido ser autoconsumidos, muy inferiores a los del escenario 2. Esto hace pensar que el escenario 1 es a priori mucho más óptimo que no el escenario 2. Debido a que la modalidad de autoconsumo con excedentes acogidos a compensación, recogido en el RD244/2019, está enfocado al autoconsumo directo planteando una compensación asimétrica para los excedentes de generación. Que, a la práctica conlleva tener que se tengan que generar 3 kWh para compensar 1 kWh de demanda no auto-consumida. Lo que implica que para instalaciones con una demanda base pequeña, como es el caso del aparcamiento analizado, no tenga sentido instalar gran cantidad generación PV, ya que difícilmente podrá ser absorbida por la instalación, y la venta de excedentes no parece a priori económicamente interesante.

Tabla 8. Detalle de los costes asociados al despliegue de las infraestructuras de carga y de autoconsumo PV.

Escenarios	1 x Marquesina PV2-2	2 x Marquesina PV2-2
Importe Marquesina + estación carga [€]	12.395,62	21.468,84
Importe Obra Civil [€]	2.528,74	2.807,48
Importe Instalación Eléctrica [€]	1.800,00	1.800,00
Otros (Transporte y Legalización) [€]	1.000,00	2.000,00
Importe de la Inversión [€]	17.724,36	28.076,32

Una vez, evaluados los ahorros asociados para los dos escenarios de autoconsumo PV se procederá a analizar la viabilidad económica de cada uno de ellos. Donde se espera que los ahorros energéticos permitan sufragar la inversión de la instalación PV y de las estaciones de carga. Concretamente la inversión a realizar para cada uno de los escenarios se presenta desglosada en la Tabla 8. A partir del importe de la inversión y los ahorros presentados en la Tabla 7 se evaluará la *Tasa Interna de Retorno* (TIR) con objeto de estimar la viabilidad económica del despliegue de los dos escenarios de autoconsumo PV. Los resultados obtenidos del TIR para los dos escenarios de autoconsumo PV para un periodo de 40 años, se presentan en la Fig. 7. En dicha figura se

apreciar cómo se requieren 38 años para amortizar el escenario 1 de autoconsumo PV y 39 años para amortizar el escenario 2. Lo que indica a todas luces que el despliegue de estas infraestructuras a cargo de los ahorros energéticos es inviable. Lo que resulta chocante si se comparan estos periodos con los de las plantas de generación PV conectadas a red que están actualmente entre los 5 y 8 años.

5 Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una metodología para la planificación de las infraestructuras de carga de los EV y la estimación de su demanda energética asociada. Que ha servido de base para la estimación del impacto económico y energético que conllevaría la incorporación de diferentes escenarios de autoconsumo PV para dar soporte a la carga de los EV, en el periodo de los próximos 5 años, en el aparcamiento público de “*Compte d’Empuries*” operado en régimen de rotación por la SMAP, y ubicado en el centro de Palma de Mallorca. Para ello, inicialmente se ha abordado una metodología estadística para la previsión de la serie temporal de penetraciones del EV en el parque móvil, para los próximos 5 años; obteniendo valores de penetración comprendidos entre [0,28-2,35%] para dicho periodo. Que han servido de datos de partida para la estimación de la demanda energética del aparcamiento, para los dos escenarios de autoconsumo PV. Para finalmente determinar sus costes energéticos asociados.

Los resultados obtenidos muestran como la incorporación de generación PV en régimen de autoconsumo tiene un efecto beneficio al reducir la demanda energética global compensando en gran medida el aumento de demanda energética vinculada con la carga del EV. Donde el autoconsumo PV de 4,05kWp ha alcanzado una reducción de la demanda media del 25,81% para los diferentes niveles de penetración del EV, mientras que el autoconsumo PV de 8,10kWp ha alcanzado una reducción de la demanda media del 29,74%. Concentrándose la mayor parte de los ahorros en el periodo de las 8-18h, donde se concentra la generación PV.

A su vez, análisis del impacto económico de la penetración del EV han mostrado como bajos niveles de penetración del EV llevan asociados incrementos significativos de los costes energéticos. Donde una penetración del 2,35% del EV conllevará un incremento del 34,39% de la factura energética. A su vez, el autoconsumo PV de 4,05kWp alcanzará de media un ahorro del 13,25% de la factura energética para los diferentes niveles de penetración del EV, mientras que el autoconsumo PV de 8,10kWp el ahorro crecerá hasta el 20,08%. Concretamente los resultados muestran como el autoconsumo PV resulta ser un mecanismo efectivo para mitigar el incremento del coste de la factura energética, impactando esencialmente sobre el término de energía, al menos para los niveles actuales de penetración del EV. A su vez, los resultados arrojan que el escenario de autoconsumo más interesante, para un aparcamiento con una demanda base pequeña como es el caso, es el compuesto por tan solo marquesina PV al no tener sentido práctico instalar mayores potencias PV. Ello debido a que modalidad de autoconsumo con excedentes acogidos a compensación, recogido en el RD244/2019, está enfocada al autoconsumo directo penalizando los excedentes de generación mediante una compensación asimétrica de la generación frente a la demanda.

Finalmente, se ha analizado la viabilidad de sufragar la inversión para el despliegue de los dos escenarios de autoconsumo PV en base a los ahorros energéticos; resultando en ambos casos inviable. Por ello, el despliegue de este tipo de infraestructuras solo será viable mediante ayudas o inversiones públicas encaminadas al despliegue de una infraestructura pública de estaciones de carga suficiente para dar soporte a transición hacia una movilidad sostenible.

6 Agradecimientos

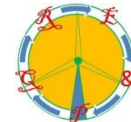
Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España (MINECO) en virtud de los proyectos TEC2017-84877-R y ENE2015-68339-R, y por la UE a través de los Fondos Regionales de Desarrollo Europeo (FEDER). Así como por el programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), bajo el proyecto de red 518RT0558 titulado *Ciudades Inteligentes Totalmente Integrales, Eficientes y Sostenibles* (CITIES).

Referencias

1. UNFCCC Secretariat (2015) Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions, FCCC/CP/2015/7. Paris
2. IRENA, IEA (2017) Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy Transition
3. DOE, EIA, Office of Energy Analysis (2016) International Energy Outlook 2016, With Projections to 2040. Energy Dept.; Energy Information Administration; Office of Energy Analysis
4. Fazelpour F, Vafaeipour M, Rahbari O, Rosen MA (2014) Intelligent optimization to integrate a plug-in hybrid electric vehicle smart parking lot with renewable energy resources and enhance grid characteristics. *Energy Convers Manag* 77:250–261. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.006>
5. Amini MH, Boroojeni KG, Cheng Jian Wang, et al (2016) Effect of electric vehicle parking lots' charging demand as dispatchable loads on power systems loss. In: 2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). IEEE, pp 0499–0503
6. Tulpule PJ, Marano V, Yurkovich S, Rizzoni G (2013) Economic and environmental impacts of a PV powered workplace parking garage charging station. *Appl Energy* 108:323–332. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.068>
7. Kintner-Meyer M, Schneider K, Pratt R (2006) Impact assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional US power grids. Part 1: Technical analysis
8. Duvall M Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs): greenhouse gas emissions and air quality impacts of PHEVs. In: The PHEV 2007 conference : where the grid meets the road. Winnipeg, MB (Canada)
9. Alsabaan M, Alasmary W, Albasir A, Naik K (2013) Vehicular Networks for a Greener Environment: A Survey. *IEEE Commun Surv Tutor* 15:1372–1388.

- <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.101912.00184>
10. IEA – International Energy Agency (2019) Global EV Outlook 2019: Scaling up the transition to electric mobility
 11. Levinson RS, West TH (2018) Impact of public electric vehicle charging infrastructure. *Transp Res Part D Transp Environ* 64:158–177. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.006>
 12. Wood EW, Rames CL, Muratori M, et al (2017) National Plug-In Electric Vehicle Infrastructure Analysis. Golden, CO (United States)
 13. Nunes P, Figueiredo R, Brito MC (2016) The use of parking lots to solar-charge electric vehicles. *Renew Sustain Energy Rev* 66:679–693. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.015>
 14. Nunes P, Farias T, Brito MC (2015) Day charging electric vehicles with excess solar electricity for a sustainable energy system. *Energy* 80:263–274. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.11.069>
 15. Fattori F, Anglani N, Muliere G (2014) Combining photovoltaic energy with electric vehicles, smart charging and vehicle-to-grid. *Sol Energy* 110:438–451. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.034>
 16. Poullikkas A (2015) Sustainable options for electric vehicle technologies. *Renew Sustain Energy Rev* 41:1277–1287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.016>
 17. Romo R, Micheloud O (2015) Power quality of actual grids with plug-in electric vehicles in presence of renewables and micro-grids. *Renew Sustain Energy Rev* 46:189–200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.014>
 18. Amini MH, Moghaddam MP, Karabasoglu O (2017) Simultaneous allocation of electric vehicles' parking lots and distributed renewable resources in smart power distribution networks. *Sustain Cities Soc* 28:332–342. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.006>
 19. Ministerio para la Transición Ecológica (2019) Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. Madrid, Spain
 20. Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC) (2017) Informe anual ANFAC 2016. Madrid
 21. Box GEP, Jenkins GM, Reinsel GC, Ljung GM (2015) *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th Edition. Wiley
 22. Dirección General de Trafico (DGT) (2016) Parque de vehículos - Tablas Auxiliares Anuario - 2016. Madrid
 23. SAE (2010) SAE J1772: Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler
 24. IEC (2011) IEC 62196-2 ed1.0: Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles
 25. IEC (2010) IEC 61851-1 ed2.0: Electric vehicle conductive charging system – Parts 1, 21, 23, 24
 26. Blanco-Muriel M, Alarcón-Padilla DC, López-Moratalla T, Lara-Coira M (2001) Computing the solar vector. *Sol Energy* 70:431–441. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0)
 27. Duffie JA, Beckman WA (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*

28. King DL, Boyson WE, Kratochvil JA, et al (2004) Photovoltaic Array Performance Model. In: Sandia National Laboratories. pp 2004–3535
29. Dobos A (2014) PVWatts Version 5 Manual. Golden, CO (United States)
30. Ministerio de Industria Energía y Turismo (2014) Resolución de 23 de mayo de 2014, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se establece el contenido mínimo y el modelo de factura de electricidad. Madrid, Spain



Energetic and economic analysis of the Electric Vehicles charge impacts on public parking lots

E. Alcover, B. Mas, V. Martínez-Moll, J.L. Rosselló, M. Roca and V. Canals

University of the Balearic Islands, Palma, Ctra. Valldemossa km 7.5, Campus UIB,
Balearic Islands E-07122, Spain
Phone/Fax number: +34 971 173426, e-mail: enric.alcover@uib.cat, v.canals@uib.es

Abstract.

This work addresses the energy and economic impact of electric vehicle (EV) charging services in public parking lots; related to the evolution of EV penetration in the Spanish passenger car fleet in the next 5 years. All this in the framework of the transition towards green and smart mobility. A statistical methodology is developed to plan the number of PEV charging points to deploy in public parking lots, estimate their energy demand and photovoltaic self-consumption facilities generation (in minute intervals), and finally calculate the monthly energy costs. Specifically, this methodology is used to analyze the evolution of operating costs and the investment costs due to the EV charging services of a public parking lot located in a centric administrative and commercial area of Palma de Mallorca, Spain.

Key words.

Pluggable electric vehicle, Mobility, Monte Carlo method, Energy economics, Artificial intelligence

1. Introduction

In order to reduce the limit long-term increase in average planet temperature, it is necessary to reduce the emissions of CO₂ and other greenhouse gases (GHG) emitted by human activities. The goal of CO₂ emissions reduction of 70% by 2050 compared to 2015 [1], requires the transformation of the global energy system. Specially the passenger and freight transport sector, that represents the 25% of world energy consumption [2]. For that, a lot of countries are looking toward a substitution of the traditional combustion vehicles for greener alternatives. Being the most extended alternatives the plug-in hybrid vehicles (PHEV) and pure battery electric vehicles (BEV) that seems to be more respectful with the environment and presents lower operational costs. Nonetheless, this energetic model transformation requires of the planification of a charging infrastructure that can satisfy the increasing energy demand of the PEV charging [3].

Although the electric mobility and the deployment of its charging infrastructure has been widely studied [4], no studies have addressed to the planification of the charging facilities in a public parking lots with real mobility patterns, which is essential for enabling the planification of public investment to drive penetration of electric mobility [5].

