



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN

Máster Universitario en Energía Solar Fotovoltaica

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**OPTIMIZACIÓN DEL AUTOCONSUMO
FOTOVOLTAICO EN LA ETSIT-UPM
MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**

Autor: Alejandro González Carballo

Tutor: Jesús Fraile Ardanuy

Departamento: Electrónica Física, Ingeniería Eléctrica y Física
Aplicada

Cotutor: Álvaro Gutiérrez Martín

Departamento: Tecnología Fotónica y Bioingeniería

Madrid, julio, 2021



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN

Máster Universitario en Energía Solar Fotovoltaica

TRABAJO FIN DE MÁSTER

OPTIMIZACIÓN DEL AUTOCONSUMO
FOTOVOLTAICO EN LA ETSIT-UPM
MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Firma Autor

Firma Cotutor

Firma Tutor

Copyright ©2021. Alejandro González Carballo

Esta obra está licenciada bajo la licencia Creative Commons

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 3.0 Unported (CC BY-NC-ND 3.0). Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es> o envíe una carta a Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, EE.UU.

Todas las opiniones aquí expresadas son del autor, y no reflejan necesariamente las opiniones de la Universidad Politécnica de Madrid.

Título: Optimización del autoconsumo fotovoltaico en la ETSIT-UPM mediante la integración de los vehículos eléctricos como sistema de almacenamiento distribuido

Autor: Alejandro González Carballo

Tutor: Jesús Fraile Ardanuy

Cotutor: Álvaro Gutiérrez Martín

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Máster el día de de ... en, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecerles a mis tutores Jesús Fraile y Álvaro Gutiérrez su compromiso y dedicación con el proyecto a lo largo de estos meses y a los conocimientos y a la perspectiva transversal que han aportado.

También me gustaría dedicar el proyecto a mis padres y a mis abuelos, por brindarme su apoyo incondicional durante todos estos años, por ofrecerme siempre la mejor educación y por transmitirme sus valores. Por supuesto, me gustaría hacer una mención especial a mis hermanos que me han apoyado y animado en el día a día.

Finalmente, dedicar el proyecto a todos mis amigos, sin los cuales no estaría hoy en día donde estoy. Especialmente a Charly, por ser haber sido mi *"solar couple"* durante el último año y haberme ayudado y robado horas y horas de mi vida en *Teams*. Como se suele decir, lo mejor para el final, y es que, gracias a la ayuda y apoyo de Juanjo, he conseguido evolucionar como persona tanto emocional como académicamente, muchas gracias por todo.

Resumen

La lucha contra el cambio climático implica un cambio de paradigma en los sectores contaminantes. Concretamente se estima que la generación de energía y el sector transporte suponen a nivel global más de dos tercios del total de emisiones.

Un modelo que busca aumentar la eficiencia del sistema energético mediante una disminución de las pérdidas en el transporte es la generación distribuida, que consiste en disponer distintos vectores energéticos cerca de los puntos de consumo, que aporten energía a la red de distribución. Asimismo, el fallo de una de las fuentes energéticas no compromete la seguridad del sistema, lo que aumenta la calidad y la fiabilidad de dicho sistema. Otra de las soluciones para transicionar hacia un escenario más sostenible, consiste en la electrificación de la flota de vehículos.

Hoy en día, la fuente renovable más fácil de implementar es la fotovoltaica, ya que, gracias a su modularidad, se pueden diseñar instalaciones acordes a las necesidades de cada usuario. Además, el aumento de la eficiencia de los distintos componentes que conforman la instalación y la bajada de su precio hace de esta fuente la más barata. El principal problema de esta tecnología es que las horas de generación están acotadas y hay demandas a las cuales no puede hacer frente.

Una de las soluciones consiste en almacenar la energía excedentaria de la producción fotovoltaica en baterías para llevar a cabo una gestión inteligente de la energía y poder cubrir consumos fuera de horas de generación, lo que permite optimizar la instalación. Sin embargo, su elevado coste actual dificulta su implementación, pero en caso de disponer un vehículo eléctrico, el potencial de su batería se puede extender más allá de las funciones para las que ha sido diseñada, haciendo una gestión activa de la demanda con la energía almacenada en ella.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es la elaboración de un software que integre los algoritmos y restricciones necesarios para llevar a cabo un intercambio de energía entre las baterías de diferentes vehículos y la demanda energética de un edificio teniendo en cuenta los patrones de conducción de cada usuario.

Una vez desarrollados los algoritmos, se simulan dos edificios de la ETSIT-UPM, en los cuales se estudiarán, en función del número de vehículos conectados, las ventajas que supone este modelo. Finalmente, tras analizar los resultados, se exponen las conclusiones extraídas tras la elaboración del Trabajo Fin de Máster.

Palabras clave: vehículo eléctrico, gestión de la energía, fotovoltaica.

Abstract

The fight against climate change implies a paradigm shift in polluting sectors. Specifically, it is estimated that the energy generation and transportation sectors account for more than two thirds of total emissions globally.

One model that seeks to increase the efficiency of the energy system by reducing transport losses is distributed generation, which consists of having different energy vectors close to the consumption points that contribute energy to the distribution network. Furthermore, the failure of one of the energy sources does not compromise the security of the overall system, which increases the quality and reliability of the system. Another solution for moving towards a more sustainable scenario is the electrification of the vehicle fleet.

Today, the easiest renewable source to implement is photovoltaic, since, thanks to its modularity, installations can be designed according to the needs of each user. In addition, the increased efficiency of the different components that make up the installation and the drop in its price make this source the cheapest. The main problem with this technology is that the generation hours are limited and there are demands that it cannot cope with.

One of the solutions consists of storing surplus energy from photovoltaic production in batteries to carry out intelligent energy management and to be able to cover consumption outside generation hours, which allows the installation to be optimized. However, its high cost makes its implementation difficult, but in the case of having an electric vehicle, the potential of its battery can be extended beyond the functions for which it has been designed, making an active management of the demand with the energy stored in it.

The objective of this Master Thesis is the development of a software that integrates the algorithms and constraints necessary to carry out an energy exchange between the batteries of different vehicles and the energy demand of a building considering the driving patterns of each user.

Once the algorithms have been developed, two buildings of the ETSIT-UPM are simulated, in which the advantages of this model will be studied depending on the number of connected vehicles. Finally, after analyzing the results, the conclusions drawn after the development of the Master Thesis are presented.

Keywords: electric vehicle, energy management, photovoltaics.

Índice general

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Abstract	XIII
Índice	XVI
1. Introducción	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura del documento	3
2. Estado del arte	5
2.1. Sistema fotovoltaico	5
2.2. Gestión activa de la demanda	8
2.3. Vehículo eléctrico	12
2.4. Vehículo eléctrico en España	13
2.5. Vehicle to Load (V2L)	14
2.5.1. Ventajas	14
2.5.2. Desventajas	15
2.5.3. Retos	16
2.5.4. Suposiciones	16
3. Desarrollo Software	21
3.1. Objetivo	21
3.2. Algoritmo de reparto de energía	22
3.2.1. Coeficiente de energía	22
3.2.2. Coeficiente de tiempo	23
3.2.3. Coeficiente total	24
3.2.4. Implicaciones de los coeficientes	24
3.3. Algoritmo global	29
4. Resultados y discusión	35
4.1. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación	35
4.2. Magic Box	40

5. Conclusiones	45
5.1. Conclusiones	45
5.2. Desarrollos futuros	46
Bibliografía	49
Anexo	53

Índice de figuras

2.1. Potencia instalada en España. Datos extraídos de REE [6], UNEF [7] y PNIEC [2].	5
2.2. LCOE para distintas tipologías de instalación [8].	6
2.3. Balance entre generación y consumo en España [6].	7
2.4. Componentes energéticas de una instalación fotovoltaica sin almacenamiento. Ejes sin unidades, puesto que la Figura muestra un concepto teórico. Elaboración propia.	7
2.5. Aporte energético a la vivienda sin y con almacenamiento. Ejes sin unidades, puesto que la Figura muestra un concepto teórico. Elaboración propia.	9
2.6. Magic Box [12].	9
2.7. Curva monótona de demanda de <i>Magic Box</i> para 3 escenarios [11].	10
2.8. Desglose de facturas de la <i>Magic Box</i> para los 3 escenarios [11].	11
2.9. Emisiones de CO ₂ de vehículos de combustión y eléctricos [3].	12
2.10. Parque de vehículos eléctricos en España desde 2012 [14].	13
2.11. Degradación temporal de la batería en función de la distancia recorrida y la temperatura del emplazamiento [16].	15
2.12. Densidad de probabilidad de la distancia recorrida y del estado de carga de las baterías al final del día en Reino Unido [20].	17
2.13. Estabilización de la curva nacional de demanda de Reino Unido con vehículos eléctricos en función de la penetración de estos en la flota nacional [20].	18
2.14. Reducción porcentual de la energía absorbida de la red en función de los vehículos conectados al sistema y para los 3 escenarios de estudio [21].	19
3.1. Distribución de probabilidad de los Coeficientes Totales de Carga y Descarga para los vehículo 1 y 2. Elaboración propia.	25
3.2. Distribución de probabilidad de los Coeficientes Totales de Carga para el Vehículo 1 en diferentes estaciones. Elaboración propia.	26
3.3. Distribución de probabilidad de los Coeficientes Totales de Descarga para el Vehículo 1 en diferentes estaciones. Elaboración propia.	27
3.4. Diagrama de cajas y bigotes de la diferencia energética de la batería a la salida y a la entrada del edificio. Elaboración propia.	27
3.5. Densidad de probabilidad de la diferencia energética en invierno y verano para los dos vehículos del estudio. Elaboración propia.	28

3.6.	Componentes energéticas de una instalación fotovoltaica con un vehículo conectado. Ejes sin unidades, puesto que la Figura muestra un concepto teórico. Elaboración propia.	30
3.7.	Diagrama de flujo de la ejecución del programa. Elaboración propia.	32
3.8.	Algoritmo implementado en el software. Elaboración propia.	33
4.1.	Vista aérea del Edificio D desde Google Earth [22].	35
4.2.	Levantamiento del Edificio D en <i>SketchUp</i> . Elaboración propia.	36
4.3.	Curvas de la generación y el consumo promedio por estaciones del Edificio D. Elaboración propia.	36
4.4.	Distribución estadística de las variables analizadas en la encuesta. Elaboración propia.	37
4.5.	Parámetros energéticos mensuales del edificio D. Elaboración propia.	38
4.6.	Parámetros energéticos mensuales de los vehículos conectados al del edificio D. Elaboración propia.	38
4.7.	Parámetros mensuales del edificio D en función del número de vehículos conectados. Elaboración propia.	38
4.8.	Energía inyectada y absorbida de la red para los 3 casos de estudio. Elaboración propia.	39
4.9.	Energía inyectada y absorbida de los vehículos para los 3 casos de estudio. Elaboración propia.	39
4.10.	Autoconsumo y autosuficiencia para los 3 casos de estudio. Elaboración propia.	40
4.11.	Curvas de la generación y el consumo promedio por estaciones de la <i>Magic Box</i> . Elaboración propia.	41
4.12.	Energía absorbida e inyectada en la red en la <i>Magic Box</i> . Elaboración propia.	41
4.13.	Energía absorbida e inyectada en los vehículos con diferentes turnos de trabajo en la <i>Magic Box</i> . Elaboración propia.	42
4.14.	Autoconsumo y autosuficiencia en la <i>Magic Box</i> . Elaboración propia.	42
4.15.	Estado de carga del vehículo al abandonar el edificio. Elaboración propia.	43

Índice de tablas

3.1. Coeficientes de reparto según el estado de carga.	23
3.2. Coeficientes de reparto según el tiempo en la escuela.	24
3.3. Coeficientes de carga y descarga.	24
3.4. Parámetros característicos de los dos vehículos del estudio.	25

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presentan los puntos principales planteados en el proyecto, entendiendo como tales la motivación, los objetivos planteados y la estructura que se seguirá en el documento.

1.1. Motivación del proyecto

Según el informe publicado por el Ministerio de la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO) correspondientes al año 2019 [1], las emisiones de gases de efecto invernadero disminuyeron en un 6.2% respecto al año anterior en España. Esta bajada responde al esfuerzo de los países miembros de la Unión Europea de cumplir con los Objetivos del Desarrollo Sostenible. En el informe se refleja el gran impacto del sector del transporte en nuestro país, puesto que las emisiones de CO₂ equivalentes suponen un 29% sobre el total. Con lo cual, actuando en este sector, se podrían reducir considerablemente dichas emisiones.

En el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) se estipulan las medidas orientadas a la electrificación del parque automovilístico nacional con el objetivo de alcanzar los 5 millones de vehículos eléctricos en 2030, fomentando la movilidad sostenible con emisiones prácticamente nulas. Para ello, se promoverá la adquisición de este tipo de vehículos y se desplegará la infraestructura necesaria para la recarga de sus baterías [2].

Ha de destacarse que, la electrificación del parque automovilístico no es de por sí, una medida para frenar el impacto medioambiental de este sector, ya que, como se verá en el Capítulo 2, para conseguir dicho objetivo, el origen de la fuente energética con la que se recarguen las baterías debe ser de origen renovable. Sin embargo, al no tener emisiones locales [3], permiten mejorar la calidad del aire de los centros urbanos.

De entre todas las energías renovables, la fotovoltaica se sitúa como la más competente en términos económicos y de implantación, ya que su modularidad le permite instalarse en aquellos lugares donde existe falta de espacio, como en las ciudades. Si la implementación de esta fuente se hiciese a gran escala, y en diferentes puntos del territorio, se llegaría a tener una generación distribuida de la energía.

Un inconveniente de esta tecnología es el hecho de que solo genera energía durante las horas solares, por lo que, durante el resto del tiempo, es necesario absorber energía de la red, a no ser que se disponga de elementos almacenadores de energía, como las baterías. La principal razón por la cual no se instalan baterías a los sistemas eléctricos, es el elevado coste de estas. Sin embargo, un vehículo eléctrico permanece estacionado un elevado porcentaje de tiempo, por lo que, si durante dicha parada está conectado a la red, es posible hacer uso de la energía almacenada en su batería para hacer una gestión inteligente de ella.

1.2. Objetivos

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster (TFM) consiste en desarrollar un programa para optimizar un sistema de autoconsumo fotovoltaico con almacenamiento que permita mejorar la ecoeficiencia de distintos edificios de la ETSIT-UPM. Para ello, se evaluarán diferentes configuraciones de operación del sistema que permitan maximizar el grado de autoconsumo y autosuficiencia fotovoltaico conseguido a través de una gestión activa de la demanda. A su vez, se estudiará la utilización de sistemas de almacenamiento energético mediante el empleo de baterías de vehículos eléctricos, fomentando la movilidad sostenible al exponer el potencial que ofrecen.

Con este fin, se desarrollarán los siguientes puntos:

- Incorporar los datos de generación solar fotovoltaica del sistema mediante el software comercial PVSyst [4].
- Analizar la demanda eléctrica del edificio, empleando en la medida de lo posible datos reales de consumo, pudiendo importar las diferentes cargas, cuyas características son:
 - Tiempo de utilización.
 - Potencia consumida.
 - Franja horaria de utilización.
 - Gestionabilidad de cargas: categorizadas en no diferibles, diferibles y elásticas.
 - No diferibles: aquellas cargas sobre las cuales no se tiene capacidad de gestión.
 - Diferibles: aquellas cargas que pueden ser gestionadas, puesto que su activación puede ser programada en el tiempo.
 - Elásticas: aquellas cargas que no pueden ser desplazadas en el tiempo, pero es posible modificar la potencia de consumo.

Con este apartado se podrá construir una curva sintética de consumo horario del edificio pudiendo variar los parámetros para analizar distintos escenarios de comportamiento.

- Desarrollar algoritmos de gestión de la carga/descarga de las baterías de los vehículos eléctricos conectados a la red del edificio, *Vehicle To Building (V2B)*, respetando las restricciones temporales y energéticas del vehículo.

- Definir los parámetros a evaluar, mostrando los resultados obtenidos con las simulaciones de los distintos escenarios analizados.
- Analizar el comportamiento de los algoritmos desarrollados en edificios de distintas tipologías. Para ello se utilizará la ETSI de Telecomunicación como ejemplo de edificio público del sector terciario con gran ocupación y el piloto de casa ecoeficiente *Magic Box* instalada también en dicha escuela de la UPM como ejemplo de oficina. De esta forma se evaluará el rendimiento de los algoritmos con distintos tipos de cargas y consumos, y el potencial de utilización de las baterías de los vehículos eléctricos, actuando como carga y fuente de energía.

1.3. Estructura del documento

A continuación, para facilitar la lectura del documento, se detalla el contenido de cada capítulo.

- En el Capítulo 2 se presenta una visión somera de la fotovoltaica en términos de previsiones de crecimiento, costes y ventajas. Una vez planteados los puntos anteriores, se desarrollan los parámetros principales que caracterizan a una instalación que emplea esta tecnología: autoconsumo y autosuficiencia, y se describe la gestión activa de la demanda, que tiene como objetivo maximizarlos. Finalmente, se describe al final del capítulo la situación actual del vehículo eléctrico a nivel nacional, junto con las ventajas y previsiones que se esperan para esta tipología de automóvil.
- En el Capítulo 3 se detallan los algoritmos y metodologías desarrollados en la implementación del programa que se va a desarrollar, así como las suposiciones y simplificaciones consideradas.
- En el Capítulo 4 se plantean dos casos de estudio, de los cuales, una vez simulados con el software desarrollado, se obtienen y analizan los datos pertinentes, extrayendo conclusiones sobre la viabilidad de la propuesta.
- En el Capítulo 5 se resumen las conclusiones que se han extraído tras la realización del proyecto y unas líneas futuras que habría que seguir para mejorar tanto el algoritmo desarrollado, como el programa.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se presenta el contexto de la energía solar fotovoltaica en términos de costes, tanto absolutos como relativos, junto con una visión somera de la fotovoltaica en España, y las ventajas que supone acoplarla con el almacenamiento en baterías. Por otra parte, se discutirá si un vehículo eléctrico es realmente sostenible y las previsiones de crecimiento en España. Finalmente, se demostrará que el vehículo eléctrico es un aliado de la fotovoltaica, ya que se puede llevar a cabo una gestión activa de la demanda con la energía almacenada en su batería.

2.1. Sistema fotovoltaico

La energía solar fotovoltaica es competitiva desde un punto de vista económico, puesto que, las mejoras tecnológicas y la economía de escala han propiciado una bajada de costes y una mejora de la eficiencia tanto de los módulos, como del sistema fotovoltaico. Con todo ello, la energía solar fotovoltaica es, a día de hoy, la fuente energética más barata [5].

La evolución en España de esta tecnología tuvo un estancamiento en términos de potencia instalada desde 2012 a 2018, sin embargo, en 2019 se instalaron 4000 MW. Además, las previsiones del PNIEC [2] muestran un escenario prometedor para el sector, como se puede ver en la Figura 2.1.

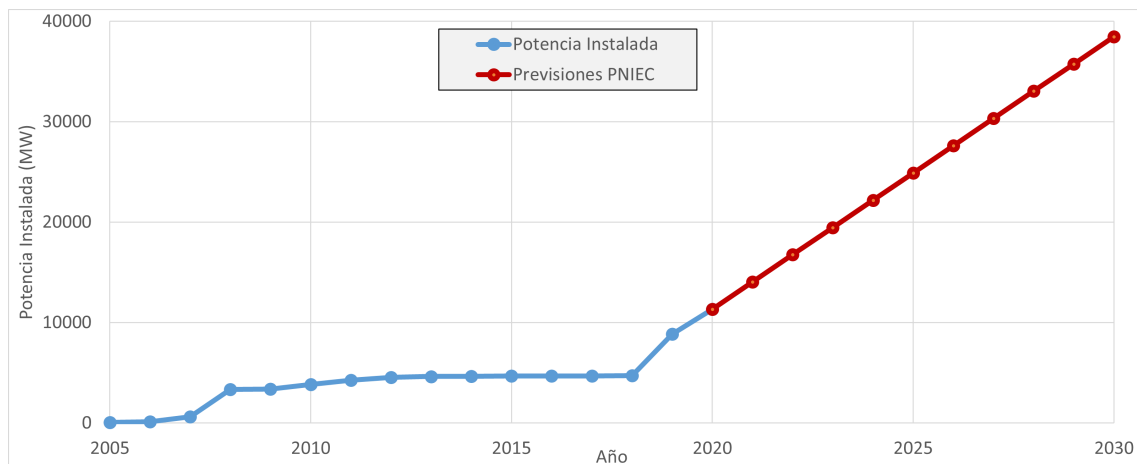


Figura 2.1: Potencia instalada en España. Datos extraídos de REE [6], UNEF [7] y PNIEC [2].

El ahorro al autoconsumir energía viene dado por la diferencia entre el coste de comprar energía a la red y el de producirla. Este último parámetro se conoce como LCOE (*Levelized Cost Of Electricity*), el cual describe el precio al que habría que vender la energía para cubrir todos los costes a lo largo de la vida útil de la instalación. Las previsiones para los próximos años en función de la potencia instalada se muestra en la Figura 2.2.

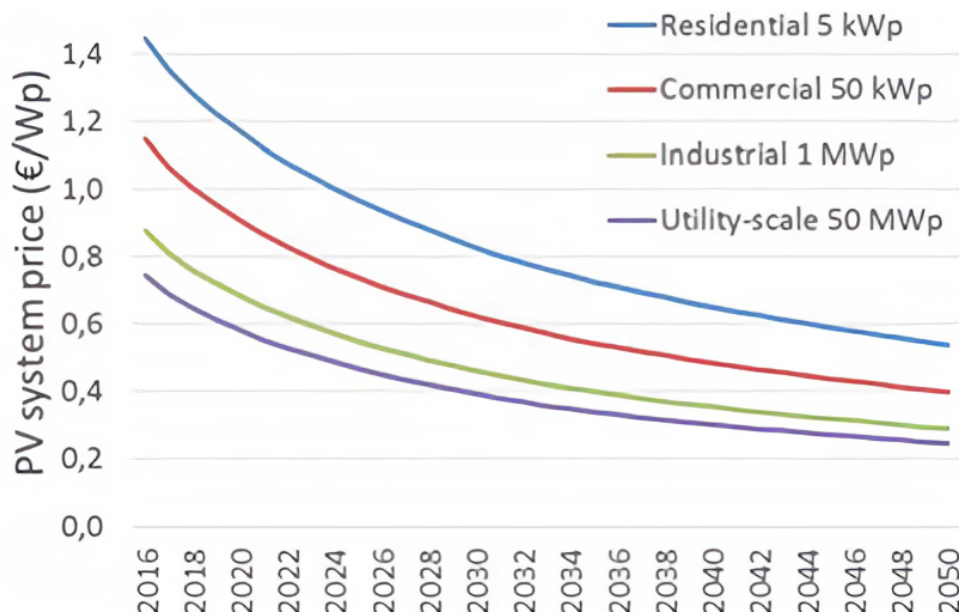


Figura 2.2: LCOE para distintas tipologías de instalación [8].

Aunque, como se ve en la Figura 2.2, el LCOE disminuye a medida que se aumenta la escala de la instalación, puesto que los costes fijos disminuyen, se puede considerar que en la actualidad, el LCOE se sitúa por debajo de 10cts€/kWh, coste que es inferior al de compra de energía para instalaciones cuya potencia instalada es superior a 50 kW [8].

La fotovoltaica es, de entre todas las fuentes energéticas, la que genera el kWh más barato, además las proyecciones para los próximos años indican que hay aún margen de mejora ya que el LCOE disminuirá [8].

En la Figura 2.2, las proyecciones para 2050 estiman un LCOE menor a 0.3 €/Wp para instalaciones superiores al megavatio, mientras que para viviendas sería de 0.6 €/Wp.

Por otra parte, la modularidad de la fotovoltaica permite hacer instalaciones acordes a las necesidades geométricas del emplazamiento y particulares de cada usuario. Este hecho permite acercar la generación al consumo, cuya consecuencia es un aumento de la eficiencia energética del sistema nacional.

En España dichas pérdidas supusieron entre un 8 % y el 10 % en la década pasada [9], además, el país tiene grandes sumideros de energía en las grandes ciudades como Madrid (ver Figura 2.3), ya que no son capaces de abastecerse por si solas.

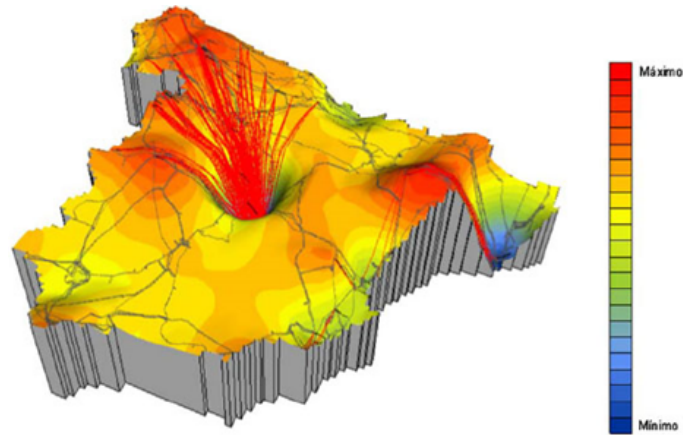


Figura 2.3: Balance entre generación y consumo en España [6].

Uno de los retos a la hora de realizar una instalación fotovoltaica es acoplar la curva de generación a la de consumo. Mientras que la curva de generación fotovoltaica está ligada a las horas donde hay recurso solar, la de consumo tiene unas características propias que depende de la tipología del edificio y de los hábitos de consumo, por lo que su implementación y estudio no es trivial. En la Figura 2.4 se presenta una curva de generación (amarillo), y de consumo (azul oscuro) de una instalación fotovoltaica sin almacenamiento.