The methodology proposed in this work consist on a Monte-Carlo based statistical method that obtains the minute by minute PEV occupancy of a public car park operated in rotation regime from the data related to the individual car billing (time of entry and exit, amount, duration) of the reference year (2017). The developed tool determines the number of charging points that must be installed in the parking in order to satisfy the 99% or the 99.6% of PEV charging attempts, in a given period. Next, the energy demand associated to the PEV charging is estimated with the methodology taking into account multiple factors such as the penetration of PEV in the interest area car fleet, the charge characteristics of the different PEV models, and the parking patterns of a given public parking lot. Finally, the energy and the operational costs are determined.

Specifically, in this work the proposed methodology is applied for analysing the operational costs and the investment needed to satisfy the EV charging services of “Via Roma” public parking lot located in a centric administrative and commercial area of Palma de Mallorca (Balearic Islands), Spain.

2. Evolution of EV penetration

In order to forecast the EV energy demand, plan the charging infrastructures needed and evaluate its economic impact, it is essential to know at least the percentage of EV penetration in the area of interest. However, no official Spanish national or regional forecasts are available on this topic. Faced with this situation we proceeded to forecast the implantation of the EV in the passenger car fleet

at the Balearic Islands for the period (2019-2023). The state of the electric mobility market in the Balearic Islands is very similar to the mean of Spain, then the Spanish sales evolution can be extrapolated to the local behaviour. For this, it has been used two main input data sources, as the historical data of EVs monthly sales at national level and historical data of the passenger car fleet at the Balearic Islands, obtained from the *Direcció General de Tràfic* (DGT) [6], and EV sales time series at national level for the period from 01/01/2014 to 31/12/2019, provided by the Spanish Association of Automobile Manufacturers and Trucks (ANFAC) [7]. Based on the Spanish historic monthly electric vehicle sales time series, a statistical model of the Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) family was implemented in MATLAB to forecast monthly electric vehicle sales through December 2023. Specifically, the implemented model is a Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average (SARIMA) [8], as in (1), in order to incorporate the seasonality effect of the vehicle sales throughout the year in the model. Once the time series has been analysed and its basic components identified, the parameters of the model have been fixed with $\phi_0=0$, a number of differences $d=1$ in order to make the time series stationary, a non-seasonal moving average term of order $q=1$, and finally a seasonal term of period 12 (months) and unit order of the Seasonal Moving Average (SMA=1), period corresponding to one year.

$$Y_t = \left(\phi_0 + \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta^d Y_{t-i} \right) + \left(Y_t - \Delta^d Y_t \right) + \left(\varepsilon_t - \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \right) \quad (1)$$

Finally, based on the estimation of the electricity market share and the mean values of the volume of the Balearic Islands' passenger car fleet, the number of registrations and the number of casualties, all of them obtained from the DGT website [6], the penetration of the electric vehicle in the car fleet of the Balearic Islands has been estimated for the period 2019-2023 (Table I).

Table I. - Forecasted EV penetration for the period (2019-2023), at the Balearic Islands.

Year	EV in circulation at the Balearic Islands	EV penetration in the passenger car fleet
2019	1.817	0,28%
2020	3.117	0,47%
2021	5.331	0,81%
2022	9.100	1,38%
2023	15.516	2,35%

The models that make up the EV fleet used for the Monte Carlo simulations were obtained from the analysis of annual sales at the Spanish level obtained from IDEAUTO [9] in the period (2014-2019). Finally, the percentages of each model obtained at the state level have been extrapolated to the local fleet to be simulated. This fleet is made up of the 12 best-selling PEV models, 6 PHEV and 6 BEV; Always maintaining the relationship between BEV and PHEV.

3. Methodology

The proposed methodology focuses on analyzing AC slow and semi-fast PEV charge [2,3-22kW] in public parking

lots operated in rotation regime, for small PEV penetration levels [0-2,35%] as today. The methodology has been implemented as a tool in MATLAB®. In turn, the tools are made up of 7 sub-modules that implement specific parts of the developed methodology and it incorporates a Monte Carlo algorithm at its core, which will perform a minute-by-minute simulation of the parking lot (inputs and outputs of electric vehicles, energy demand and PV generation) for a time series of ten or more repetitions of the reference year (2018). Each of the sub-modules is presented below:

Analysis and Modeling of Parking Occupancy

This sub-module is in charge of adjusting a statistical distribution of the two main patterns that defines the behaviour of the parking from the historical billing data obtained from the individual tickets of the reference year. The first one is the parking periods distribution, that has been obtained from the histogram of parking durations, constructed for 10 minute intervals in a range of [0-5.000] minutes. The shape of the obtained histogram follows a continuous distribution Weibull's distribution $We(x; \lambda, k)$, as (2).

$$f(x; \lambda; k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

There are two parameters that define the Weibull distribution: the shape parameter $k > 0$ and the scale parameter of the distribution $\lambda > 0$. These parameters are being determined using the least squares method. The second parking pattern is the hourly mean occupancy that is obtained from the mean number of vehicles that start and end their parking each hour throughout a certain period.

Load demand curve generator

This sub-module is in charge to generate the charging curves of the PEV fleet, from the power grid point of view. The vehicles that conform this virtual fleet are loaded from an external file (.csv) that has a PEV model in each column and its information: useful battery power, absolute penetration percentage of the model, the time until full charge, and the nominal charging power.

To generate the demand curve of each PEV entering on the parking, the methodology emulates the demand associated with battery charge, using a two-step function. A first one at constant nominal power ($P_{car}(t_i) = P_{car_nom}/60$) and the second one at variable power, that decreases exponentially ($P_{car}(t_i) = P_{car_nom} e^{-at}/60$); which starts when the remaining energy until full charge is less than the energy that would be charged at nominal power in one hour, the method adjusts the parameter "a" of the negative exponential function of the nominal power by numerical integration.

PEV Occupancy Generator

This sub-module determines the PEV occupancy from the hourly mean occupation of the analysed parking and the EV penetration in the local car fleet, introducing a stochastic factor in order to reproduce the real behaviour of the parking energy demand. For that, the sub-module generates as many random numbers uniformly distributed $U(0,1)$ as vehicles expected to enter into the parking at a certain hour interval, if the random generated number is lower than the PEV penetration, the vehicle is assumed to be electric. Then, for each PEV that enters into the garage, three more random numbers are generated. The first is a uniformly random number $U(1,60)$ that determines the entering minute along the hour interval. Then, another uniformly random number $U(0,1)$ will determine the model of the PEV. Finally, one random number that follows the Weibull distribution " $t_{est}=W_e(\lambda,k,U(0,1))$ " and is used to fix the time duration of the parking. Finally, this sub-module determines the EV charge demand percentiles 99% and 99,6%, of all the evaluation period, in order to set the optimum number of charging points needed at the parking.

Hourly base demand generator

The power demand of a public parking lot is essentially related to the lighting and ventilation systems. The lighting depends on the parking surface and its location (opening periods to the public), meanwhile the ventilation system depends on the parking's surface/volume, because it is used for taking care of evacuating the combustion gases of vehicles in circulation, in addition to renewing the interior air.

The methodology used to evaluate the hourly mean base electric demand consists of accounting, from the electric bills, the energy consumed for the different pricing periods throughout a year. This task is performed by the sub-module loading an external file (.csv) with the monthly billing of the studied parking, incorporating for each one a row with all the information of the historical invoices of the electrical supply for an access toll 3.0A ($P_{cont} \geq 15kW @ 400V_{AC}$), where the details of the bill are found.

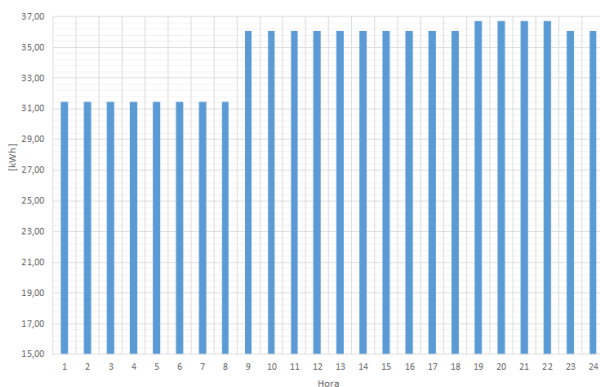


Fig. 1. Average hourly consume of the analysed public parking.

Real occupation and energy demand generator

Once the number of PEV charging points has been determined, this sub-module is in charge to determine the real demand of the parking with the limitation of the number of charging points of the facility established. This is done generating two one-dimensional matrixes, with as many elements as minutes in the evaluation period. The first one is used to store the real minute by minute PEV occupancy, and is going to increase its value by one between the entering minute and its exit if the number of parked PEV is less than the already fixed PEV charging lots. The second matrix is going to increase its value with the instantaneous power demand of the PEV charging. Finally, this module merges the different energy demands (PEV charging demand and hourly base demand) for its further analyse.

Demand Integrator

This sub-module is in charge to integrate the energy consumption in periods of 15 minutes (quarter-hourly) and hourly. This information is very relevant to evaluate the energy billing for the economic analysis due to the maximeter term (integrated in the power term), on the energy bill, that is related to the quarter-hourly demand.

Energy billing

This last sub-module determines the monthly energy bill [10] of a given public parking lot. The billing of the vast majority of the public parking's with rotation lots uses a 3.0A access fee. In order to calculate the energy bill, this system uses always hourly discrimination in three periods: P1 (rush), P2 (flat) and P3 (valley), with different energy price for each period. There are several term that contribute to the final energy price.

The first term is the power term, that represent the cost of the reserve of availability of the hired power in the electrical system. Although the hired power can be different for each of the three billing periods, it must always be at least 15kW. Then the power term is obtained multiplying the hired power [kW] by the cost at each period [$\text{€/kW}_{\text{year}}$] for each period, as (3).

$$Term_{pow} = (Pow_{p1} \cdot cost_{p1} + Pow_{p2} \cdot cost_{p2} + Pow_{p3} \cdot cost_{p3}) \cdot \frac{\#days}{365} \quad (3)$$

The final cost of the power term is, in fact, determined by the maximeter that is responsible of measuring the quarter-hourly consume of the installation. Then, if the power is greater than 105% of the hired power a penalty corresponding to twice the difference between the recorded value and the value corresponding to 105% of the contracted power. Then, the active energy that is calculated by multiplying the energy demand hourly integrated [kWh] at each billing period for the price of electricity [€/kWh] in such period. Then, the energy tax is calculated after adding the previous terms. This tax [%] is applied before the VAT is charged, and its amount is determined by the governmental authorities. It is calculated by (4).

$$Tax_{electr} = (Cost_{electricity}) \cdot E_tax[\%] \quad (4)$$

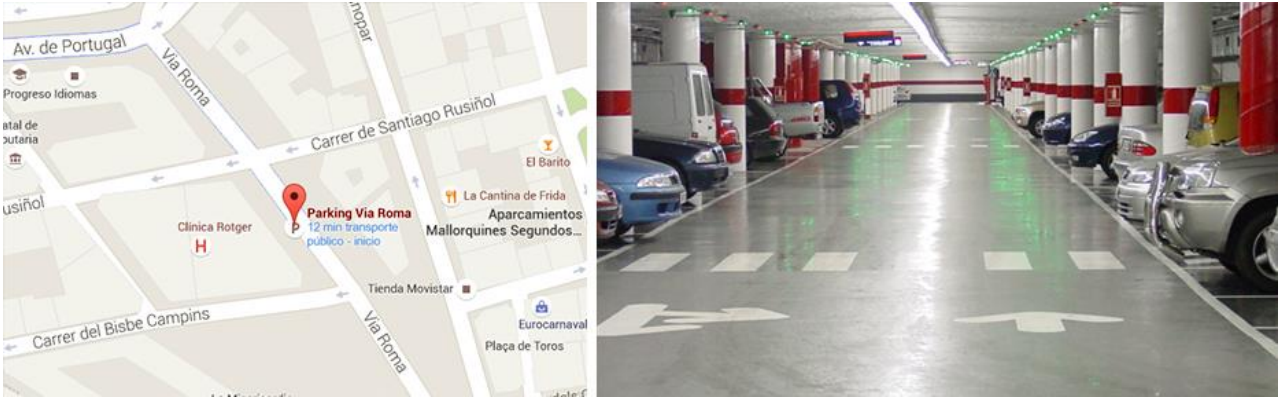


Fig.2. Location of the public parking of Via Roma at Palma of Majorca object of the present study.