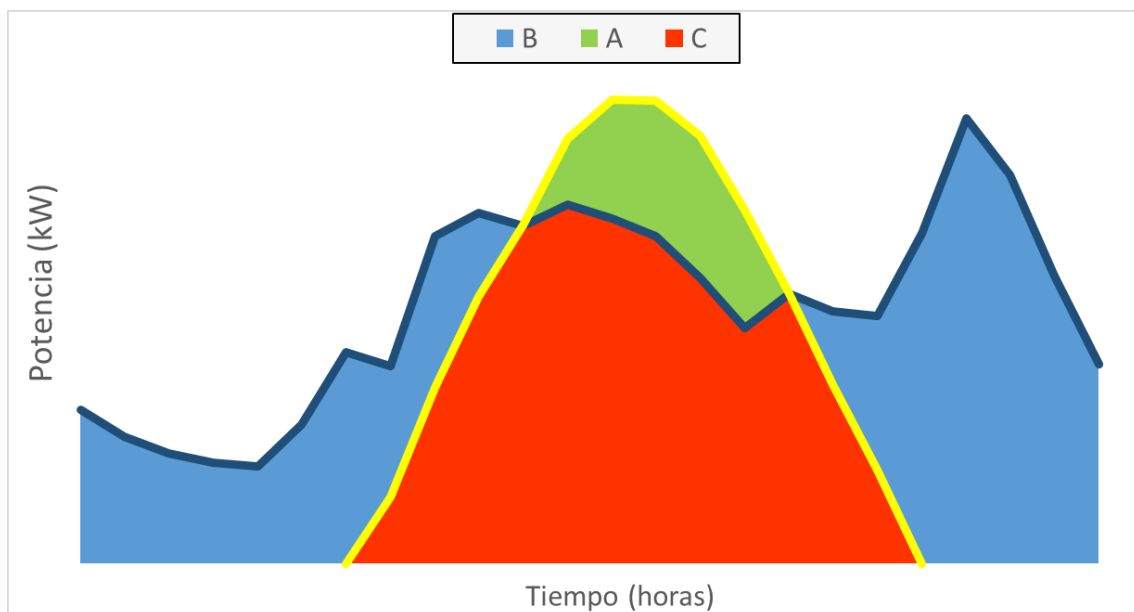


Figura 2.4: Componentes energéticas de una instalación fotovoltaica sin almacenamiento. Ejes sin unidades, puesto que la Figura muestra un concepto teórico. Elaboración propia.

En la Figura 2.4 se pueden diferenciar tres zonas:

- A: Energía fotovoltaica que no ha sido consumida por el sistema, que es inyectada en la red (verde).
- B: Energía absorbida de la red (azul).
- C: Energía generada por el sistema fotovoltaico consumida *in situ* (rojo).

Con el objetivo de cuantificar el comportamiento energético de una instalación fotovoltaica y su grado de independencia con la red se definen dos parámetros: autosuficiencia y autoconsumo [10].

- Autosuficiencia: Fracción del consumo que es abastecido localmente con la energía proveniente de la generación fotovoltaica.

$$\text{Autosuficiencia} = \frac{C}{C + B} \quad (2.1)$$

- Autoconsumo: Fracción de la energía procedente de la generación fotovoltaica que se consume in situ. Está relacionado con el grado de aprovechamiento de la instalación.

$$\text{Autoconsumo} = \frac{C}{C + A} \quad (2.2)$$

Un autoconsumo del 100 % implica que no existen excedentes de energía que se inyecten a la red, ya que toda la energía es autoconsumida por la carga.

La autosuficiencia es uno de los parámetros que se debe maximizar en una instalación, puesto que un aumento de autosuficiencia se traduce en una reducción de la factura al absorber menos energía de la red.

Sin embargo, como se puede observar en la Figura 2.4, puesto que la generación fotovoltaica se produce durante el día, la curva de generación no es capaz de abarcar todas las horas en las que hay consumo. Con lo cual, la única forma de cubrir más consumo con energía fotovoltaica es almacenar la energía excedentaria y hacer un uso inteligente de ella con una gestión activa de la demanda.

2.2. Gestión activa de la demanda

El almacenamiento de energía es una de las soluciones para mejorar el desequilibrio existente entre la generación fotovoltaica y el consumo de una carga. Para ilustrar las ventajas que tendría instalar almacenamiento en una vivienda con generación fotovoltaica, se plantean dos escenarios para el caso de la Figura 2.4.

En la Figura 2.5 (a) se muestra como el consumo de la vivienda se cubre exclusivamente con dos fuentes energéticas: la red (en azul) y la fotovoltaica (en rojo), mientras que en la Figura 2.5 (b) se observa como el pico de demanda nocturno se cubre parcialmente con la energía almacenada en las baterías, las cuales se han cargado cuando había exceso de energía fotovoltaica. El resultado es una disminución significativa de la energía absorbida de la red.

La generación fotovoltaica tiene una curva característica, la cual depende del instante de tiempo y las condiciones climatológicas. Sin embargo, la carga de un edificio sigue unos patrones los cuales varían con la estacionalidad, el día de la semana, la ocupación, la finalidad del edificio, etcétera. Es por ello por lo que siempre va a existir un desajuste entre la energía requerida y generada.

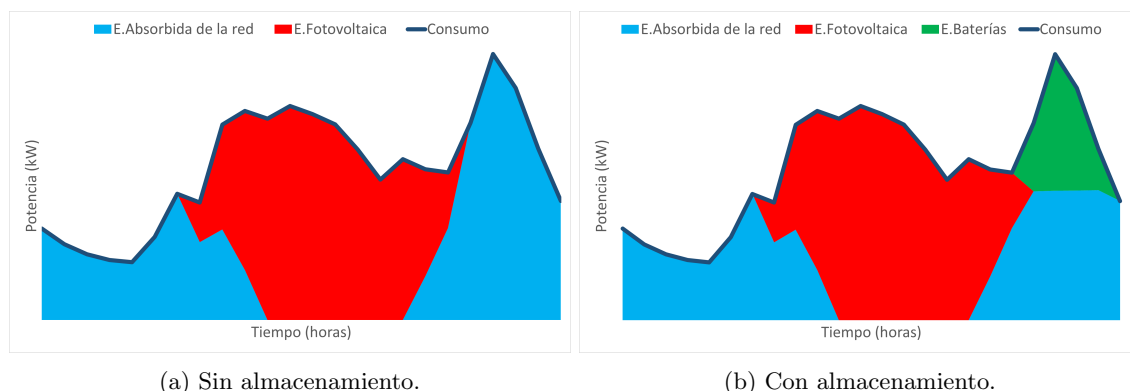


Figura 2.5: Aporte energético a la vivienda sin y con almacenamiento. Ejes sin unidades, puesto que la Figura muestra un concepto teórico. Elaboración propia.

A continuación se detallan los 3 escenarios reflejados en la Figura 2.4 ¹.

- Vertido de energía a la red: la generación fotovoltaica excede al consumo, el cual se inyecta a la red con retribución económica (4-6 cts€/kWh) [6].
- Absorción de energía desde la red: la red aporta la energía a la carga, puesto que la generación fotovoltaica no es suficiente para suplir la demanda. El precio de compra de energía se sitúa en el intervalo de (11-12 cts€/kWh) [6].
- Autoconsumo de energía: la energía generada por el sistema fotovoltaico consume la carga, con el coste del LCOE de la instalación.

Para mostrar las ventajas de los sistemas conectados a red con almacenamiento, se presentan a continuación los principales resultados obtenidos en el estudio [11] donde se muestran las ventajas energéticas y económicas que se obtuvieron tras la realización del estudio sobre el prototipo de vivienda *Magic Box* (ver Figura 2.6), la cual dispone de generación fotovoltaica y almacenamiento electroquímico [12].

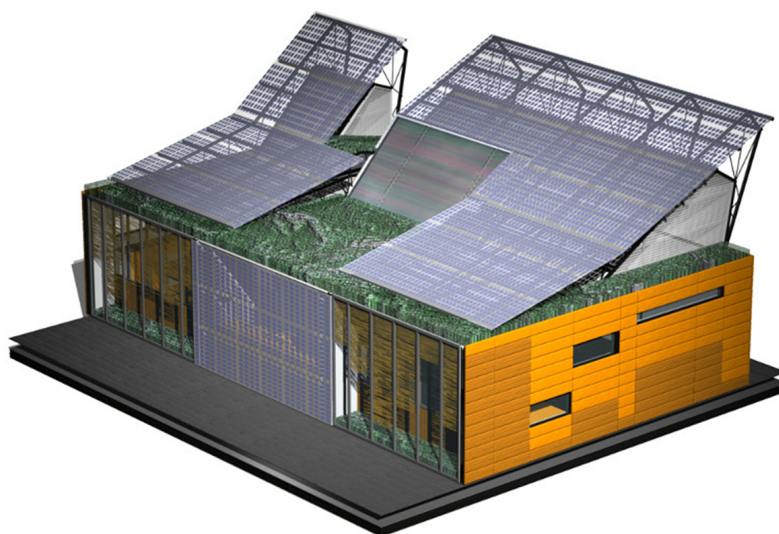


Figura 2.6: Magic Box [12].

¹Precios medios obtenidos en Red Eléctrica de España [6]

En la Figura 2.7 se muestra la curva monótona de demanda² de la *Magic Box* a lo largo del año para 3 escenarios diferentes [12].

- Sin generación fotovoltaica (línea azul): En este caso la potencia máxima absorbida de la red es de aproximadamente 2400 W, hecho que implica que la potencia contratada de la vivienda tenga que ser superior a dicho valor.
- Con generación fotovoltaica sin almacenamiento (línea roja): En el escenario donde se contempla la generación fotovoltaica, la potencia máxima instantánea sigue siendo la misma para el caso anterior, sin embargo, se observa como a lo largo del año hay una disminución de la potencia absorbida de la red del 27 %.
- Con generación fotovoltaica con almacenamiento (línea amarilla): En caso de añadir baterías al sistema se tiene como resultado una disminución de la potencia máxima instantánea 65 % y una reducción del 46 % de la energía total absorbida de la red.

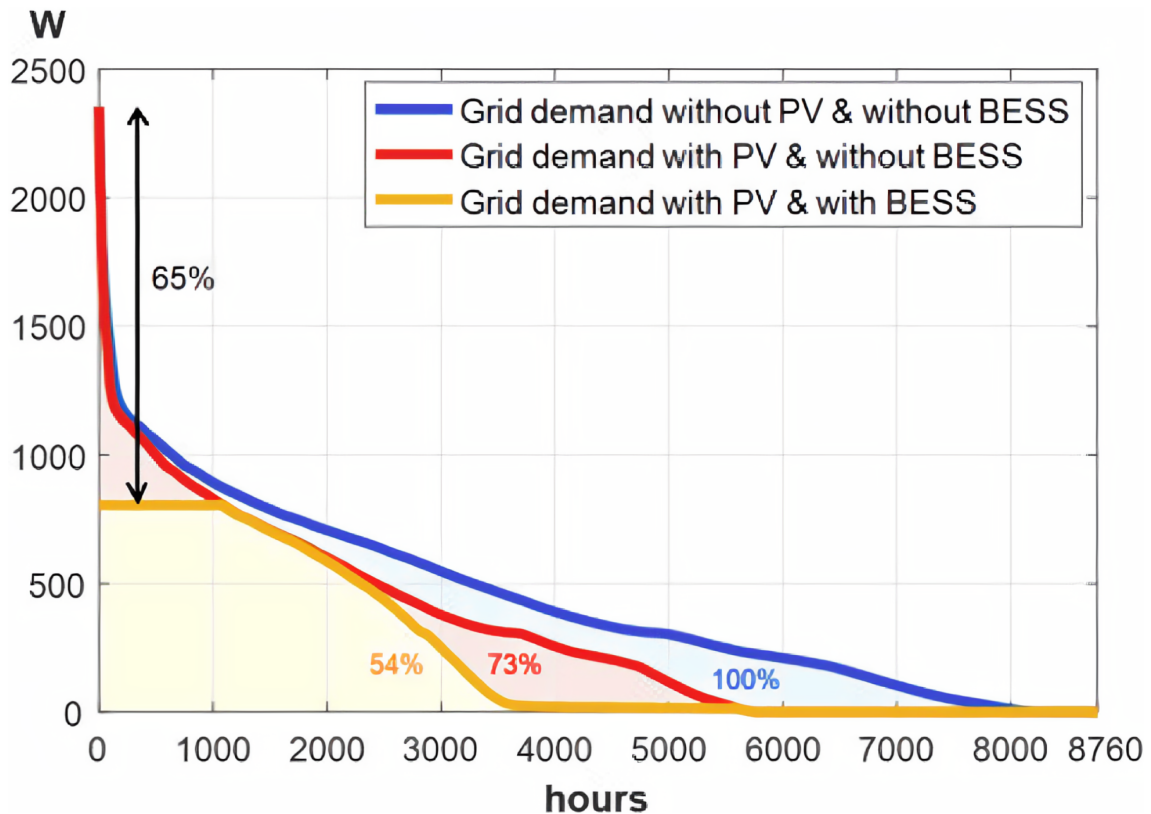


Figura 2.7: Curva monótona de demanda de *Magic Box* para 3 escenarios [11].

El hecho de disminuir la potencia contratada y absorber menos energía de la red en el caso de incluir almacenamiento y generación fotovoltaica, a la par que se lleva a cabo una gestión inteligente de la energía tiene como consecuencia un ahorro económico.