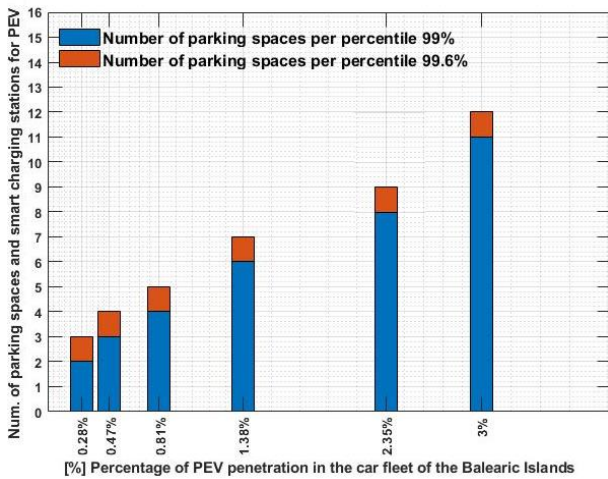


Fig.3. Forecast of the evolution of the needed parking spaces and intelligent charging stations for PEV. In blue the parking spaces needed to cover 99% of PEV parking attempts, and in red for covering the 99,6%.

Finally, the rental of measuring equipment and its maintenance is also billed. The cost is fixed by the electricity distributor and is proportional to the number of days in the billing period.

4. Results

The developed methodology has been applied to the “Via Roma” public parking lot located in a prime location of the city of Palma of Majorca (Fig. 2); specifically, on the way of one of the direct entrances of Palma of Majorca city centre. Currently, this parking has 766 parking lots, of which 472 are exploited in rotation regime with an average volume of 484.604 rotations per year. It is open 24h of the day, the 365 days of the year.

This public parking lot has contracted a 3.0A access fee with 125 kW contracted power for each of the three billing periods (P1 | P2 | P3) and it has an annual average energy consumption of 303.420,97 kWh/year and currently has 5 parking spaces dedicated exclusively to electric vehicles, equipped with intelligent charging points (SAVE).

Load infrastructure planning

The planning of EV charge infrastructure deployment is the preliminary phase to any energy and / or economic analysis that is to be carried out, with the proposed methodology. For this reason, the number of smart charging stations and electric vehicle parking spaces needed to cover the percentiles 99 and 99,6 percentiles of the expected number of EV parking attempts has been estimated for the next 5 years (2019-2023); according to the EV penetration forecast previously for the Balearic Islands car fleet. It should be noted that EV penetration values have been additionally included beyond 2023 using data from an IEA study [11] which states that to achieve the goals of the scenario increase the average temperature of the planet no higher at 2°C [12] , it would be necessary to replace 10% of light passenger vehicles for electric vehicles by 2030.

At the same time, it can be seen in Fig., how the number of recharging infrastructures (N_{infra_EV}) needed to support the electric vehicle grows linearly with the penetration percentage of the electric vehicle (p_{EV}). Being the relationship between them (5):

$$N_{infra_EV} = 2,4997 \cdot p_{EV} + 1,7709 \quad R^2 = 0,9937 \quad (5)$$

Once the requirements for recharging infrastructures for the car park have been assessed, in the next 5 years, the requirements for new parking spaces and intelligent recharging points (SAVE) that will need to be installed annually is obtained. In view of the fact that in this car park there are already 5 parking spaces reserved for EVs equipped with intelligent charging stations, type SAVE, model INGEREV Garage GW332; capable of withstanding the slow and semi-fast charging modes as fundamental to provide broad support for the main charging modes that the major electric vehicle manufacturers incorporate. It is safe to say that the need for new deployment infrastructure will be relatively small.

Energy analysis

The proposed methodology is going to determine the total amount of energy demand of the parking minute by minute, summing up the base demand and the demand of

the EV charging, that depends on the EV penetration level. To subsequently integrate them into quarterly and hourly periods to determine the electricity consumption in the different billing periods of a 3.0A access toll, described above, and which will be used for further analysis. Then, the mean annual demand for each of the three billing periods will be calculated.

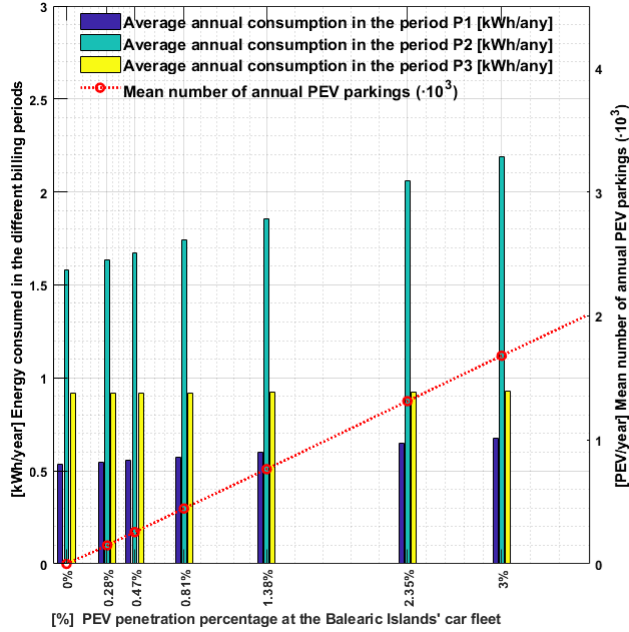


Fig.4. Evolution of energy demand by billing periods related with the EV percentage of penetration.

As can be seen in the Fig. 4, the increase in average annual demand will be concentrated in the turnover period (plan) P2 (8-18h and 22-24h) and to a lesser extent in the period (peak) P1 (18-22h). While in the period (valley) P3 (0-8h) the increase in demand will be virtually negligible, due to the low occupancy number and the little amount of rotations in this period.

Comparing the energy demand with the reference year, it can be seen how the total energy demand (P1 + P2 + P3) will be increased by 30,73% in just 5 years. While the energy demand of period P1 will be increased by 34,60%, that of period P2 will be increased by 46,69%, and that of period P3 will only be increased by an imperceptible 1%.

At the same time, if we analyse the increase in global demand (P1 + P2 + P3) annually based on the evolution of the percentage of penetration of the electric vehicle p_{EV} over the next 5 years, we can see how for this car park the demand will grow linearly with the penetration of the EV following the following expression (6).

$$\Delta Pot_{Global} = 13,142 \cdot p_{EV} [\%] \quad | \quad R^2 = 0,999 \quad (6)$$

Economic analysis

The determination of the cost of the energy bill that will be associated with the deployment of EV charging

infrastructures for different levels of EV penetration, is the preliminary phase to be able to analyse the increases in energy costs compared to the reference year (2018). In later sections they will be used to address the costs associated with the deployment of recharging infrastructure in order to assess the operating costs of the energy recharging service.

To address the analysis of the evolution of energy costs associated with the increase in energy demand in the car park we will start from the energy costs of the reference year (2018), which essentially include the operating costs of the car park as they are lighting, ventilation, etc. Where the results obtained show under any doubt how even small penetrations of the EV in the mobile fleet will involve very significant increases in the amount of the energy bill. For example, in just five years, 2023, the energy bill of the car park will be increased by 24,78% with only 2,35% penetration of the electric vehicle.

It can be said that increases in energy costs will only be linked to the energy term; while the power term will remain constant. This is due to the fact that the power demanded quarterly will never exceed that contracted, and therefore the maximum of the installation will not change the amount of the monthly power term.

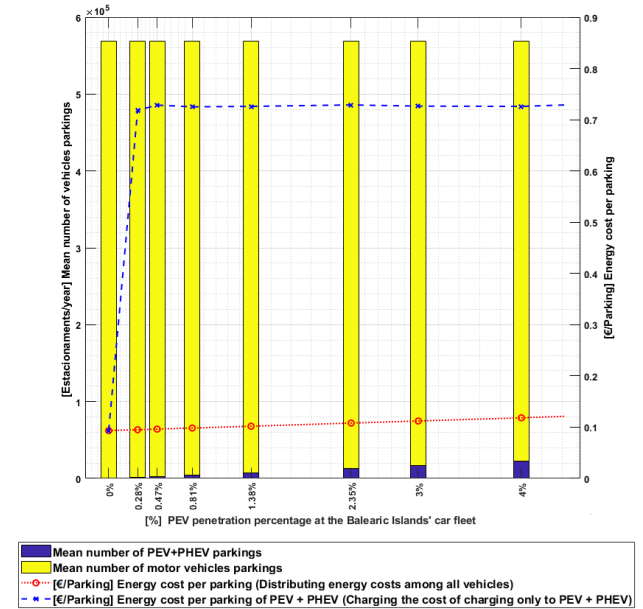


Fig.5. Evolution of the associated energy costs for vehicle parking related with the EV percentage of penetration.

Finally, it will be analysed the evolution of energy costs for vehicle parking (electric and combustion) as a function of the percentage of penetration of the EV. Fig.5 shows the increase in energy costs linked to the electric vehicle parking recharging service as a function of the EV penetration percentage. Which have been calculated using the following equation (7):

$$Cost_{Parking} = \frac{Amount_{Energy_{\%}}}{N_{Parking_{total_{\%}}}} + \frac{(Amount_{Energy_{\%}} - Amount_{Energy_{\%}})}{N_{Parking_{EV_{\%}}}} \quad (7)$$

As can be seen, the annual energy cost per parking of an EV for a certain percentage of penetration includes the base energy costs of the parking lot (ventilation, lighting...) in addition to the extra cost on the energy bill associated with the recharging service divided by the average annual number of electric vehicle parking lots. The results obtained show that for the next 5 years, the parking prices will be kept in a range [0,10-0,13] Euros per parking. Where the evolution costs for parking, red line in Fig.5, will grow linearly in this parking, following the expression (8):

$$Cost_{\left(\frac{\text{Energy}}{\text{Parking}}\right)} = 0,014 \cdot p_{EV} + 0,0969 \left[\frac{\text{€}}{\text{Parking}} \right] R^2 = 0,995 \quad (8)$$

While the energy costs associated with each electric vehicle parking lot will remain relatively constant at around 1,20 €. To grow from 3% of a penetration of the electric vehicle in the fleet of cars of the Balearic Islands.

Besides the cost of the energy consumption of the public parking, it is important to make an estimation of the economic aspects associated with the adaptation of the facilities in order to achieve the energy charging service. Then, the investment costs to deploy the new charge stations to provide the charge service, including material and labour force, amounts to 15.851,63€; the investment detail is summarized in Table II. As it can be appreciated, in the analysed case there are already 5 smart charging point (SAVE) installed, then, the investment for reaching the 8 desired charging point is less than in other similar equipment. The total energetic costs caused by the EV energy demand are also obtained, with a total increase on the electricity bill of 29.728,22 € in the next 5 years.

Table II. - Investments related to the infrastructures deployment to provide the EV charge service, in the period (2019-2023).

Concept	Quantity	Amount [€]
EV Charging equipment + IP communications	3	13.698,38
Electrical installations	---	6.067,50
Engineering and legalization	1	1.529,25
Parking space signalling	3	624
Total:		15.851,63 €

5. Conclusions

This work presents a complete methodology to forecast the impacts of the increase of EV penetration on parking that offers recharging services, being a useful tool for the analyse of any parking in rotation regime, from only the data of the bills of a reference year.

As seen in this study the impacts on the energy consume due to EV charging service is not negligible, with an energy demand increased by 30,73% with only a 2,35% of EV penetration on car fleet. It should also be noted that the energy demand is concentrated during the two periods of the day (P1 and P2), while in the night (P3) the energy demand increase is imperceptible. This fact suggests the possibility of balancing the increase on the energy demand

through PV facilities near the parking lots, decreasing, in such way, thus helping to decongest the electricity grid. Given the actual scenario, the increase on the energy demand will be traduced to an important increase on the electric billing of the analysed facility. In addition, an important investment has to be done to adapt the public parking to the new needs of the private cars customer's, although this investment can be done in different phases, until reaching the forecasted amount in the next 5 years.

Acknowledgement

This work was supported in part by the Spanish Ministry of Economic Affairs and Digital Transformation (MINECO) and the EU with Regional European Development Funds under Grant TEC2017-84877-R.

References

- [1] IRENA and IEA, "Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy Transition," 2017.
- [2] DOE, EIA, and Office of Energy Analysis, *International Energy Outlook 2016, With Projections to 2040*. Energy Dept.; Energy Information Administration; Office of Energy Analysis, 2016.
- [3] M. Hemphill and N. South, "Electricity Distribution System Planning for an Increasing Penetration of Plug-In Electric Vehicles in New South Wales," in *2012 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2012, pp. 1–6.
- [4] C. F. Heuberger, P. K. Bains, and N. Mac Dowell, "The EV-olution of the power system: A spatio-temporal optimisation model to investigate the impact of electric vehicle deployment," *Applied Energy*, vol. 257, p. 113715, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113715.
- [5] R. S. Levinson and T. H. West, "Impact of public electric vehicle charging infrastructure," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 64, pp. 158–177, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2017.10.006.
- [6] "Dirección General de Tráfico (DGT)." [Online]. Available: <http://www.dgt.es/es/seguridad-visual/estadisticas-e-indicadores/>.
- [7] "Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC)." [Online]. Available: <https://anfac.com/>.
- [8] T.-M. Choi, Y. Yu, and K.-F. Au, "A hybrid SARIMA wavelet transform method for sales forecasting," *Decision Support Systems*, vol. 51, no. 1, pp. 130–140, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.dss.2010.12.002.
- [9] "Instituto de Estudio de Automoción (IDEAUTO)." [Online]. Available: <https://www.ideauto.com/>.
- [10] Ministerio de Industria Energía y Turismo, "Resolución de 23 de mayo de 2014, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se establece el contenido mínimo y el modelo de factura de electricidad," Madrid, Spain, 2014.
- [11] IEA – International Energy Agency, "Global EV Outlook 2019: Scaling up the transition to electric mobility," 2019.
- [12] UNFCCC Secretariat, "Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions, FCCC/CP/2015/7," Paris, 2015.