²Curva monótona de demanda: Representación de la demanda de un determinado periodo dividida en periodos y ordenada de mayor consumo a menor consumo

Como se observa en la Figura 2.8, hay un ahorro de factura del 21% para el escenario que solo contempla la generación fotovoltaica ya que la componente variable de la factura disminuye en un 19% en impuestos y un 32% en la energía absorbida. Por otro lado, en caso de incorporar almacenamiento, el ahorro sería de un 56%, ya que se reducen los importes asociados a la potencia contratada en un 77% y la energía absorbida de la red e impuestos en un 49% y 51% respectivamente.

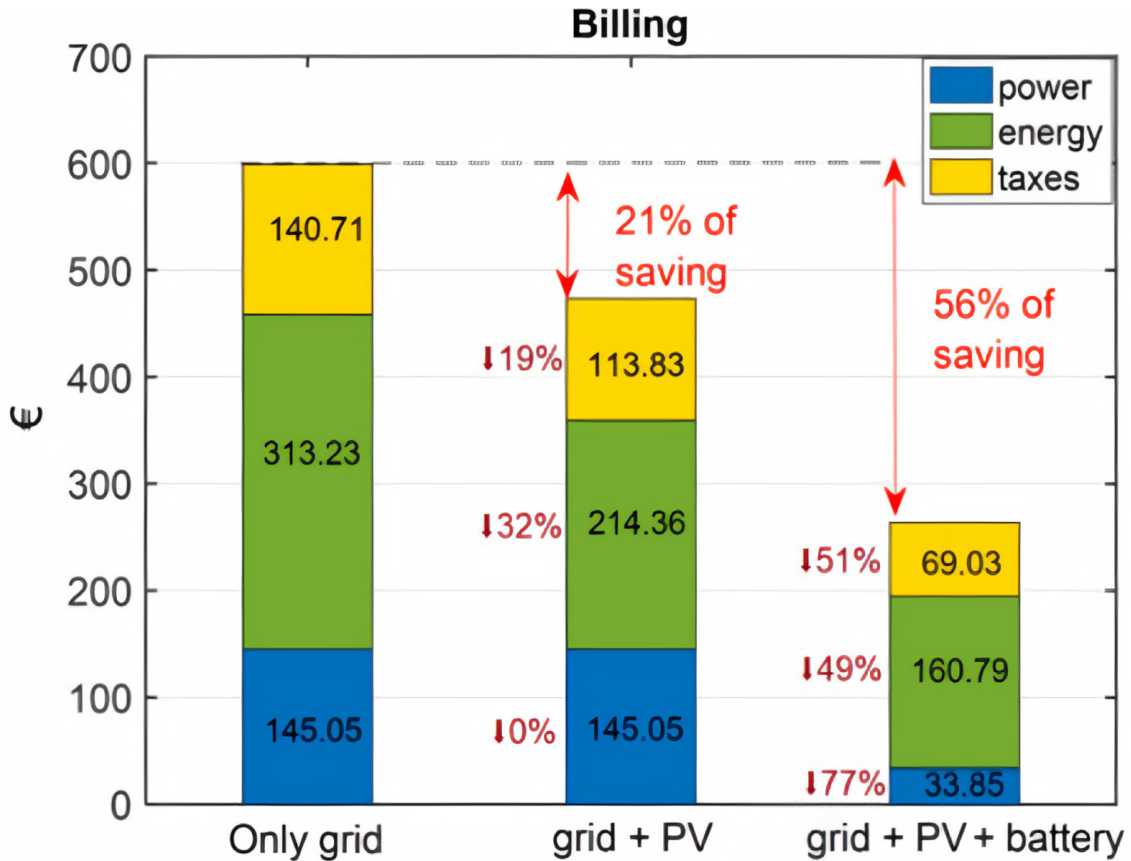


Figura 2.8: Desglose de facturas de la *Magic Box* para los 3 escenarios [11].

A pesar de las ventajas que ofrece la gestión activa de la demanda, lo cierto es que en la práctica la mayoría de sistemas fotovoltaicos conectados a red no disponen de almacenamiento. La principal razón es el elevado coste como consecuencia del precio de las baterías, aunque a largo plazo el ahorro económico sea superior que el que tendría el sistema fotovoltaico sin baterías (Figura 2.8).

Sin embargo, existe otra posibilidad con la que se puede llevar a cabo una gestión activa de la demanda sin la necesidad de adquirir una batería estática; el vehículo eléctrico.

La fuente energética del vehículo eléctrico es una batería, de la cual no se hace uso mientras el vehículo está estacionado, por lo que, de existir un punto de recarga, se podría establecer un flujo de energía bidireccional que permita cargar o descargar la batería en función de la generación fotovoltaica y el consumo. Esta gestión activa de la demanda, conocida como *Vehicle to Load (V2L)* lleva años en investigación, y son múltiples sus ventajas y aplicaciones.

2.3. Vehículo eléctrico

Para reducir el impacto medioambiental del sector transportes se debe fomentar y concienciar sobre el uso del vehículo eléctrico, ya que se presenta como una alternativa competitiva en términos ecológicos al tradicional vehículo de combustión. Aunque es cierto que los vehículos eléctricos no tienen emisiones locales de CO₂ durante su funcionamiento, si tienen un alto impacto medioambiental en el proceso de fabricación, por lo que debe ser estudiado.

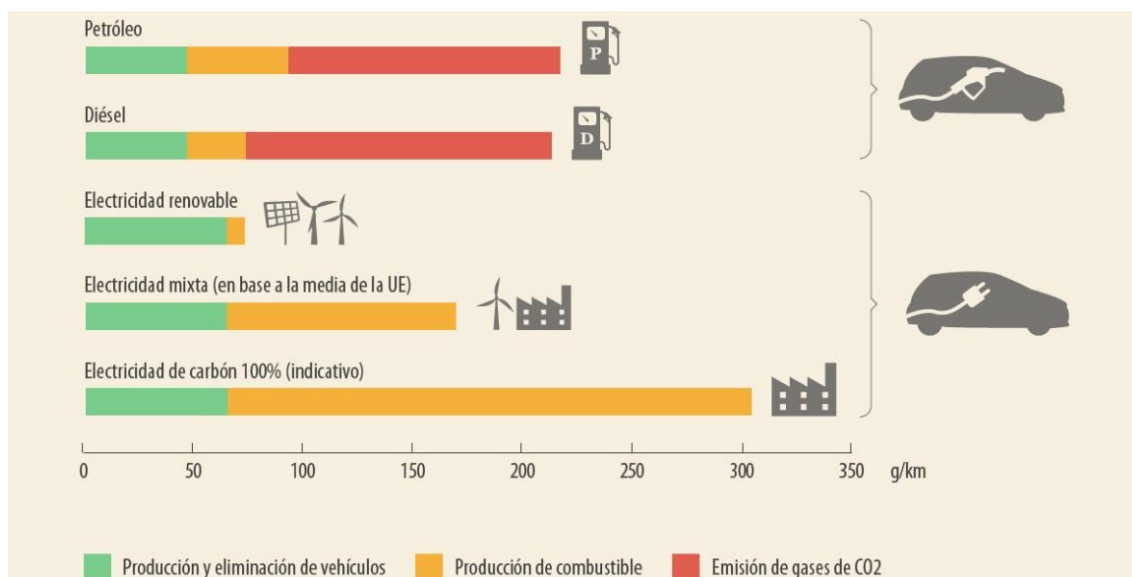


Figura 2.9: Emisiones de CO₂ de vehículos de combustión y eléctricos [3].

Como se observa en la Figura 2.9 los vehículos tradicionales (basados en la combustión de gasolina y diésel) tienen unas emisiones promedias a la atmósfera entre 210 y 220 gramos de CO₂ por kilómetro, estando más de la mitad de las emisiones asociadas al trayecto del vehículo. Sin embargo, el vehículo eléctrico puede ofrecer emisiones más competitivas, dependiendo de la naturaleza de la fuente de energía con la que se recarguen las baterías.

En primer lugar, cabe destacar la principal ventaja del vehículo eléctrico: no emite gases a la atmósfera durante el recorrido, por lo que los procesos contaminantes se reducen a la producción y eliminación del vehículo, y a la producción de la energía.

En comparación con el vehículo de combustión interna se observan emisiones de CO₂ un 36% superiores durante el proceso de producción y eliminación debido al impacto medioambiental de las baterías.

Para reducir dichas emisiones, el origen de la electricidad en la recarga, debe ser lo menos contaminante posible. A continuación, se desglosan las posibles fuentes [3]:

- Carbón: En caso de generar la electricidad con carbón, las emisiones de CO₂ ascienden a más de 300 gCO₂/km, lo que hace a esta metodología de carga insostenible desde un punto de vista ecológico.

- Generación mixta. En el escenario de generar la energía con el mix medio actual de la Unión Europea, las emisiones asociadas a cargar las baterías serían de aproximadamente 100 gCO₂/km.
- Renovable. Si la energía se genera con fuentes renovables, las emisiones por carga de baterías son prácticamente nulas, y las únicas emisiones son las asociadas a la creación y mantenimiento de las fuentes de generación.

2.4. Vehículo eléctrico en España

En España, el parque de vehículos eléctricos está aumentando de forma exponencial como se puede ver en la Figura 2.10. Este hecho se da como consecuencia del aumento de los puntos de recarga, los incentivos para su compra y de las ventajas que supone tener un vehículo de 0 emisiones. Ejemplo de ello es la ciudad de Madrid donde se establecen una serie de beneficios [13] como son:

- Están exentos del pago de impuestos de matriculación y tienen libre acceso a áreas de prioridad residencial.
- Descuento del 75 % en los impuestos de tracción mecánica o de circulación.
- Los conductores de vehículos eléctricos o híbridos enchufables (con una autonomía mínima de 40 km) o con autorización de cero emisiones pueden aparcar de forma gratuita en las zonas de estacionamiento regulado del SER.
- Las medidas restrictivas debido a la contaminación no les afectan.
- Podrán utilizar el carril BUS-VAO cuando no viajen con acompañante.
- Los vehículos industriales y comerciales con autorización de cero emisiones podrán realizar operaciones de carga y descarga en áreas de prioridad residencial en horario ampliado en 5 horas.

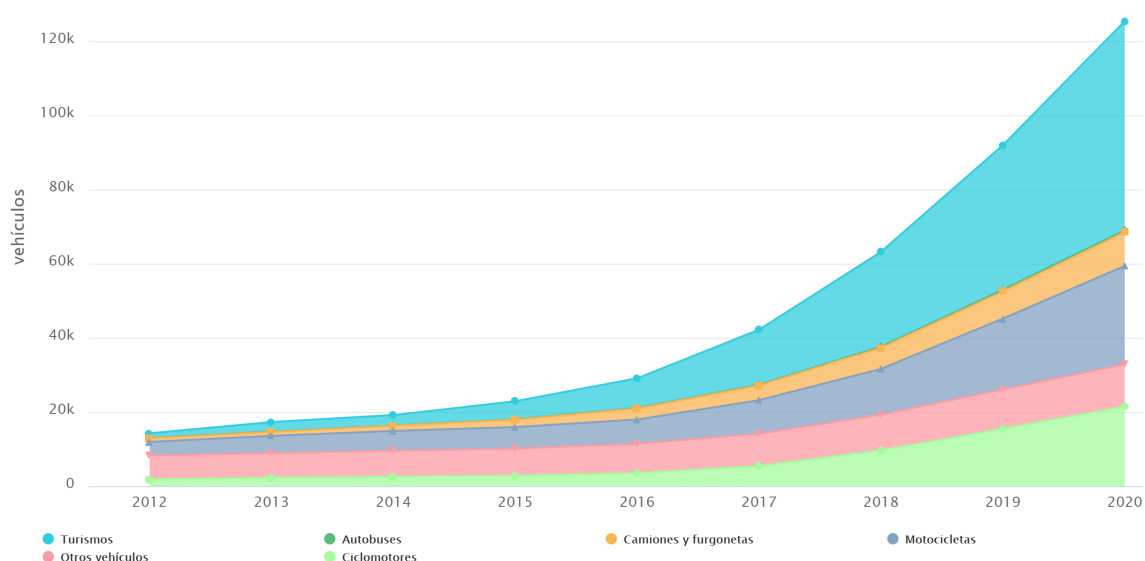


Figura 2.10: Parque de vehículos eléctricos en España desde 2012 [14].

2.5. Vehicle to Load (V2L)

Un vehículo eléctrico es, desde el punto de vista eléctrico tradicional, una carga compuesta por una batería que debe recargarse (típicamente por la noche, ya que el coste de la energía es más barata [6]), la cual se desconecta totalmente del sistema cuando el usuario hace uso del automóvil y se vuelve a conectar con una carga inferior. Sin embargo, hay periodos en los cuales el vehículo permanece conectado al sistema eléctrico y se podría explotar su potencial para llevar a cabo una gestión activa de la demanda.

2.5.1. Ventajas

Las ventajas que puede ofrecer esta propuesta tienen dimensiones tanto a pequeña escala (usuario) como a gran escala (sistema eléctrico nacional), cuyas ventajas van desde una mejora de la eficiencia del sistema eléctrico, a un incentivo para la compra de vehículos eléctricos.

- Mejora de la eficiencia energética: El hecho de hacer una instalación más independiente de la red mejora la eficiencia energética tanto a nivel particular del edificio en cuestión, como a nivel nacional, ya que las pérdidas y las emisiones de CO_2 asociadas a la generación y transporte de electricidad, se reducen.
- Regulación de frecuencia del sistema eléctrico nacional: La generación de energía eléctrica de un país se debe hacer acorde a la demanda prevista en cada momento, sin embargo, las fluctuaciones de esta última hace que sea muy difícil predecir este comportamiento con el objetivo de avisar a las centrales eléctricas para entrar en producción. Cuando la generación excede al consumo, aumenta la frecuencia de la red, y el exceso de energía producido se desperdicia. Por otra parte, cuando el consumo es superior a la generación, es necesario que el regulador del sistema mande inyectar mas energía a las centrales cuya respuesta dinámica sea rápida, lo cual encarece el precio final de la electricidad. Una solución a este problema es disponer de la capacidad suficiente de baterías conectadas a red para que puedan funcionar como carga o fuente de energía para actuar según las fluctuaciones. En caso de que la penetración de vehículos eléctricos fuese suficiente, se podría hacer uso de las baterías de estos para establecer un flujo bidireccional de energía con la red [15].
- Fuente energética móvil: Una aplicación muy útil de los vehículos eléctricos reside en el hecho de que son fuentes de energía con capacidad de transporte. En caso de que, por desastres naturales, una instalación quedase desatendida desde el punto de vista eléctrico, las baterías de los vehículos eléctricos podrían ofrecer su apoyo.
- Incentivo para la compra del vehículo eléctrico: El hecho de inyectar la energía almacenada en las baterías con retribución económica y hacer la vivienda más eficiente y disminuir la facturación mensual, podría ser un punto a favor para la compra de vehículos eléctricos.

2.5.2. Desventajas

- Degradación de baterías: Los ciclos de carga y descarga en la batería tienen como consecuencia un envejecimiento de la vida útil de la batería, ya que el parámetro que cuantifica la relación entre la capacidad máxima y la actual (*State of Health (SOH)*) disminuye con el tiempo. En la Figura 2.11 se representa el resultado de una simulación llevada a cabo por *Geotab*, en la cual se muestra la degradación de las baterías en función de la distancia anual recorrida (Figura 2.11 (a)), y la temperatura promedio del emplazamiento (Figura 2.11 (b)) [16]. Como se observa, a mayores distancias recorridas anualmente y mayores temperaturas, la vida útil de la batería disminuye. Finalmente, el simulador ofrece un estudio estadístico con distintos modelos de vehículos (Audi, BMW, Chevrolet, Ford, Tesla...) en el cual se determina que la capacidad máxima a los 6 años del vehículo es del 87.9%.

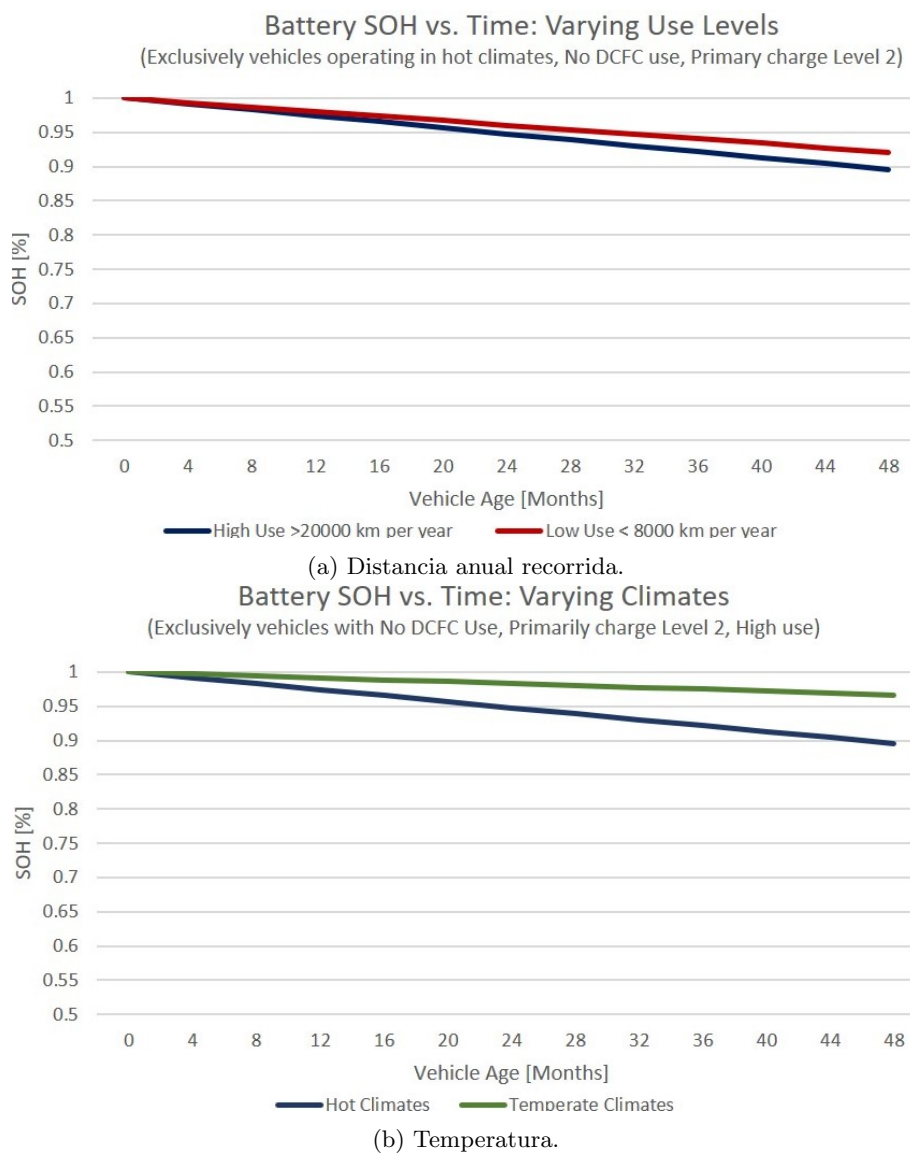


Figura 2.11: Degradación temporal de la batería en función de la distancia recorrida y la temperatura del emplazamiento [16].

- Riesgo para el usuario: La inyección de energía a la red, puede provocar cierta incertidumbre en los propietarios de los vehículos, puesto que, a la hora de hacer uso de su vehículo, no tienen garantizado el estado de carga máximo de las baterías.
- Impacto en la red: Un punto importante a tener en cuenta es el impacto de los flujos bidireccionales de carga en la red eléctrica, ya que, de haber la suficiente penetración de vehículos eléctricos, se podrían sobrecargar ciertos nodos.

2.5.3. Retos

- Reemplazo de baterías: Según aumenten los años, la vida útil de la batería disminuye, hecho que se ve acelerado con los ciclos adicionales de carga-descarga realizados para mejorar la eficiencia energética, por lo que, llegará un punto en el cual la batería quedará obsoleta para su aplicación fundamental (el transporte), puesto no cumple con los requisitos mínimos. Sin embargo, se le puede dar una segunda vida a la batería instalándola en un un sistema fotovoltaico, de tal forma que el usuario pueda vender la batería para reponer una nueva.
- Estrategias de descarga: La descarga de la batería es un punto crítico para el usuario, puesto que acota las posibilidades que este tiene en cuanto a autonomía. Es por ello, por lo que las estrategias de descarga de baterías deben tener en cuenta los patrones de cada usuario y las restricciones personales que cada uno de ellos imponga.
- Compensación al usuario: Para que esta propuesta sea factible, los usuarios deben percibir que esta actividad supone una ventaja y un ahorro económico a pesar de la degradación de la batería. Es por ello, por lo que se deben buscar fórmulas y propuestas para incentivar esta actividad.
- Gestión de la información: La conexión de vehículos a la red no es trivial, no solo por su complejidad al poder actuar como carga o fuente energética, sino por el elevado número de usuarios que se conectarían. Por ello, debe haber un intercambio de información entre los propietarios y el sistema eléctrico, que requiere de una infraestructura de telecomunicaciones que asegure unos niveles determinados de ancho de banda, fiabilidad y robustez [17].
- Agregador de demanda: Agente que tiene como objetivo gestionar y coordinar los flujos de energía entre las fuentes y las cargas de manera flexible. El agregador de demanda es un ente clave en la implementación del *Vehicle To Grid*, puesto que la gestión en el intercambio de energía entre los vehículos y la red debe estar supervisada y asegurada. Además, para incentivar la conexión de vehículos a la red, el agregador debe establecer una garantía para las baterías [17].

2.5.4. Suposiciones

Para poder establecer un estudio en la implantación de esta tecnología, es necesario establecer una serie de criterios en cuanto a las suposiciones y restricciones, con el objetivo de acotar los grados de libertad que influyen en el sistema. A continuación, se describen todas ellas:

- Cada usuario puede establecer un umbral mínimo de carga el cual debe estar garantizado antes de regresar a su vivienda. En el algoritmo desarrollado, se ha tenido en cuenta dicho parámetro a través de un coeficiente β .
- Con el objetivo de hacer la simulación lo más realista posible, se ha considerado que existen unas pérdidas en el intercambio de energía. Para ello, se ha acudido a un estudio en el cual se estudia la eficiencia en la carga y descarga de vehículos mediante la propuesta del *Vehicle to Grid*. En dicho estudio se estipula que la eficiencia global en un ciclo completo de carga y descarga es del 87 % [18].
- Hay suficientes puntos de recarga de vehículo eléctrico a lo largo del territorio. En la actualidad, en España hay 20620 puntos de recarga públicos a lo largo del territorio [19].
- Existe suficiente energía en la batería para que esta sea inyectada a la red: Para que la propuesta sea viable, las baterías deben tener una capacidad de almacenamiento tal que implique que la autonomía del vehículo eléctrico sea superior a la distancia que tiene que recorrer su usuario de media al día. Son varios los estudios que avalan esta hipótesis, ejemplo de ello es el artículo [20] de la bibliografía, donde se refleja que el estado de carga de las baterías de los vehículos eléctricos en Reino Unido tras un día de trabajo, basado en los patrones de conducción de sus usuarios es superior al 50 % para la mayoría de usuarios, por lo que se dispone de dicha energía para ser extraída a lo largo del día. [20].

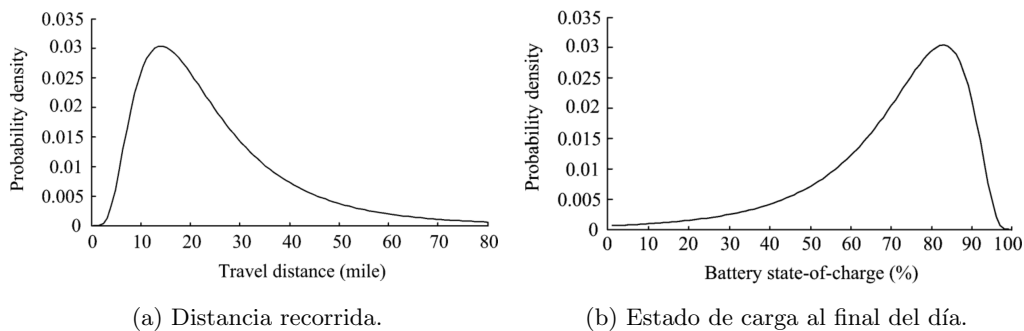


Figura 2.12: Densidad de probabilidad de la distancia recorrida y del estado de carga de las baterías al final del día en Reino Unido [20].

- La penetración de los vehículos eléctricos es suficientemente alta: La transferencia de energía del vehículo a la carga es viable dependiendo de la relación entre la demanda y la capacidad de la batería, la cual se multiplica con el número de vehículos disponibles. Por ello, para aplicaciones a gran escala, como *Vehicle To Grid* se necesita una alta penetración de vehículos eléctricos en la flota nacional. Concretamente, en España el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima [2], estipula que para el 2030, el parque móvil estará electrificado en un 16 %, con la incorporación de 5 millones de vehículos eléctricos, y un parque de cero emisiones para 2050. Para mostrar las implicaciones que tendría el *Vehicle To Grid*, se presenta en la Figura 2.13 la demanda nacional del Reino Unido en azul, y como se podría estabilizar con la carga de vehículos durante la noche.

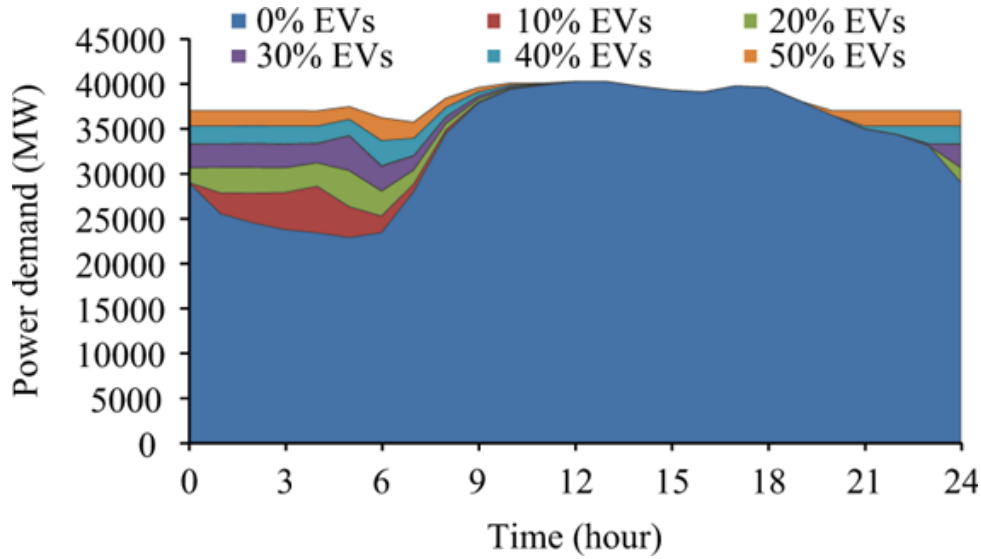


Figura 2.13: Estabilización de la curva nacional de demanda de Reino Unido con vehículos eléctricos en función de la penetración de estos en la flota nacional [20].