PHOTOVOLTAIC SELF-CONSUMPTION IN ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS

E. Alcover^{*}, R. Pujol-Nadal^{†*}, J. L. Rosselló, M. Roca, V. Martínez-Moll^{†*}, B. Mas, V. Canals^{†*}

University of Balearic Islands (UIB), Department of Physics, Palma of Majorca 07122, Spain

[†]:Energy Engineering Group (GREEN)

Summary

The present work addresses the energy and economic impact that the incorporation of photovoltaic self-consumption (PV) in its form of surpluses received under compensation, within the framework of RD244 / 2019, will entail in public car parks that provide electric vehicle (EV) charging services. Presenting the different methodologies developed and integrated into a tool in charge of: statistically planning the number of parking spaces required for a given level of EV penetration based on historical data on individualized parking billing, estimating the energy demand related to charging at one-minute intervals statistically simulating a representative EV mobile fleet, and estimating the generation of a grid-connected photovoltaic installation taking into account different generation limiting effects (shadows, fouling plates, effect of ambient temperature, inverter performance). Finally, the billing module is described for facilities with an access rate of 3.0A under the self-consumption modality with compensated surpluses. Specifically, two photovoltaic generation scenarios are analyzed by installing a different number of PV canopies equipped with double charging points in mode 3 in a car park located in the center of Palma de Mallorca, taking into account the evolution of the levels penetration rate for the next 5 years. The results show how with low EV penetrations, such as 2.35%, the increases in demand and energy billing are relevant, reaching 45.82% and 34.39% respectively. While the different PV self-consumption scenarios will lead to significant reductions in the energy term and in the amount of the energy bill, reaching 29.74% and 20.08% respectively.

Keywords: Photovoltaics; Self-consumption; Pluggable electric vehicle; Monte Carlo method; Artificial intelligence

1. Introduction

The transport sector represents 25% of world energy consumption, with oil and other liquid fuels being the main energy sources related to this sector, responsible for CO₂ and other greenhouse gas (GHG) emissions (EIA, 2016). In order to reduce the pollution generated by this sector, a lot of countries are looking toward a substitution of the internal combustion vehicles for more environmentally friendly alternatives (Amini et al., 2016), as the pluggable electric vehicle (PEV), that seems to be more respectful with the environment and presents lower operational costs (Tulpule et al., 2013). In this framework, it is essential that the public sector take the initiative in the deployment of a charging infrastructure for PEV, thus promoting the PEV adoption by consumers. In turn, the objective of reducing to zero the emissions in 2050 in the EU (EU, 2020) will accelerate the energy transition that will involve massive penetration of renewable sources, mainly of solar PV origin in urban areas. In this scenario, the PEV charging can help the power-grid to maintain the balance between supply and demand; which will allow a greater penetration of renewable energies (Fattori et al., 2014). This work analyzes the energy and economic benefit related to the incorporation of photovoltaic self-consumption in public parking lots to cope with the PEV load.

In the context of the ongoing energy transition that will lead to the massive penetration of renewable sources, mainly photovoltaic (PV) in urban areas related to self-consumption. Where PV generation is characterized by a non-dispatchable and time-varying power supply, while EV load demand is characterized by controllable loads and energy storage capacity, with which it makes sense to combine the load of the EV with PV generation

(Nunes et al., 2015). In turn, the production of energy from PV origin could also allow a greater penetration of electric vehicles, as it does not lead to a significant increase in net demand if EVs are charged from PV. Although its integration must be carried out with great care so as not to compromise the stability of the electrical network (Poullikkas, 2015; Romo & Micheloud, 2015), related to the variability of PV generation (Nunes et al., 2016) and the increase in specific demand that the load of the EV

Also, EV car parks equipped with photovoltaic solar energy can be deployed on the surface in practically any place that has a basic electrical infrastructure, such as: shopping centers, train and bus stations, universities, public and private car parks... Being the typical infrastructure of the EV solar charging stations composed by a battery parking, covered by solar panels of about 12-15m², supported in the air by metal or wooden structures. Under this structure, there are located the different charging stations for electric vehicles. Its usual arrangement being that of groups of two rows of parallel parking spaces separated by a circulation road in between (Amini et al., 2017)

The present work analyzes the energy and economic benefit that the incorporation of photovoltaic generation in self-consumption modality with ex-surplus beneficiaries receiving compensation (Ecológica, 2019), included in RD244 / 2019 recently approved in Spain, on the demand for EV charging located in public car parks. For this, a numerical tool has been developed to plan the needs of new charging infrastructures and the energy impact that these will entail on the base demand of the different public car parks. To this tool, separate estimation modules for photovoltaic generation and estimation of energy billing in self-consumption mode with surpluses received for compensation have been incorporated for this work.

2. Evolution of EV penetration

In order to have a forecast of the EV energy demand, it is essential to have a forecast of the evolution of the incorporation of the electric vehicle in the mobile fleet, with a horizon of at least 5 years to establish priorities and horizons in the development of EV charging infrastructures and their associated energy impact. For this, it has been chosen to predict the evolution of the penetration of the electric vehicle in the mobile park of the Balearic Islands from historical data on annual car registrations / sales nationwide. The EV penetration has been forecasted for the next 5 years (2019-2023) from the historical series of monthly electric vehicle sales and through a Box-Jenkins statistical model of the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) family, implemented on MATLAB®, specifically for forecasting time series based on past observations of the own series and previous forecasting errors. The model, expressed as ARIMA (p, d, q), is defined by the parameters p, d, q, where p determines the autoregressive non-stationary coefficient (AR) order, d determines the non-stationary integrative term (I) order and q defines the moving average term (MA) order. Mathematically, the model is expressed as:

$$Y_t = \left(\Phi_0 + \sum_{i=1}^p \Phi_i \Delta^d Y_{t-1} \right) + (Y_t - \Delta^d Y_t) + \left(\epsilon_t - \sum_{i=1}^q \theta_i \epsilon_{t-1} \right) \quad (\text{eq. 1})$$

Where "d" corresponds to the number of differences or derivatives to make to convert the input time series into stationary, the terms ϕ_1, \dots, ϕ_p are the coefficients of the autoregressive part of the model, the terms $\theta_1, \dots, \theta_q$ are the coefficients of the moving averages part of the model, ϕ_0 is a constant, ϵ_t is the error term, and $\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$ represents the remainder between the output value of the time series at time t and the previous instant t-1.

Specifically, the model implemented is a Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA), because of its capability of incorporating the effect of the seasonality of the EV sales throughout the year in the model. Once the time series has been analyzed and its basic components identified, a model has been implemented with $\phi_0 = 0$, a number of differences $d=1$ in order to convert the time series into stationary, a term of the non-seasonal moving average of order $q=1$, and finally a seasonal term of period 12 (months) and unit order of the Seasonal Moving Average SMA = 1, period that corresponds to one year. The results of the forecast of the monthly sales of EV + PHEV have been integrated annually in order to estimate the annual sales for the

next 5 years, which are presented in **Table 1**.

The evolution of the electric mobility in the Balearic Islands follows the same characteristics that the mean of Spain, then the main source of historical data used in this work is the national sales of electric vehicles that can be extrapolated to the local behavior. Three main data sources has been used, the first one is the monthly time series of EV and PHEV registrations, at national level, for the period from 01/01/2014 to 31/12/2019, obtained from Instituto de Estudio de Automoción (IDEAUTO) (*Instituto de Estudio de Automoción (IDEAUTO)*, n.d.); the second one is the historical data of EVs monthly sales at national level and the historical data of the passenger car fleet at the Balearic Islands, obtained from the *Dirección General de Tráfico* (DGT) (Dirección General de Tráfico (DGT), 2019) and the third one is EV sales time series at national level for the period from 01/01/2014 to 31/12/2019, provided by the Spanish Association of Automobile Manufacturers and Trucks (ANFAC) (ANFAC, 2020).

Table 1. Forecasted EV penetration for the period (2019-2023) at the Balearic Islands

YEAR	EV in circulation at the Balearic Islands	Penetration of the EV in the passenger car fleet
2019	1.817	0.28%
2020	3.117	0.47%
2021	5.331	0.81%
2022	9.100	1.38%
2023	15.516	2.35%

In order to have a reliable model, we need to know which are the main models that conform the Balearic Islands fleet. For that, the models of the fleet are going to be approximated as the 11 more sold vehicles in Spain, 6 pure electric vehicles and 5 plug-in hybrid vehicles, obtained from the IDEAUTO database, and with the penetration percentage established according to the actual national electric vehicle fleet. In such way, the percentage between BEV and PHEV would be 62.83% and 38.17% respectively, conforming a fleet with almost the same distribution than the real one (62.19% and 37.81%).

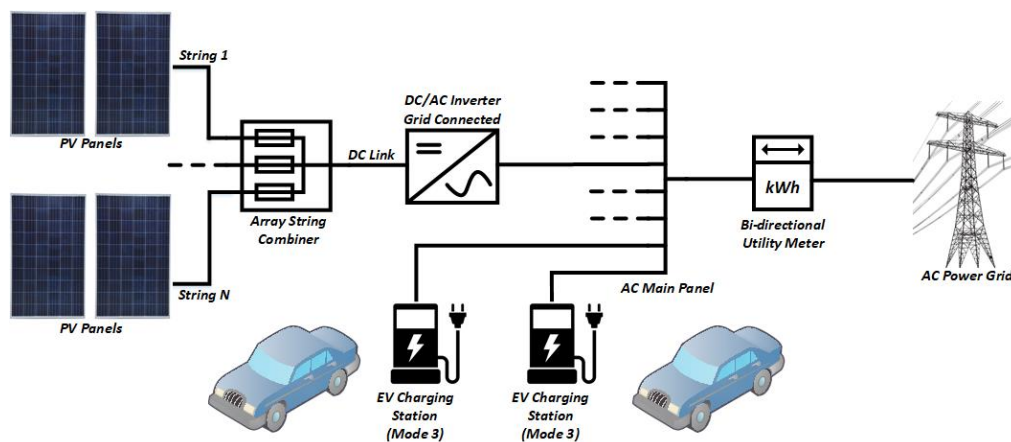


Fig 1. Grid-connected PV generation system architecture to support EV charging.

3. Methodology

The methodology in charge of planning the charging infrastructures and estimating their energy demand presented in this work has focused on analyzing the demand for normal / slow and semi-fast AC load in mode 3 of EVs in a load power range of [2.3-22kW] in car parks. publicly in rotation regime, for a relatively low range of EV penetration levels [0-2.35%]. It is supported by 8 sub-modules that implement specific parts of the developed methodology and it implements a Montecarlo algorithm at its core, which will perform a minute-by-minute simulation of parking for a time series of 10 repetitions of the reference year (2017).

3.1. Analysis and Modelling of Parking Occupancy

The first module, the analysis and modeling of parking occupancy module, is in charge of adjusting the statistical distribution of the parking periods and the diagram of average occupancy for the parking, for two annual periods (high and low season), from the historical billing information of the studied parking. In order to know the distribution of the parking periods, the histogram of the parking durations for intervals of 10 minutes in a range of [0, 2000] minutes is constructed, thus eliminating atypical parking periods. Whose shape perfectly follows a continuous distribution like Weibull's $We(x, \lambda, k)$.

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (\text{eq. 2})$$

The two parameters that determine the shape of the Weibull distribution are the form parameter (k) and the scaling parameter of the distribution (λ), and are determined by applying a least squares method to the obtained histogram of the input data. After determining the parking periods distribution, the modulus obtains the hourly mean occupancy from the mean number of vehicles that start and end their parking each hour in a determined period.