- La gestión inteligente de la energía almacenada en cada vehículo depende de los patrones de conducción del usuario: el intercambio de energía debe hacerse en función de las necesidades y restricciones que imponga el usuario. De hecho, este punto es crítico en las implicaciones de la propuesta. El artículo de la bibliografía [21] lleva a cabo un estudio en función de 3 escenarios de parking distintos ³.
 - Corto plazo: Los vehículos se encuentran estacionados dentro de un periodo de tiempo en un parking de una oficina o un supermercado.
 - Corto plazo modificado: El estacionamiento de los vehículos se distribuye en el tiempo y no están tan concentrados como en el caso anterior, por ejemplo, en hospitales, donde siempre hay vehículos conectados y no hay ninguna hora punta.
 - Largo plazo: El tiempo que permanecen los vehículos estacionados, se alarga varios días, por ejemplo, en un aeropuerto.

Para analizar el impacto de los tres casos anteriores, se importa una curva de consumo típica de un centro comercial y se hacen 3 simulaciones con diferente número de vehículos conectados al sistema [21]. Una de las variables analizadas, es la disminución porcentual de la energía absorbida de la red tras la conexión de los vehículos, calculada con la expresión de la Ecuación 2.3:

$$Disminucion_{porcentual} = \frac{\sum (Demanda_{antes} - Demanda_{ahora})}{\sum Demanda_{antes}} \quad (2.3)$$

A continuación se muestra en la Figura 2.14 la disminución porcentual para los 3 escenarios y para simulaciones con 50, 100 y 500 vehículos conectados al sistema.

³Para más información sobre las características temporales de los vehículos estacionados, y las características eléctricas de sus baterías, acudir a la cita bibliográfica [21].

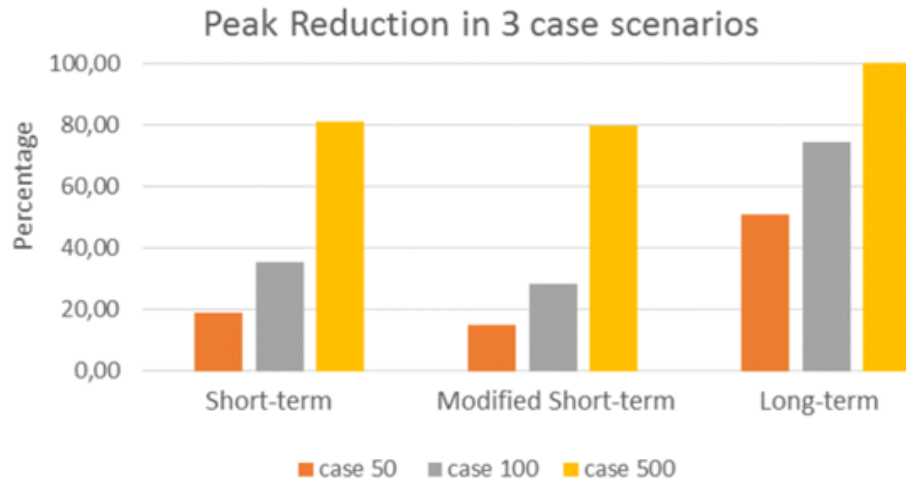


Figura 2.14: Reducción porcentual de la energía absorbida de la red en función de los vehículos conectados al sistema y para los 3 escenarios de estudio [21].

La Figura 2.14 muestra cómo se obtiene mayor independencia de la red a medida que aumenta el número de vehículos conectados al sistema, puesto que la capacidad global aumenta. Entre los escenarios a corto plazo y corto plazo modificado, no se encuentran grandes diferencias, sin embargo, para el caso en el cual el vehículo está conectado varios días a la red, se observa un salto cuantitativo. La reducción de la energía absorbida de la red para este último caso es de un 50 % para las 3 flotas de vehículos conectadas, consiguiendo una independencia total de la red en caso de que hubiese 500 vehículos conectados.

Capítulo 3

Desarrollo Software

En este capítulo se describen los algoritmos y metodologías desarrollados en la implementación del programa, así como las suposiciones y simplificaciones consideradas.

3.1. Objetivo

El objetivo principal del proyecto es desarrollar un software que sea capaz de simular un escenario concreto de intercambio de energía entre un edificio con fotovoltaica y un conjunto de vehículos, que serán los núcleos fundamentales de estudio. A continuación, se detallan las principales características de cada uno de ellos:

- Edificio:
 1. Consumo eléctrico (el cual se puede definir importando las curvas de demanda de las diferentes cargas eléctricas).
 2. Generación fotovoltaica (definida a partir de datos importados o simulados).

Con lo expuesto anteriormente, el software elabora una curva de generación fotovoltaica y consumo eléctrico. Destacar que, aunque los datos de importación tengan una base horaria, el software está preparado para interpolar los datos en un intervalo de tiempo menor si el usuario deseara trabajar con mayor precisión.

- Vehículo:
 1. Capacidad de la batería (kWh).
 2. Estado de carga: relación entre la energía actual de la batería, y la máxima capacidad de ella (SOC: *State Of Charge*).
 3. Hora de llegada y salida.
 4. Consumo del vehículo cada 100 kilómetros (kWh/100km).
 5. Distancia que recorre el vehículo diariamente desde el puesto de trabajo al hogar (km).
 6. Margen de confianza: parámetro que estipula cada conductor el cual incrementa en un tanto por ciento la energía que necesitaría el vehículo para regresar a su casa (β).

Con las variables descritas en este apartado, el programa determinará uno de los parámetros críticos que caracterizan al vehículo, el estado de carga mínimo necesario para regresar al hogar, determinado a partir de la siguiente expresión:

$$SOC_{min} = SOC_{min(fabricante)} + \beta \cdot \frac{Consumo \cdot Distancia}{100 \cdot Capacidad} \quad (3.1)$$

A partir de todos los parámetros descritos anteriormente, se definen los coeficientes de reparto de energía, los cuales se describen en los siguientes apartados.

3.2. Algoritmo de reparto de energía

El primer reto a abordar en la implementación de V2L es qué criterio definir en lo que a reparto de energía entre la carga y el vehículo se refiere, ya que se debe tener en cuenta la casuística de cada instante de tiempo.

Los vehículos conectados tienen características propias como son: capacidad, estado de carga mínimo y máximo recomendados por el fabricante ... y características derivadas de los patrones de conducción de su usuario como son: distancia estimada que debe recorrer hasta llegar a su domicilio y horas de llegada al centro de trabajo y salida desde el centro de trabajo a la vivienda.

El algoritmo propuesto tiene en cuenta dos dimensiones: la energía, y el tiempo. En los subapartados siguientes se definirán los algoritmos desarrollados para la obtención de unos coeficientes con el objetivo de determinar el reparto de energía de manera cuantitativa.

3.2.1. Coeficiente de energía

Uno de los parámetros clave para poder llevar a cabo un reparto justo de la energía en función de las necesidades de cada vehículo viene definido por el parámetro del estado de carga. Las Ecuaciones 3.2 y 3.3 muestran las expresiones para los coeficientes de energía de carga (δ_C) y descarga (δ_D) respectivamente.

n = número de vehículos

$$\delta_C = \frac{\Delta SOC_i}{\sum_i \Delta SOC_i} \quad (3.2)$$

$$\Delta SOC = SOC_{max} - SOC_{actual}$$

$$\delta_D = \frac{\Delta SOC_i}{\sum_i \Delta SOC_i} \quad (3.3)$$

$$\Delta SOC = SOC_{actual} - SOC_{min}$$

- Existe un exceso de energía: Los coeficientes de reparto se deciden en función de la relación entre el estado de carga actual y el máximo de la batería, de tal forma que recibe más energía el vehículo que está más descargado. En este caso, el vehículo 3 está cargado al 30 % por lo que su coeficiente es mayor.
- Existe un defecto de energía: Hay que inyectar energía al edificio, por lo que inyectará más energía el vehículo que tenga un estado de carga mayor en relación con el estado de carga mínimo que asegura que el vehículo es capaz de regresar a su domicilio. En este caso, son los vehículos 1 y 4.

Con objeto de clarificar este apartado, en la Tabla 3.1 se reflejan los estados de carga máximos, mínimos y actuales para 4 vehículos eléctricos, junto con los coeficientes de energía para dos escenarios: carga y descarga del vehículo.

Tabla 3.1: Coeficientes de reparto según el estado de carga.

	SOC_{max}	SOC_{min}	SOC_{actual}	ΔSOC_C	ΔSOC_D	δ_C	δ_D
Vehículo 1	0.9	0.3	0.7	0.2	0.4	0.17	0.40
Vehículo 2	0.9	0.4	0.5	0.4	0.1	0.33	0.10
Vehículo 3	0.9	0.3	0.4	0.5	0.1	0.42	0.10
Vehículo 4	0.9	0.4	0.8	0.1	0.4	0.08	0.40

3.2.2. Coeficiente de tiempo

La dimensión más crítica en el estudio es la temporal, ya que el usuario debe tener garantizado que, cuando vaya a regresar a su hogar, el vehículo tenga un estado de carga suficiente para realizar el trayecto. Es por ello por lo que se define un coeficiente temporal de carga (γ_C) y descarga (γ_D), el cual tiene en cuenta el tiempo que queda hasta que el vehículo abandone (previsiblemente) la Escuela de tal forma que el vehículo que tiene previsto abandonar la escuela antes tenga más prioridad de carga, y menos de descarga.

$$\gamma_C = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta T_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta T_i}{i}} \quad (3.4)$$

$$\gamma_D = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta T_i}{i}}{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta T_i} \quad (3.5)$$

$$\Delta T = T_{vuelta} - T_{actual}$$

- Existe un exceso de energía: Los vehículos que abandonan la Escuela antes que otros, tienen prioridad en la carga de baterías. Este es el caso del vehículo 3, al cual le queda 1 hora para abandonar la escuela, por lo que su coeficiente de carga es significativamente superior que el de los otros vehículos.

- Existe un defecto de energía: Los vehículos que están estacionados más tiempo que los otros tienen una prioridad de descarga mayor. El vehículo 4 tiene previsto abandonar la escuela dentro de 5 horas, por lo que su coeficiente de descarga es prioritario frente al de los demás vehículos.

A continuación, se muestra en la Tabla 3.2 un ejemplo sencillo de 4 vehículos, para determinar los coeficientes temporales.

Tabla 3.2: Coeficientes de reparto según el tiempo en la escuela.

	$T_{actual}-T_{vueta}$	ΔT	γ_C	γ_D
Vehículo 1	16:00-19:00	3	0.18	0.25
Vehículo 2	16:00-19:00	3	0.18	0.25
Vehículo 3	16:00-17:00	1	0.54	0.08
Vehículo 4	16:00-21:00	5	0.11	0.42

3.2.3. Coeficiente total

El coeficiente global de carga (C_C) y descarga (C_D) se determina como la suma de los coeficientes de energía y de tiempo, ponderados con el factor $\alpha \in [0, 1]$, el cual determina la importancia de cada uno de ellos:

$$C_C = \alpha \cdot \delta_C + (1 - \alpha) \cdot \gamma_C \quad (3.6)$$

$$C_D = \alpha \cdot \delta_D + (1 - \alpha) \cdot \gamma_D \quad (3.7)$$

Si se tiene en cuenta el ejemplo expuesto anteriormente en la Tabla 3.1 con el coeficiente de energía y en la Tabla 3.2 con el coeficiente de reparto según el tiempo que le queda al vehículo para abandonar la Escuela, los coeficientes de reparto finales resultantes son los mostrados en la Tabla 3.3 para un α de 0,5.

Tabla 3.3: Coeficientes de carga y descarga.

	Energía		Tiempo		Total	
	δ_C	δ_D	γ_C	γ_D	C_C	C_D
Vehículo 1	0.17	0.40	0.18	0.25	0.17	0.33
Vehículo 2	0.33	0.10	0.18	0.25	0.26	0.18
Vehículo 3	0.42	0.10	0.54	0.08	0.48	0.09
Vehículo 4	0.08	0.40	0.11	0.42	0.10	0.41

Según la Tabla 3.3, el vehículo 3 es el que tendría mayor prioridad de carga, ya que le correspondería un 48 % de la energía excedente, mientras que en caso de haber un defecto energético, el vehículo 4 tendría que aportar un 41 % de dicho defecto.