3.2. Load Demand Curves Generator

The load demand curve generator module is in charge of generating the charging curves of the batteries of the vehicles of the local EV fleet. Specifically, the methodology developed aims to emulate the demand associated with battery charging, using a two-stage function. A first section at constant nominal power and a second one at variable power that will decrease exponentially. The characteristics of the local EV fleet is loaded from an external file that details, for each of the 11 (5 pure electric and 6 plug-in hybrids) EV conforming the fleet, the main characteristics: the absolute percentage of penetration of the model in the fleet, the useful energy of the battery, the charging time and the nominal charging power of the vehicle, in addition to other parameters.

3.3. EV Occupancy Generator

The third module determines the occupancy of the EV from the penetration value of the EV in the mobile park and from the data on the average hourly occupancy of the car park, which will provide the average number of entrances / parking lots of vehicles for all time intervals of the evaluation period. First it generates uniformly distributed random number $U(0,1)$ that determines if the entering vehicle is electric or not, then, for each EV entering in the parking, three new random numbers will be generated. The first one $U(1,60)$ determines the entering minute, the second, that follows a Weibull distribution, will randomly set the duration of the parking characteristic of the parking; and the third one, $U(0,1)$ will determine the EV model that has accessed the parking.

3.4. Photovoltaic Generation

The photovoltaic generation module will calculate the energy generated by the PV installation from the meteorological data provided by the *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, n.d.)*, specifically, the hourly data for global horizontal solar irradiance (DGI), diffuse horizontal solar irradiance (DHI), normal direct irradiance (DNI) and ambient temperature. From the solar position, calculated using the algorithm of the Solar Platform of Almería (PSA) (Blanco-Muriel et al., 2001), and the hourly means of irradiance applying geometric methods, the diffuse irradiance (IDif), the direct irradiance (ID) and the global irradiance that will get to a given photovoltaic panel can be determined. Finally, in order to determine the electrical power P_{AC} delivered by the inverter to the grid, the NRW PVWatts model (Dobos, 2014) was chosen, which proposes for the estimation of the inverter performance an empirical function scaled according to the nominal efficiency of the PV inverter.

3.5. Hourly Base Demand Generator

In order to know the total energy demand of the parking it is necessary to know the parking base demand and the real EV demand. The first, the power demand of the public parking lot is usually related to the lightning and ventilation systems. In this case, as the parking is located on the surface, there is no ventilation and the base demand will be lower than in other public parking lots. The methodology used to evaluate the hourly mean base demand is based on the historical invoices of the parking. This task is performed loading an external file (.csv) with the billing of the last years, that contains all the information of the historical invoices for an access toll 3.0A ($P_{Cont} \geq 15kW @400V_{AC}$).

3.6. Real Occupation and Energy Demand Generator

The real occupation and energy demand generator sub-modulus determines the energy demand of the EV charging points from the minute by minute occupation previously generated, taken into account the limitation of vehicles that can be charging at the same time.

3.7. Demand Integrator

It is responsible for integrating the energy demand of energy companies in four-hour periods and hours, for subsequent analysis and evaluation of electricity billing. Where the quarter hourly is needed in order to determine the contribution of the maximeter to the power term[kW], while the hourly demand will be used for determining the contribution to the energy term[kWh]; both related to the energetic billing.

3.8. Energy Billing

Finally, the last module is in charge of calculating the monthly energy bill (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2014) for a 3.0A access toll, a typical typology for public parking lots. It is a billing system that always uses hourly discrimination in three periods: P1 (Peak), P2 (Plan) and P3 (Valley); and each period corresponds to a daily time slot where the cost of energy and contracted power is different. The rates integrated in the tool are presented in **Table 2**, which also include the equipment rental term (€ 414.72 / year), the electricity tax (5.11%) and VAT (21%)

Table 2. Access toll 3.0A

Rate / Power Range	[€] Power Term P1	[€] Power Term P2	[€] Power Term P3	[€] Power Term P1	[€] Power Term P2	[€] Power Term P3
Fare 1 / 15 a 30 kW	41,95	25,17	16,78	0,1272	0,1141	0,0853

4. Results

The proposed methodology has been applied to a public parking lot located in the center of Palma de Mallorca, facing northwest; where their 83 parking spaces are operated in a rotation regime from Monday to Saturday with a schedule from 7 a.m. to 10 p.m. In turn, the car park has a 15kW contract for the three billing periods, and an annual energy consumption of about 8,000 kWh.

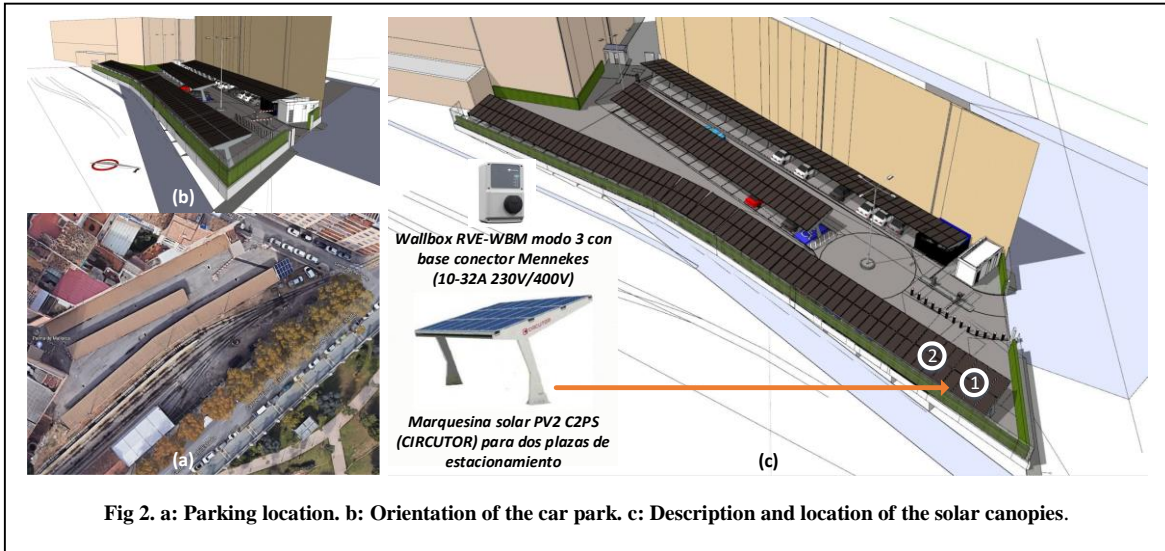


Fig 2. a: Parking location. b: Orientation of the car park. c: Description and location of the solar canopies.

4.1. Planning the Load Infrastructure

Before performing any energetic or economical analysis it is necessary to plan the needed infrastructures for the studied parking. For that, the number of recharging points and number of EV parking lots needed for covering the P_{99} and $P_{99,6}$ percentiles of EV parking attempts which will be given with the EV penetration levels for the next 5 years. A scan be shown in **Fig 3**, either for the percentile P_{99} and the $P_{99,6}$ two parking spaces for EV recharge will be required.

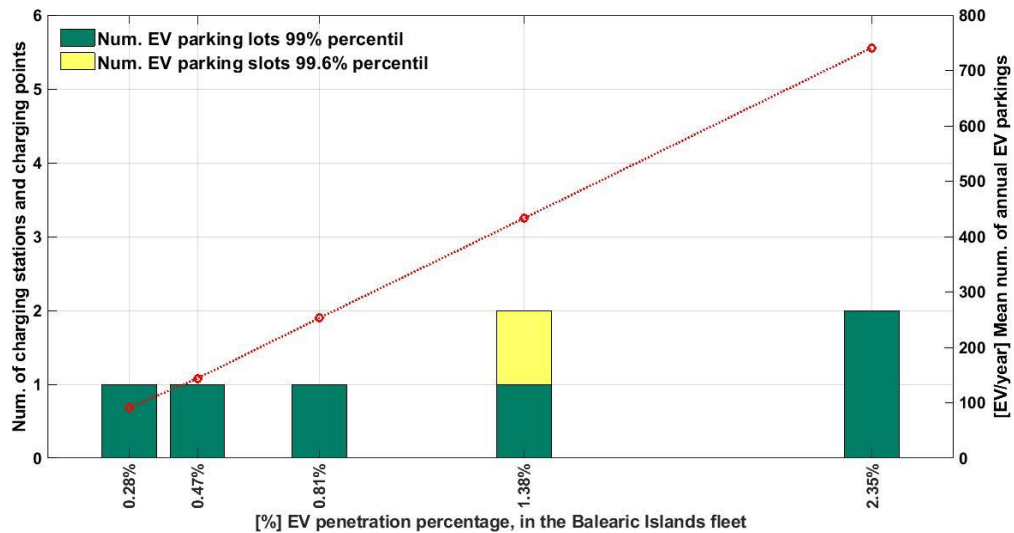


Fig 3. Planificación de los requerimientos de plazas y estaciones de carga de VE

In turn, the two scenarios proposed for photovoltaic generation will consist of the installation of 1 or 2 PV2 canopies from the manufacturer Circutor, the specifications of which are presented in **Table 3**, as shown in Fig. 3c. Both scenarios meet the requirements for parking spaces and charging stations for the period analyzed.

Table 3. Parameters associated with the two PV self-consumption scenarios

Scenario	Num. Modules PV (270 Wp)	[kWp] Power PV	Num. Inversors x [kW] PNominal	Num. lots / Núm. Charging points mode 3
1: 1 x Canopy PV2-2	15	4,05	1 x 3,70	2 / 1
2: 2 x Canopy PV2-2	30	8,10	1 x 7	4 / 2

4.2. Energetic Analysis

Once determined the number of recharging points installed in the parking, the methodology proceeds to estimate the base energy demand of the car park combined with that associated with EV charging based on the penetration level established annually, in minute-by-minute intervals. Then, this energy demand is integrated into quarter-hour periods and schedules that will serve as reference energy demand, for subsequent analysis. The obtained results show that the total energy demand (P1 + P2 + P3) will increase in just 5 years by 45.82%. In turn, if we analyze the increase of energy demand for the three different billing periods, the current energy demand in period P1 (18-22h) will increase by [36-39%], that of period P2 (8-18h and 22-24h) by [79-82%], while that of period P3 (00-08h) will remain practically unchanged. The results on the period P3 is because the parking lot is closed from 10 p.m. to 7 a.m. Next, the methodology estimates the energy demand incorporating the two PV self-consumption scenarios for the different levels of EV penetration; thus, obtaining the combined energy demands by billing period (quarter-hours and hours), and their respective P₉₉ percentiles and demand peaks.

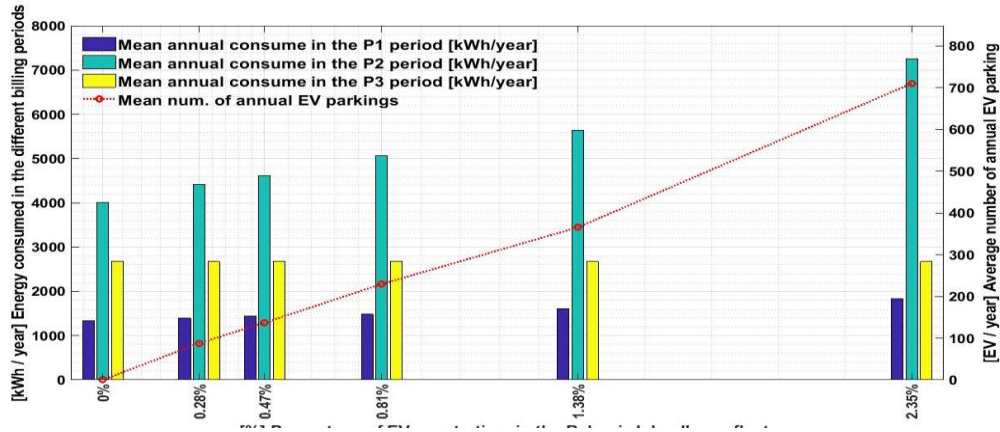


Fig 4. Impact of the penetration of electric vehicles on energy demand, for the different billing periods.

Next, the methodology estimates the energy demand incorporating the two PV self-consumption scenarios for the different levels of EV penetration; thus, obtaining the combined energy demands by billing period (quarter-hours and hours), and their respective P₉₉ percentiles and demand peaks. In order to facilitate the interpretation of the results obtained, the demands for the different scenarios of EV penetration and PV self-consumption are presented in **Table 4** as a percentage with respect to the base demand of the reference year 2017 for this car park.

Table 4. Energy demand of the car park for the different PV self-consumption scenarios

	(2017)	(2019)	(2020)	(2021)	(2022)	(2023)
Without PV/ VE penetration	0%	0,28%	0,47%	0,81%	1,38%	2,35%
Num. Parking lots / Charging stations	0/0	1/1	1/1	1/1	1/1	2/2
Annual Dem. P1 [kWh]	1.337	4,92%	7,95%	13,14%	20,64%	36,81%
Annual Dem. P2 [kWh]	4.011	9,42%	15,42%	26,44%	40,54%	79,34%
Annual Dem. P3 [kWh]	2.674	0%	0%	0%	0%	0,04%
Total Annual Dem [kWh]	8.022	5,53%	9,03%	15,41%	23,71%	45,82%
P99 Quarter-hourly Dem. [kWh]	0	1,69	4,60	6,20	7,52	9,88
Peak Quarter-hourly Dem. [kWh]	0	5,42	7,52	8,28	10,13	14,39
P99 Hourly Dem. [kWh]	0	2,85	4,20	4,99	6,39	8,28
[Scenario 1]: 1 x Canopy PV2-2 → (4,05 kWp)						
Annual Dem. P1 [kWh]	1.337	3,43%	6,65%	9,72%	19,44%	36,61%
Anual Dem. P2 [kWh]	4.011	-38,31%	-33,96%	-23,87%	-11,34%	24,59%
Anual Dem. P3 [kWh]	2.674	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Anual Dem. Total [kWh]	8.022	-18,67%	-15,96%	-10,40%	-2,52%	18,31%
P99 Quarter-hourly Dem. [kWh]	0	1,32	3,22	4,80	6,57	9,10
Peak Quarter-hourly Dem. [kWh]	0	4,86	5,98	7,52	9,44	13,67
P99 Hourly Dem. [kWh]	0	2,15	3,22	4,40	5,41	7,66
[Scenario 2]: 2 x Canopy PV2-2 → (8,10 kWp)						
Annual Dem. P1 [kWh]	1.337	3,60%	5,55%	10,26%	19,14%	39,05%
Anual Dem. P2 [kWh]	4.011	-43,50%	-39,65%	-31,91%	-21,83%	6,82%
Anual Dem. P3 [kWh]	2.674	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Anual Dem. Total [kWh]	8.022	-21,24%	-18,98%	-14,33%	-7,81%	9,83%
P99 Quarter-hourly Dem. [kWh]	0	0,92	2,38	4,60	6,19	8,28
Peak Quarter-hourly Dem. [kWh]	0	4,37	5,40	7,52	8,28	12,34
P99 Hourly Dem. [kWh]	0	1,44	2,70	4,03	4,88	7,32

The results presented clearly show how the incorporation of PV generation in a self-consumption regime has a beneficial effect, reducing the global energy demand. The first scenario (1x PV canopy (4.05 kWp)) analyzed shows a reduction in the average demand of 25.81% for PEV penetration levels in the range [0, 2.35%], while for second scenario (2xPV canopy (8.10 kWp)) this reduction reaches 29.74%.

4.3. Economic Analysis

From the information linked to the access tariff that the car park has contracted and the energy demands obtained in the previous section, the billing sub-module has been used to determine the annual amount of energy billing (adding the monthly billings from the car park). To facilitate the subsequent analysis of the energy costs evaluated for the different EV penetration levels and shown in **Table 5**, it has been chosen to present the energy amounts broken down in euros for the scenario without PV contribution; while the PV self-consumption scenarios are presented as a percentage with respect to the energy costs of the year 2017, taken as a reference.

Table 5. Energy billing associated with the energy demand of the car park for PV self-consumption scenarios

Without PV/ VE penetration	(2017)	(2019)	(2020)	(2021)	(2022)	(2023)
	0%	0,28%	0,47%	0,81%	1,38%	2,35%
ΔEnergy Term [%]	855,99€	6,01%	9,16%	15,57%	25,59%	51,33%
ΔPower Term [%]	1.258,52€	4,65%	6,59%	9,08%	13,60%	33,66%
Invoice amount [€/year]	3.191,18	3.330,95	3.396,40	3.506,01	3.687,42	4.288,72
ΔAnnual invoice amount [%]	0	4,38%	6,43%	9,87%	15,55%	34,39%
[Scenario 1]: 1 x Canopy PV2-2 → (4,05 kWp)						
ΔEnergy Term [%]	855,99€	-30,16%	-27,21%	-21,27%	-11,79%	12,30%
ΔPower Term [%]	1.258,52€	3,11%	4,82%	7,09%	11,26%	29,99%
Invoice amount [€/year]	3.191,18	2.923,31	2.982,63	3.083,46	3.252,99	3.814,22
ΔInvoice amount [%]	0	-8,39%	-6,54%	-3,38%	1,94%	19,52%
Surplus Amount [€/year]	0	86,58	85,58	83,46	80,93	73,26
Amount of Energy given away [€/year]	0	0	0	0	0	0
[Scenario 2]: 2 x Canopy PV2-2 → (8,10 kWp)						
ΔEnergy Term [%]	855,99€	-50,19%	-47,18%	-41,16%	-33,58%	-13,25%
ΔPower Term [%]	1.258,52€	2,64%	3,08%	7,02%	10,39%	25,85%
Invoice amount [€/year]	3.191,18	2.716,22	2.755,70	2.883,65	3.019,29	3.486,08
ΔInvoice amount [%]	0	-14,88%	-13,65%	-9,64%	-5,39%	9,24%
Surplus Amount [€/year]	0	236,51	232,82	228,57	221,84	204,92
Amount of Energy given away [€/year]	0	0	0	0	0	0

It should be noted that savings are concentrated in the P2 period (08-18h). In turn, in the P1 period (18h-22h) the solar contribution can only slightly contain the increase in demand. Meanwhile, the economic analysis shows how small PEV penetration rates will lead to significant increases in the energy bill. A PEV penetration of 2.35% will lead to an increase of 34.39% of the energy bill. At the same time, the PV self-consumption of 4.05kWp reached the saving average of 13.25% of the energy bill for the different levels of PEV, while the PV self-consumption of 8.10kWp the savings grew to 20.08%.

The reduction in demand comes from self-consumption, that is, from the subtraction of instantaneous power demand with that generated for each instant of time. While surpluses, generated energy that cannot be self-consumed instantly, cannot be discounted from the global energy demand for a specific billing period in accordance with RD244 / 2019, as if it happens with the net balance in other countries from the EU.

5. Conclusions

This work has presented a methodology to plan the PEV charging infrastructure and estimate its associated energy demand. The results show how PV self-consumption is an effective mechanism to mitigate the increase in the cost of the energy bill, essentially impacting the energy term, at least for the current PEV levels of penetration. Where the PV self-consumption of 4.05kWp has achieved an average demand reduction of 25.81% for the different levels of EV penetration, while the PV self-consumption of 8.10kWp has achieved an average demand reduction of 29, 74%. Concentrating most of the savings in the period from 8 am to 6 pm, where PV generation is concentrated. In turn, the results show that the most interesting self-consumption scenario, for a car park with a small base demand as is the case, is the one made up of only one PV canopy (4.05kWp). This is due to the fact that the self-consumption modality with surpluses under compensation, included in RD244 / 2019, is focused on direct self-consumption, penalizing generation surpluses through an asymmetric compensation of generation against demand.

6. Acknowledgements

This work was supported in part by the Spanish Ministry of Economic Affairs and Digital Transformation (MINECO) and the EU with Regional European Development Funds under Grant TEC2017-84877-R.

7. References

- AEMET. (n.d.). www.aemet.es
- Amini, M. H., Boroojeni, K. G., Jian Wang, C., Nejadpak, A., Iyengar, S. S., & Karabasoglu, O. (2016). Effect of electric vehicle parking lots' charging demand as dispatchable loads on power systems loss. *IEEE International Conference on Electro Information Technology, 2016-August*, 499–503. <https://doi.org/10.1109/EIT.2016.7535291>
- Amini, M. H., Moghaddam, M. P., & Karabasoglu, O. (2017). Simultaneous allocation of electric vehicles' parking lots and distributed renewable resources in smart power distribution networks. *Sustainable Cities and Society*, 28, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.006>
- ANFAC. (2020). *Informe anual ANFAC 2019*.
- Blanco-Muriel, M., Alarcón-Padilla, D. C., López-Moratalla, T., & Lara-Coira, M. (2001). Computing the solar vector. *Solar Energy*, 70(5), 431–441. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0)
- Dirección General de Trafico (DGT). (2019). *Parque de vehículos - Tablas Auxiliares Anuario - 2019*.
- Dobos, A. (2014). *PVWatts Version 5 Manual*. <https://doi.org/10.2172/1158421>
- Ecológica, M. para la T. (2019). Real Decreto 244/2019. *Boe*, 90, 68–71. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2019/BOE-A-2019-5089-consolidado.pdf>
- EIA. (2016). International Energy Outlook 2016. *Office of Integrated and International Energy Analysis*, 1(May), 1–244. [https://doi.org/DOE/EIA-0383\(2013\)](https://doi.org/DOE/EIA-0383(2013))

- EU. (2020). A European Green Deal. *European Commission - European Commission, December 2019*. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- Fattori, F., Anglani, N., & Muliere, G. (2014). Combining photovoltaic energy with electric vehicles, smart charging and vehicle-to-grid. *Solar Energy, 110*, 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.034>
- Instituto de Estudio de Automoción (IDEAUTO)*. (n.d.). <https://www.ideauto.com/>
- Ministerio de Industria Energía y Turismo. (2014). *Resolución de 23 de mayo de 2014, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se establece el contenido mínimo y el modelo de factura de electricidad*. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2014/BOE-A-2014-5655-consolidado.pdf>
- Nunes, P., Farias, T., & Brito, M. C. (2015). Day charging electric vehicles with excess solar electricity for a sustainable energy system. *Energy, 80*, 263–274. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.11.069>
- Nunes, P., Figueiredo, R., & Brito, M. C. (2016). The use of parking lots to solar-charge electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66*, 679–693. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.015>
- Poullikkas, A. (2015). Sustainable options for electric vehicle technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41*, 1277–1287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.016>
- Romo, R., & Micheloud, O. (2015). Power quality of actual grids with plug-in electric vehicles in presence of renewables and micro-grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 46*, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.014>
- Tulpule, P. J., Marano, V., Yurkovich, S., & Rizzoni, G. (2013). Economic and environmental impacts of a PV powered workplace parking garage charging station. *Applied Energy, 108*, 323–332. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.02.068>

Economic Optimization of Photovoltaic Generation System with Hydrogen Storage

E. Alcover, R. Pujol-Nadal, V. Martínez-Moll, J.L. Rosselló and V. Canals

Department of Industrial Engineering and Construction, University of Balearic Islands, Palma,
Ctra. Valldemossa km 7.5, Campus UIB, Balearic Islands E-07122, Spain
enric.alcover@uib.cat, v.canals@uib.es

Abstract. This work aims to study the impact of the incorporation of a hydrogen-based storage system in grid-connected photovoltaic plants, located in a power-grid with low penetration of renewable sources. Consequently, a methodology is proposed as base of a numerical tool in charge to determine: the photovoltaic power generation every minute of PV plant and the cost of energy generated on a marginal market, such as the Iberian electricity system, model the generation of hydrogen by electrolysis of water, model its efficient storage and subsequent conversion back into electricity; using a proton exchange membrane (PEM) hydrogen fuel cell. The methodology evaluates a strategy for optimizing the energy flows of a PV plant in order to maximize the revenues of the property. Concretely, the methodology proposes to accumulate energy through the storage of hydrogen when the electricity market price, to then generate electricity through the fuel cell and sell it to the grid when the market price is higher. Finally, the methodology has been tested for a hypothetical 1 MW PV plant, located on the island of Mallorca, where less than 4 % of the installed generation power comes from renewable sources.

Keywords: Hydrogen storage, Fuel cells, Renewable energy, Solar energy, Photovoltaic systems.

1 Introduction

The current world electricity demand is still mostly covered by the combustion of fossil fuels in conventional plants (coal plants, CHP, ...). In turn, conventional electricity generation is one of the main sources of Greenhouse Gas (GHG) emissions worldwide, with the consequent environmental impacts and health problems related with these emissions [1]. As agreed in the United Nations Convention on Climate Change, 2015, held in Paris, this GHG emission should be reduced by 70% in 2050 compared to 2015. In order to tackle an energy transition of this magnitude, it will be necessary to develop a set of solutions ranging from power generation based on renewable sources (wind, photovoltaic, solar thermal ...), smart energy transport and storage. As part of a massive deployment of renewable energy, management of variability of solar and wind energy becomes a major issue, where the accumulation of energy is the key element, allowing displace generation in periods this is demanded, ie periods when

the market price of energy is higher. Among the various sources of renewable energy, photovoltaics is the one that has evolved over the last two decades [2], until today become a real alternative to conventional energy sources. However, its generation is characterized by a non-dispatchable and variable energy supply in time, due to the intermittency of the solar resource. In this scenario, the production of hydrogen by electrolysis and its accumulation can bring new capabilities to the PV plants, because the hydrogen can take different roles in the energy field, either as fuel for burning in combination with natural gas [3] or energy storage element for subsequent conversion into electric power by a fuel cell [4].