3.2.4. Implicaciones de los coeficientes

A lo largo del capítulo se ha descrito el algoritmo para establecer un reparto de la energía en función de dos coeficientes que ponderan: el estado de carga de las baterías (γ_C y γ_D) y el tiempo que le queda al vehículo para abandonar el edificio (δ_C y δ_D). Los coeficientes totales de carga y descarga (C_C y C_D), se determina a partir del parámetro α que da más peso a uno u a otro.

Para ilustrar el comportamiento del sistema, se ha simulado un caso en el cual hay dos vehículos conectados al edificio de tal forma que el vehículo 1, tenga prioridad de carga por tiempo (ya que abandona el edificio antes), y al vehículo 2 tenga preferencia de carga (puesto que necesita más energía para regresar a su casa). Las características de ambos vehículos se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Parámetros característicos de los dos vehículos del estudio.

	Tiempo en la escuela	Distancia hasta el edificio (km)
Vehículo 1	8:00 - 16:00	20
Vehículo 2	8:00 - 20:00	60

En la Figura 3.1, se muestra la distribución de la densidad de probabilidad de los coeficientes de carga y descarga totales para los vehículos 1 y 2 a lo largo de un año en función del parámetro α .

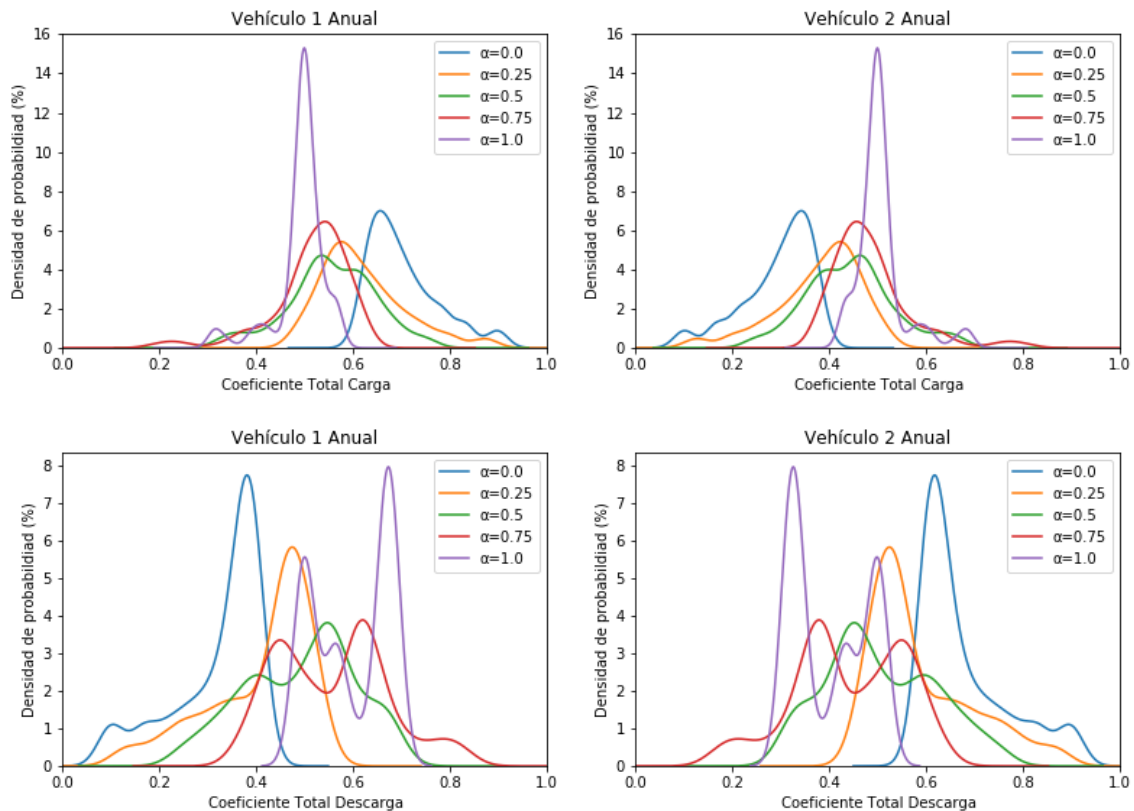


Figura 3.1: Distribución de probabilidad de los Coeficientes Totales de Carga y Descarga para los vehículo 1 y 2. Elaboración propia.

La Figura 3.1 muestra un escenario sencillo en el que solo hay dos vehículos conectados al sistema a lo largo de un año, por lo que la distribución de probabilidad de los coeficientes es simétrica, ya que si un vehículo tiene una probabilidad x , el otro tiene $1 - x$. Acorde a las características de los dos vehículos simulados, el algoritmo debería priorizar la carga en términos temporales al vehículo 1, ya que, abandonará el edificio 4 horas antes que el vehículo 2, mientras que, como el vehículo 2 requiere tres veces la energía del vehículo 1 para regresar a su casa, un valor de α elevado, debería priorizar su carga.

Si se atiende a la Figura 3.1, se observa cómo, para un $\alpha = 0$, el algoritmo tiende a dar más prioridad de carga y menos de descarga al vehículo 1, ya que, en este caso, el coeficiente total es equivalente al coeficiente temporal. Por otro lado, un $\alpha = 1$, ponderaría únicamente la dimensión energética, por lo cual, el vehículo 2 tiene, estadísticamente, una prioridad de carga mayor que el vehículo 1. Los valores intermedios de α , indican las situaciones en las cuales se da más prioridad a un coeficiente u a otro.

Una vez analizado el comportamiento estadístico de los coeficientes para los dos vehículos, es necesario saber si la distribución muestra distintos patrones a lo largo del año. Para ello, se muestra a continuación en las Figuras 3.2 y 3.3 la densidad de probabilidad de los coeficientes de carga y descarga del vehículo 1 en las distintas estaciones del año.

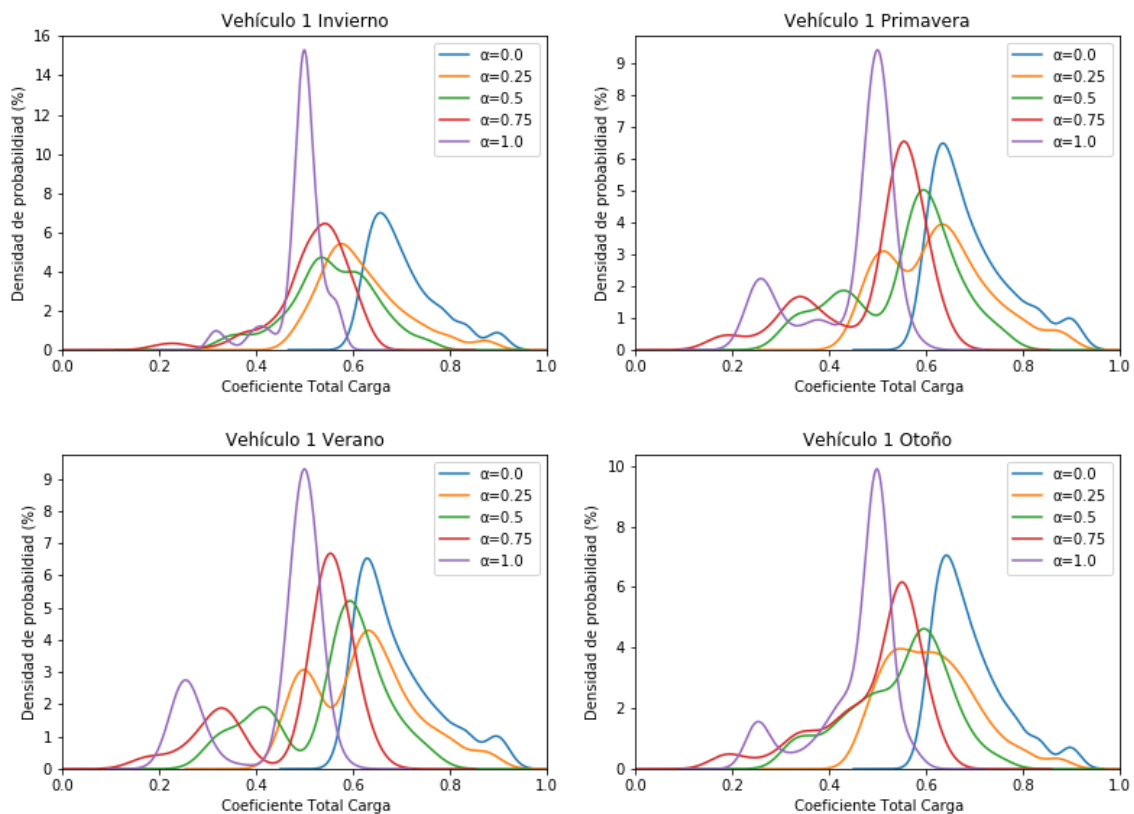


Figura 3.2: Distribución de probabilidad de los Coeficientes Totales de Carga para el Vehículo 1 en diferentes estaciones. Elaboración propia.

En las Figuras 3.2 y 3.3 se observa como la forma de las curvas se mantienen prácticamente constantes a lo largo del año, ya que el comportamiento del vehículo es siempre el mismo, mientras que los únicos parámetros variables son: el consumo y la generación fotovoltaica. Sin embargo, en términos absolutos, hay ciertas discrepancias entre estaciones, ya que la probabilidad de que el coeficiente esté comprendido en un rango de valores es más acentuado en invierno, concretamente, para $\alpha = 1$.

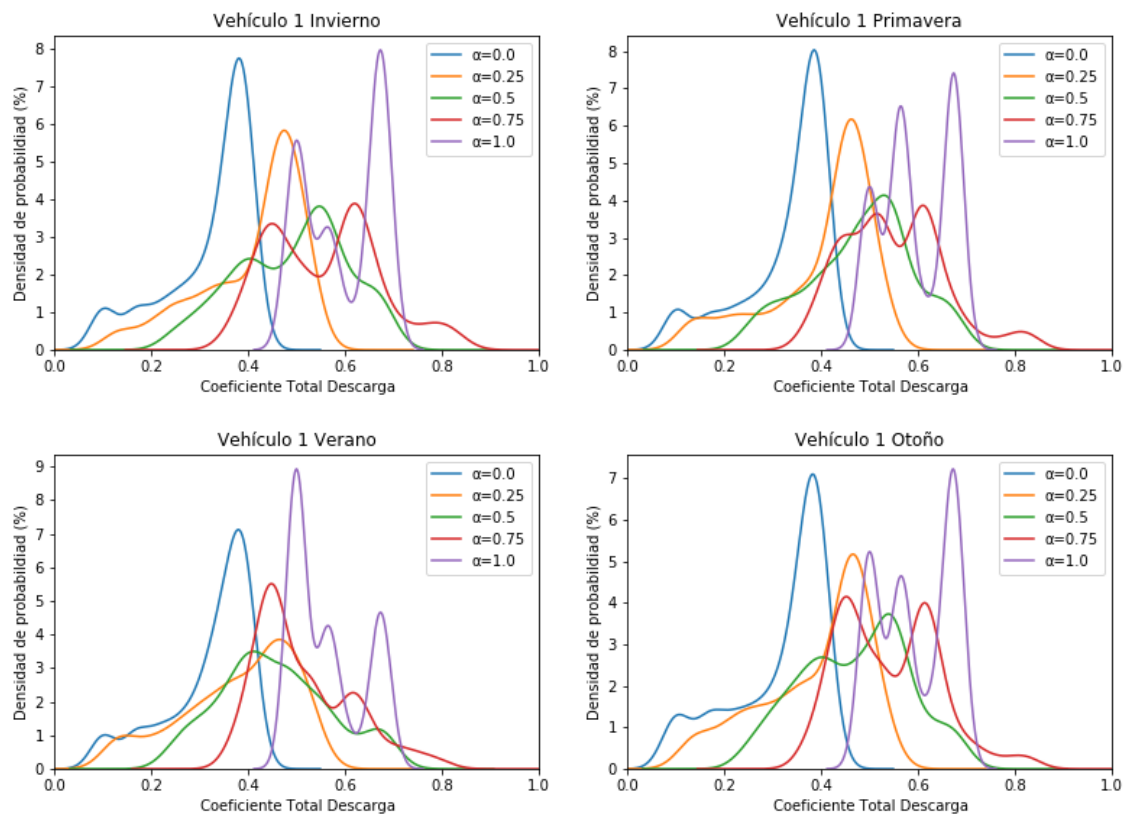
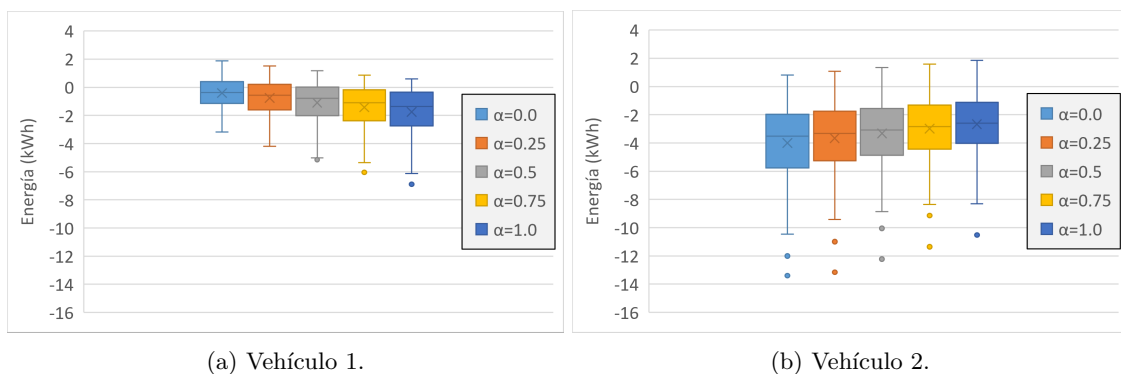


Figura 3.3: Distribución de probabilidad de los Coeficientes Totales de Descarga para el Vehículo 1 en diferentes estaciones. Elaboración propia.