The methodology proposed in this work analyzes the impact would entail the incorporation of a storage system based on hydrogen in grid-connected photovoltaic systems, located in electrical networks partially isolated and low penetration of renewable energy. Specifically, the methodology states that when there is excess generation in a PV park or the market price is very low, the electrolyzer uses this energy to produce hydrogen, and when the market price of energy is adequate, the stored energy as hydrogen it can be used in a fuel cell to generate electricity again. Consequently, the combination of PV generation with accumulation in a photovoltaic park would make production more flexible, thus enabling optimal plant management based on the electricity market and demand. Although the use of hydrogen as an energy vector shows great potential to solve the variability of some of the renewable energy sources, in turn, there are important barriers that, a priori, prevent the widespread use of this technology. Such as the need for transport and distribution infrastructures in its immeasures (gas pipelines) and the cost of hydrogen storage technologies.

Finally, the proposed methodology is applied to analyze the operation of a 1MW photovoltaic plant located in Mallorca (Balearic Islands, Spain), where the energy produced by the photovoltaic plant can be injected into the electricity grid or released to the hydrogen plant depending on the market price of the electric power.

2 Materials and Methods

The proposed methodology focuses on analyzing the impact that the incorporation of a hydrogen-based storage system in photovoltaic plants connected to the grid would entail. The methodology has been implemented as a numerical tool in MATLAB®. In turn, this tool consists of five submodules, Fig 1, that implement specific parts of the developed methodology and incorporates a Monte Carlo algorithm in its nucleus, which allows a minute simulation minute generation PV, generation and accumulation H₂ for a time series of ten or more repetitions of the reference year (2017); from which the meteorological data and the marginal hourly price of electricity will be taken. Each of the sub-modules is presented below:

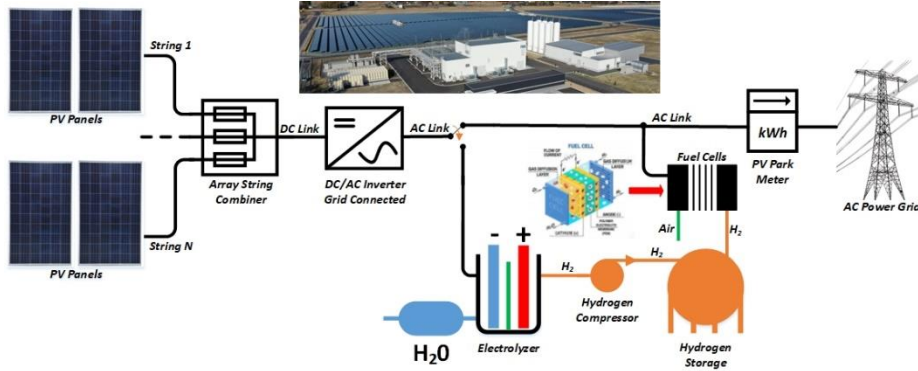


Fig. 1. Architecture of the PV plant with H₂ accumulation considered by the methodology

2.1 A Subsection Sample

In order to estimate the power output that can be generated in a PV park, it is indispensable to have a tool that simulates, from the characteristics of the solar park and the meteorological conditions of the facility's location, the energy generation at each given time interval during an evaluation period of at least one year. In the present work, the authors have developed a tool based on MATLAB[®] that is in charge of simulating the electrical generation, minute by minute, of a given PV park.

In order to obtain accurate results, it is essential to have quality meteorological data of the location or a nearby meteorological station, in this case it is obtained from the *Agencia Estatal de Meteorología* (AEMET) [5]. It is necessary to have the hourly global solar irradiance (DGI), the hourly diffuse solar irradiance (DHI) and the hourly direct normal irradiance (DNI), and also the ambient temperature from the reference year. This hourly radiation data is then converted to minute radiation, interpolating the missing values and using a random number generator based on the beta distribution, that simulates the presence of clouds along the day. Then the interpolated values are normalized to the hourly radiation detected by the AEMET sensors. The minute temperature values are also interpolated from hourly data and multiplied by a Gaussian based random number in order to simulate the fluctuations of the ambient temperature and then, obtain a minute temperature profile.

It is also fundamental to know the exact position of the sun along the year in order to calculate the amount of radiation that is reaching the oriented surface of the different photovoltaic modules that conform the PV installation. This is being calculated using the algorithm of the *Plataforma Solar de Almería* (PSA) [6]. This algorithm calculates the different sun angles (azimuth, declination, zenith angle and elevation) from the location and the date, in UTC, with high precision and huge computational efficiency.

The amount of irradiation (global and diffuse) reaching each panel depends on the slope and the azimuth of the panels and the sun coordinates. The direct irradiance over

the panel (ID) is calculated from the cosines of the panel normal angle respect the surface and the sun position, using the following equations:

$$\begin{aligned}
 \cos \gamma &= A + B + C + D + E \\
 A &= \sin \delta \cdot \sin \psi \cdot \cos \beta \\
 B &= -\sin \delta \cdot \cos \psi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \\
 C &= \cos \delta \cdot \cos \psi \cdot \cos \beta \cdot \cos h \\
 D &= \cos \delta \cdot \sin \psi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \cdot \cos h \\
 E &= \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin h
 \end{aligned} \tag{1}$$

Where α is the panel azimuth, β is the panel slope, δ is the solar declination, ψ is the latitude and h is the solar angle. Then, the direct radiation reaching the panel surface is obtained by:

$$ID = DNI \cdot \cos \gamma \tag{2}$$

The total sky diffuse irradiance received by a surface tilted from the horizontal (ID_{if}) is calculated using the Perez model [7] that is based on the representation of the sky dome as anisotropic background superimposing a circumsolar and horizon effects.

$$ID_{if} = DHI \cdot \left[(1 - F1) \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + F1 \cdot \frac{a}{b} + F2 \sin \beta \right] \tag{3}$$

Where $F1$ and $F2$ are coefficients expressing the degree of circumsolar and horizontal anisotropy respectively. The terms “ a ” and “ b ” are defined as:

$$\begin{aligned}
 a &= \max(0, \cos \gamma) \\
 b &= \max(0.087, \cos Z)
 \end{aligned} \tag{4}$$

The brightening coefficients $F1$ and $F2$ are modelled with a set of coefficients validated by data from different places on the world, the sun elevation and the air optical mass. This set of coefficients stored in a text file (*.csv), are read by the software and the following formula is applied:

$$\begin{aligned}
 F1 &= F11 + F12 \cdot \Delta + F13 \cdot Z \\
 F2 &= F21 + F22 \cdot \Delta + F23 \cdot Z
 \end{aligned} \tag{5}$$

Where $F11, F12, F13, F21, F22, F23$ are the Perez coefficients, Z is the azimuth and Δ is the optical path length (related to the optical mass).

Another factor that changes the amount of irradiance that can be used by the photovoltaic panel for generating electricity is the amount of this irradiance that is reflected by the protective cover. These effects can be significant for incidence angles greater than 65° . The effect of the absorption and reflection of radiation in function of the incident angle is expressed in function of the Incidence Angle Modifier (IAM), that is described as the ratio between the radiation absorbed by the panel at any incidence angle ($\tau(\gamma)$) divided by the absorption at normal incidence ($\tau(0)$).

$$IAM(\gamma) = \frac{\tau(\gamma)}{\tau(0)} \quad (6)$$

The absorption is also dependent on the glazing extinction coefficient (K) and the glazing thickness (L) that are read from a text file (*.csv) with descriptor of each panel/module. A good approximation of the transmission for the covering system, considering reflective losses and absorption inside the glass is:

$$\tau(\gamma) = e^{-\left(\frac{KL}{\cos \gamma_r}\right)} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\gamma_r - \gamma)}{\sin^2(\gamma_r + \gamma)} + \frac{\tan^2(\gamma_r - \gamma)}{\tan^2(\gamma_r + \gamma)} \right) \right] \quad (7)$$

And the angle of refraction is calculated using the Snell law as following expression:

$$\gamma_r = \arcsin(n \sin \gamma) \quad (8)$$

Where “ n ” is an effective index of refraction of the panel cover. A value of 4 m^{-1} for the extinction coefficient is reasonable for “water white” glass and a value of about 0.002 m is reasonable for most glass covered PV panels and, for the case of glass, n is 1.526.

The calculated IAM changes the amount of direct irradiance that is absorbed by the panel, and the effective direct irradiance absorbed by the photovoltaic panel is:

$$ID_{ef} = ID \cdot IAM(\gamma) \quad (9)$$

Finally, the total irradiance (IG) over the photovoltaic module is going to be the sum of the two components, the direct (ID_{ef}) and the diffusive (ID_{if}), as is seen in the following expression:

$$IG = ID_{ef} + ID_{if} \quad (10)$$

For a more accurate estimation on the power generated by each photovoltaic panel/module, is necessary to take into account the temperature effects, in this work the Sandia model [8] is implemented. This model takes into account two different ways of mounting the photovoltaic installation: roof mounting or open rack mounting. The type of mounting must be the same for all the installation modules/panels, because it is defined at the main descriptor of the software (at initialization file “init.xml”).

A thermal model based in local environmental conditions is required in order to predict the energy production of the modules. In this case we are using the data from the AEMET for calculating the cell temperature from an empirically-based thermal model developed by Sandia [9]. It is proved to be an adequate model for the photovoltaic systems with an accuracy of about $\pm 5^\circ\text{C}$ that results in less than 3% effect on power output.

$$T_m = E \cdot (e^{a+b \cdot WS}) + T_a \quad (11)$$

Where, T_m is the back-surface module temperature ($^\circ\text{C}$), T_a is the ambient air temperature ($^\circ\text{C}$), E is the solar irradiance on model surface (W/m^2), WS is the wind speed (m/s), “ a ” is an empirically-determined coefficient establishing the upper limit for mod-

ule temperature at low wind speeds and high solar irradiance, finally, “b” is an empirically determined coefficient establishing the rate at which module temperature drops as wind speed increases. The empirical coefficients “a” and “b” are found to be representatives of different mounting configuration and module type. In our tool is considered only one glass module type and two different mounting configurations, Table 1, open rack and roof mounting.

Table 1. PV panels mounting configuration parameters

Mounting configuration	a	b	ΔT (°C)
Open rack	-3.47	-0.0594	3
Roof mount	-2.98	-0.0471	1

The cell temperature can be related to the module back surface temperature through a simple relationship, based on the assumption of one-dimensional thermal heat conduction through the module materials behind the cell. It is then calculated as follows:

$$T_c = T_m + \frac{E}{E_0} \cdot \Delta T \quad (12)$$

Where T_c is the cell temperature (°C), T_m is the calculated back-surface temperature (°C), E_0 is the reference solar irradiance on module (1000 W/m²). The increment on the cell temperature decreases the voltage generated by the solar cell, so the DC power generated will be lower as the temperature increases. The efficiency is assumed to decrease at linear rate as a function of temperature rise, governed by a temperature coefficient γ (%/°C) that depends on the cell model.

$$P_{dc} = \frac{I_{tr}}{1000} \cdot P_{dc0} \cdot \left(1 + \gamma \cdot (T_c - T_{ref}) \right) \quad (13)$$

Where P_{dc} is the power generated in Watts, the I_{tr} is the transmitted irradiance and T_{ref} is the reference temperature of 25°C.

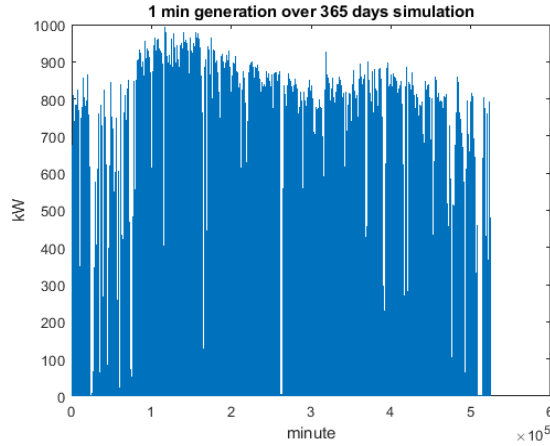
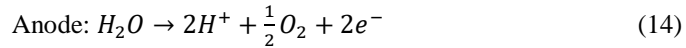


Fig. 2. Minute by minute power generated by a 1MW PV plant.

Finally, the power generated by each panel has to be ordered in an array of panels that are then connected to the inverter, Fig.2. The system also takes into account the resistivity of the wires and the losses due to the DC/AC conversion before obtaining the final power output (P_{AC}).

2.2 Hydrogen Generation by Electrolysis

The electrolysis of water is defined as the decomposition of water into oxygen (O_2) and hydrogen (H_2) gases by means of a continuous electric current connected to water by means of electrodes. This process, that has been widely studied by many authors, is already well known and, although there are different technologies that can be used, in the present work the Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyser is proposed because of its capability of operate at high current densities, that can result in lower operational costs, mainly in systems coupled at dynamic sources as solar and wind. With PEM, water yields H^+ ions which cross a membrane to pick up electrons to become H atoms. The reaction taking place in the electrolyser can be explained as the sum of two half-cell reactions, on one side, the reaction taking place at the anode that is referred to as the Oxygen Evolution Reaction (OER), where the supplied water is oxidized to oxygen, protons and electrons; on the other side, the half-reaction taking place on the cathode is referred to as the Hydrogen Evolution Reaction (HER), where the supplied electrons and the protons that have traversed the membrane are combined to create hydrogen molecules in gaseous state [10].



These atoms then combine to make hydrogen molecules, this gas can be stored in tanks and be reconverted into electricity when there is a need of feeding the electric network, using a repowering unit such as a fuel cell or hydrogen gas turbine, that are technologies based on taking advantage of the following chemical reaction:



Energy can be converted into hydrogen by an electrolyser and stored for later use in a repowering unit such as a fuel cell or hydrogen gas turbine. Typical round-trip efficiency is around 40% ($\pm 70\%$ conversion efficiency from power to hydrogen and $\pm 60\%$ from hydrogen to power). The power required in order to obtain hydrogen by electrolysis is supplied by a set of photovoltaic panels, which make up what is known as the photovoltaic generator.

2.3 PEM electrolyzer

The amount of oxygen and hydrogen generated by the PEM electrolyzer can be evaluated by a simple model, that has been implemented in MATLAB. In the ideal case, the hydrogen production rate of an ideal electrolyzer is proportional to the charge transferred, according to the Faraday's law [11], can be expressed in $\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{h}$ as:

$$\begin{aligned} f_{H_2} &= \eta_f \cdot \frac{N_{cell} \cdot I_{cell}}{z \cdot F} \cdot \frac{22.41}{1000} \cdot 36000 \\ f_{O_2} &= \eta_f \cdot \frac{N_{cell} \cdot I_{cell}}{z \cdot F} \cdot \frac{17.36}{1000} \cdot 36000 \end{aligned} \quad (18)$$

Where η_f is the faraday efficiency, defined as the ratio of ideal electric charge and the practical charge consumed by the device when a certain amount of hydrogen is generated, N_{cell} is the number of cells in the PEM electrolyzer, I_{cell} is the electric current, F is the Faraday's constant ($96,485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$) and "z" is the number of electron moles transferred, that per hydrogen mole is ($z = 2$) and for oxygen mole is ($z = 1$). Then, the specific energy consumption E ($\text{kWh}/\text{N}\cdot\text{m}^3$) for a given time interval Δt can be obtained by:

$$E = \frac{\int_0^{\Delta t} N_{cell} \cdot I_{cell} \cdot V_{cell} dt}{\int_0^{\Delta t} f_{H_2} dt} \quad (19)$$

Another important parameter that has to be determined is the electrolyzer efficiency, that represents the ratio between the energy contained in the hydrogen produced and the energy needed to electrolyze the water consumed during the process, it can be expressed as:

$$\eta_{EL} = \frac{HHV}{E} \cdot 100 \quad (20)$$

As seen in Table. 2, PEM technologies can modulate their power consumption easily, presenting a very huge hydrogen flow range (1-100%) making them very attractive for stabilizing power grids and delivering grid balancing or ancillary services, and for accumulating energy from a variable source as PV.

Table 2.

Number of cell stacks	10	Hydrogen flow range	1-100%
Nominal hydrogen flow	5000 Nm^3/h	Hydrogen purity	99.998%
Nominal input power	25 MW	Tap water consumption	<1.4 liters/ $\text{N}\cdot\text{m}^3 \text{H}_2$
AC power consumption	5.0-5.4 $\text{kWh}/\text{N}\cdot\text{m}^3$	Output Pressure	3MPa

2.4 Hydrogen Storage

In some cases, the power generated by renewable energy sources can be stored in order to balance its fluctuation and intermittence because of variable weather conditions[12]. Power-to-gas is a novel energy storage method that can also use the surplus electricity from the grid during off-peak periods for converting it to hydrogen through a water electrolysis process. In the present work, hydrogen storage system will be implemented for performing an optimization strategy from an economic point of view.

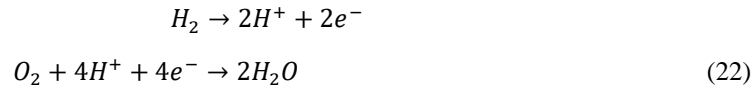
Usually, storage of the hydrogen as pressurised gas is theoretically simple but requires a compressor to increase the pressure of the gas produced by the electrolyser, the output pressure of the PEM electrolyzer used in this work is already 3MPa, so the compressor will be used for increasing this pressure until 30MPa. Then, the energy used by the compressor, considering an adiabatic compression process is:

$$P_{CP} = M_{H_2} \cdot C_p \cdot \frac{T_1}{\eta_C} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \cdot P_{EL} \quad (21)$$

Where M_{H_2} is the mass flow of hydrogen produced for every kW consumed by the electrolyzer. This amount of gas that can be stored in the tank until reaching its full capacity. The tank capacity proposed for the studied facility is of 10 m³ and is protected from direct solar radiation and placed in a dry, cool and ventilated environment.

2.5 Fuel Cells

Once the energy is stored as H₂, it can be used for producing electricity again by the means of a fuel cell system, that is an electrochemical device that transforms chemical energy into electrical energy in direct current. The hydrogen (H₂) and the oxidant (oxygen or air) reacts into the cell, obtaining direct current, water and heat, by the means of two different reactions, one at the anode and another at the cathode:



In order to obtain the desired power and voltage, several cells are arranged in series to form a stack. In this work, a PEM fuel cell is proposed, because of its advantages such as simplicity, low operating temperature, and easy maintenance [13]. This is going to be modeled by a zero-dimensional, isothermal and semi-empirical model [14]. The volume consumed by the fuel cell can be obtained from [15]:

$$V_{H_2} = \frac{E_{FC}}{\eta_{FC} \cdot pci_{H_2}} \quad (23)$$

Where E_{FC} is the energy delivered by the fuel cell, η_{FC} is the efficiency of the fuel cell and pci_{H_2} is the hydrogen calorific value $\left(3 \frac{kWh}{N \cdot m^3} \right)$.

3 Results

The proposed methodology focuses on analyzing the economic impact that the incorporation of a hydrogen-based storage system in a grid connected photovoltaic plant. Specifically, in this work a hypothetical 1MW PV plant has been considered, located in the municipal district of Palma, on the island of Mallorca (Balearic Islands), Spain.

The models proposed in this work are limiting some energy flows under certain conditions that increases the money incoming to the PV plant property. The different economic variables that will play an important role for determining the best energy flow are the market price of the electricity, that depends on the offer-demand of the market at each moment, and the oxygen market price, that allows us to sell the remaining oxygen generated with the electrolyzer. At the present work, the input market price for the simulation and the meteorological data of the same reference year (2017) will be used.

The electricity market price fluctuates due to the variability of the demand and consumption rates along the day. In this work, the data obtained from the OMIE web page [16] that specifies the hourly price of the MWh along the year as shown in Fig. 3.

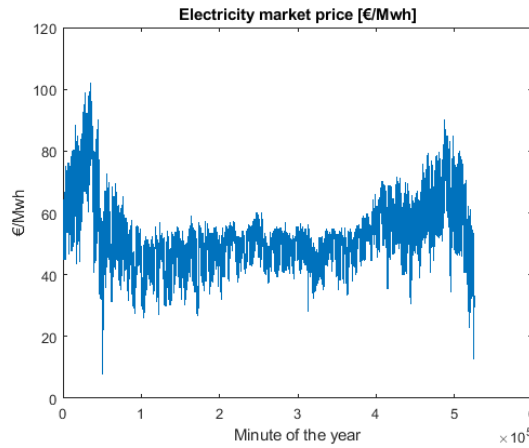


Fig. 3. Spanish marginal electricity market price along 2017 reference year.

When the market price of the energy produced is less than a 50% of the maximum price of the next 4 days, the electrolyzer is going to generate hydrogen from tap water and it is going to be accumulated at a tank with a capacity of 10 m^3 at 300 bars. At the same time, the oxygen generated is going to be sold at the price of $0,008 \text{ €/m}^3$. Then, when the electricity market price reaches its maximum value of the next 4 days, the fuel cell is going to use the stored hydrogen to generate electricity and sell it to the grid.

After applying the proposed methodology, the annual incomings of the power plant obtained for the two different scenarios, one with hydrogen storage and another without, are presented in the Table. 3.

Table 3. Hypothetical 1MW PV plant results, located at Palma of Majorca (Spain)

	With hydrogen storage	Without hydrogen storage
Annual Incomings [€]	95,527.98 €	92,523.27 €

4 Conclusions

Nowadays, the efficiency of modern photoconverters (i.e., photovoltaic) and electrolyzers is about 20 % and 70 %, respectively, then, the total efficiency of solar radiant energy transformed to chemical hydrogen energy is only nearly 16 % [9]. Consequently, the amount of energy that can be stored as hydrogen is not very high, and then, the different mechanisms that can convert this hydrogen to other usable energies have also a limited efficiency.

The economic results, Table. 3, show how the hydrogen-based storage facility in PV plants, where the penetration of renewables is very low and the energy demand is high, as in the Balearic Islands (<4%), does not make economic sense; as there is no technical restriction on generation.

Acknowledgement

This work was supported in part by the Spanish Ministry of Economic Affairs and Digital Transformation (MINECO) and the EU with Regional European Development Funds under Grant TEC2017-84877-R. As well as by the *Ibero-American Program of Science and Technology for Development* (CYTED), under the network project 518RT0558 entitled “*Fully Integrated, Efficient and Sustainable Smart Cities* (CITIES)”.

References

1. Perera F (2017) Pollution from Fossil-Fuel Combustion is the Leading Environmental Threat to Global Pediatric Health and Equity: Solutions Exist. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15:16 . <https://doi.org/10.3390/ijerph15010016>
2. Reichelstein S, Yorston M (2013) The prospects for cost competitive solar PV power. *Energy Policy* 55:117–127 . <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.11.003>
3. Widera B (2020) Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications. *Thermal Science and Engineering Progress* 16:100460 . <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100460>
4. Clarke RE, Giddey S, Ciacchi FT, Badwal SPS, Paul B, Andrews J (2009) Direct coupling of an electrolyser to a solar PV system for generating hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* 34:2531–2542 . <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.053>

5. (2020) Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). <http://www.aemet.es/es/portada>
6. Blanco-Muriel M, Alarcón-Padilla DC, López-Moratalla T, Lara-Coira M (2001) Computing the solar vector. *Solar Energy* 70:431–441 . [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0)
7. Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J, Stewart R (1990) Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44:271–289 . [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
8. King DL, Boyson WE, Kratochvil JA, King DL, Boyson WE, Kratochvil JA (2004) Photovoltaic Array Performance Model. In: Sandia National Laboratories. pp 2004–3535
9. King DL, Boyson WE, Kratochvil JA (2004) Photovoltaic array performance model. Sandia Report No 2004-3535 8:1–19 . <https://doi.org/10.2172/919131>
10. Millet P, Ngameni R, Grigoriev SA, Mbemba N, Brisset F, Ranjbari A, Etiévant C (2010) PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development. *International Journal of Hydrogen Energy* 35:5043–5052 . <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.015>
11. Ursúa A, Gandía LM, Sanchis P (2012) Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE* 100:410–426 . <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2156750>
12. Park S, Shao Y, Liu J, Wang Y (2012) Oxygen electrocatalysts for water electrolyzers and reversible fuel cells: Status and perspective. *Energy and Environmental Science* 5:9331–9344 . <https://doi.org/10.1039/c2ee22554a>
13. Barbir F (2013) PEM fuel cells : theory and practice. Elsevier 543 . <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387710-9.01001-8>
14. Mann RF, Amphlett JC, Hooper MAI, Jensen HM, Peppley BA, Roberge PR (2000) Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources* 86:173–180 . [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00484-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00484-X)
15. Marino C, Nucara A, Panzera MF, Pietrafesa M, Varano V (2019) Energetic and economic analysis of a stand alone photovoltaic system with hydrogen storage. *Renewable Energy* 142:316–329 . <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.079>
16. OMIE