Uno de los datos fundamentales que el usuario debe conocer de antemano, es la energía que, previsiblemente tendrá su vehículo al abandonar el edificio. Para ello, se ha llevado a cabo un estudio estadístico de la diferencia energética de la batería del vehículo justo antes de abandonar el edificio y a su llegada, de tal forma que, si la diferencia es positiva, el vehículo tiene más energía y viceversa.

A continuación se muestra en la Figura 3.4 un estudio en el cual se representan la diferencia energética en gráficas de cajas y bigotes para los dos vehículos del estudio.



(a) Vehículo 1.

(b) Vehículo 2.

Figura 3.4: Diagrama de cajas y bigotes de la diferencia energética de la batería a la salida y a la entrada del edificio. Elaboración propia.

La Figura 3.4 muestra un comportamiento que era esperable, ya que el vehículo 1 (a), tiene estadísticamente más energía al abandonar el edificio para valores de α cercanos a 0, ya que el algoritmo le da más prioridad a la dimensión temporal, mientras que el vehículo 2 (b), se beneficia más de valores de α próximos a 1, ya que el vehículo 2 necesita más energía para regresar a su vivienda. Sin embargo, cabe destacar que, para el estudio realizado, los vehículos abandonarían el edificio con menor energía la mayoría de las veces.

Otra de las respuestas que el usuario debe conocer es el comportamiento del sistema en función de las estaciones. Es por ello, por lo que se ha elaborado unas gráficas que representan la densidad de probabilidad de la diferencia energética, representadas en la Figura 3.5. En este caso, al no haber tanta diferencia entre estaciones, se ha decidido mostrar las estaciones de invierno y verano para ambos vehículos.

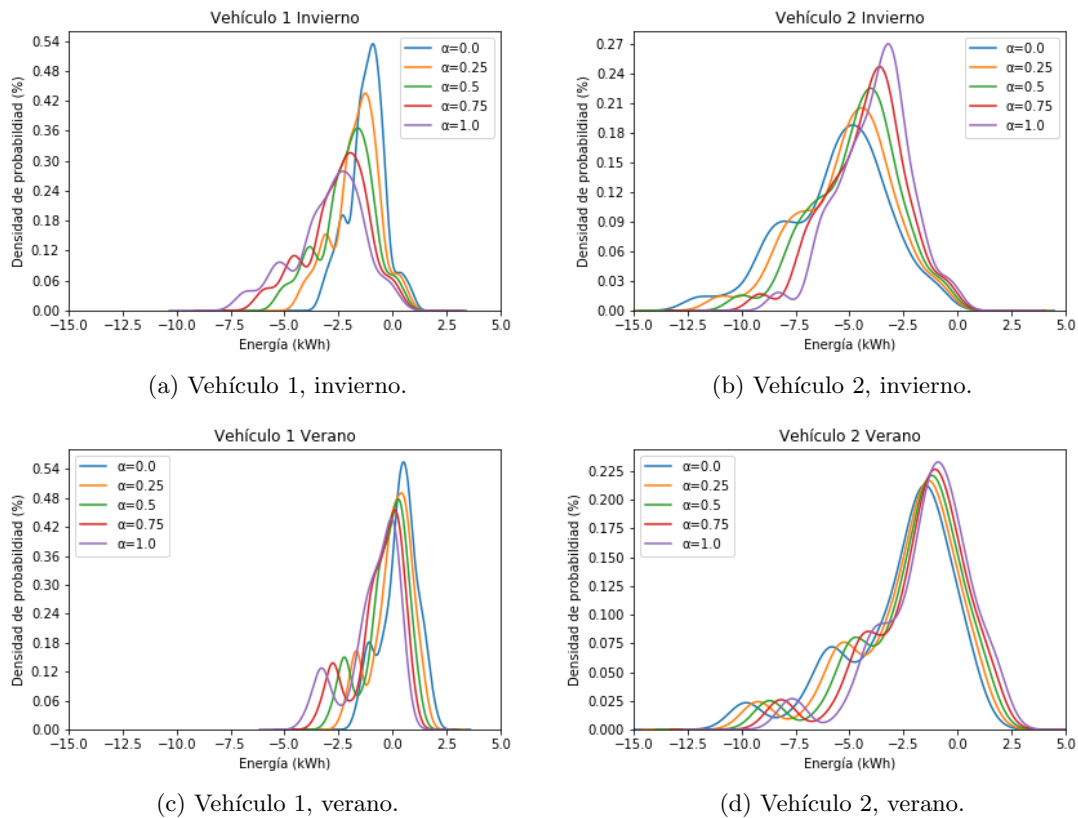


Figura 3.5: Densidad de probabilidad de la diferencia energética en invierno y verano para los dos vehículos del estudio. Elaboración propia.

De la Figura 3.5 se deduce que la probabilidad de que tanto el vehículo 1 como el vehículo 2, tengan mayor energía al abandonar el edificio es mayor en invierno que en verano, ya que hay mayor excedente de energía. En cuanto a los valores de α , cabe destacar que no hay grandes diferencias en términos estadísticos de la diferencia energética. Finalmente, resaltar que hay una gran diferencia energética entre el vehículo 1 y el vehículo 2, ya que el primero abandona el edificio cuando hay más excedente de energía (16:00), mientras que el segundo lo hace cuando, mayoritariamente existe un defecto (20:00).

3.3. Algoritmo global

Una vez definidas todas las entidades básicas del programa (vehículos y cargas), recogidas en clases con sus correspondientes atributos y el criterio de reparto de energía en función del parámetro α y de los coeficientes de energía y de tiempo δ y γ , es necesario definir el algoritmo global que integre toda esta información para actuar en cada diferencial de tiempo considerado.

Para la simulación del sistema, se da la opción al usuario de elegir el intervalo de tiempo que quiere emplear para la ejecución del programa, de tal forma que el programa interpola los datos de partida (típicamente horarios), para ejecutar el algoritmo global. Nótese que a medida que se disminuya el periodo de estudio, el coste computacional de la simulación aumenta.

Aunque en el apartado anterior se ha mostrado una simulación sencilla en la cual había involucrados dos vehículos, el sistema es escalable a tantos vehículos como se desee, de tal manera que el algoritmo se ejecuta tantas veces como vehículos hay conectados. De esta manera, el algoritmo descrito en la Figura 3.8, el cual se describirá al final del capítulo, se ejecuta el número de veces descrito en la Ecuación 3.8:

$$Iteraciones = Numero_{vehiculos} \cdot \frac{8760}{intervalo(h)} \quad (3.8)$$

El software da como resultado 4 archivos de texto (CSV) en base horaria, mensual, mensual por horas y diaria de todas las variables de entrada y salida involucradas en el programa como son:

1. Generación fotovoltaica
2. Cargas eléctricas
3. Características particulares de cada vehículo:
 - a) Disponibilidad
 - b) Estado de carga
 - c) Energía
 - d) Coeficientes de carga y descarga de energía, tiempo y totales
4. Parámetros energéticos
 - a) Energía absorbida/inyectada de la red
 - b) Energía absorbida/inyectada de los vehículos
 - c) Autosuficiencia
 - d) Autoconsumo

Los parámetros mencionados anteriormente, son analizados a posteriori de manera que se puedan obtener las conclusiones y resultados pertinentes a cada estudio en el Capítulo 4.

Los parámetros de autosuficiencia y autoconsumo definidos en las Ecuaciones 2.1 y 2.2, han sido redefinidos de tal forma que incorporen las componentes energéticas correspondientes a los vehículos en las Ecuaciones 3.9 y 3.10.

$$\text{Autoconsumo} = \frac{\text{Energia}_{\text{Autoconsumida}} + \text{Energia}_{\text{Inyectada(Vehiculos)}}}{\text{Energia}_{\text{Fotovoltaica}}} \quad (3.9)$$

$$\text{Autosuficiencia} = \frac{\text{Energia}_{\text{Autoconsumida}} + \text{Energia}_{\text{Absorbida(Vehiculos)}}}{\text{Energia}_{\text{Consumida}}} \quad (3.10)$$

Estas nuevas expresiones, están completamente justificadas, ya que, la energía inyectada a los vehículos, se puede considerar como autoconsumida por el edificio, ya que, posteriormente, la energía que absorba de ellos, será de origen renovable porque sus baterías se han recargado con energía excedente de la instalación fotovoltaica (nótese que, en caso de que la energía inyectada o absorbida de los vehículos fuese nula, se obtendrían las expresiones de autoconsumo y autosuficiencia de las las Ecuaciones 2.2 y 2.1, respectivamente).

Con el objetivo de ilustrar de manera cualitativa las componentes energéticas correspondientes a la inyección y absorción de energía de los vehículos, se muestra en la Figura 3.6 la distribución energética que tendría la conexión de 1 vehículo en la misma vivienda que en la Figura 2.4.

En la Figura 3.6 se observa cómo hay un intervalo de tiempo en el cual, el vehículo está conectado al sistema, ya que, o aporta energía al edificio (morado), o se le inyectan los excedentes de la instalación fotovoltaica (rosa). En cualquiera de los dos casos, la dependencia del edificio con la red decrece, ya que tanto la absorción o inyección de energía hacia ella disminuye.

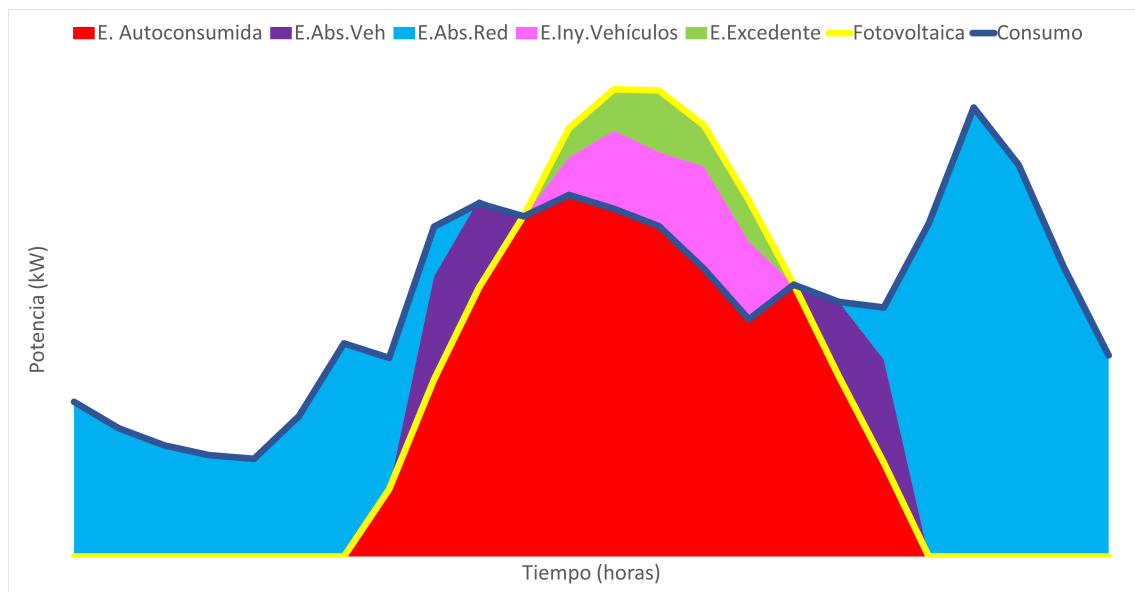


Figura 3.6: Componentes energéticas de una instalación fotovoltaica con un vehículo conectado. Ejes sin unidades, puesto que la Figura muestra un concepto teórico. Elaboración propia.

Una vez descritos todos los parámetros involucrados en el programa, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 3.7, se describe a continuación el algoritmo global que gobierna las decisiones adoptadas por el software (Figura 3.8).

Se parte de la base de que los datos de generación fotovoltaica, curva de consumo, y características de los vehículos han sido previamente definidos. Por cada diferencial de tiempo considerado, el software ejecuta el algoritmo, y comprueba en cada caso, si existe un excedente o un defecto de energía, y actúa en consecuencia.

- Exceso de energía: se comprueba si existe algún vehículo conectado al edificio:
 - No hay vehículos conectados: se inyecta la energía excedente a la red.
 - Hay vehículos conectados a la red: se comprueba si se puede inyectar energía a dichos vehículos (ya que podrían tener las baterías cargadas). En caso afirmativo, se determinan los coeficientes de reparto energético a cada vehículo, y se le inyecta a cada vehículo la energía que le corresponda.
- Defecto de energía: se comprueba si existe algún vehículo conectado al edificio:
 - No hay vehículos conectados: se absorbe la energía de la red para satisfacer la demanda energética.
 - Hay vehículos conectados a la red: se comprueba si se puede extraer energía de dichos vehículos (ya que podrían tener las baterías próximas al estado de carga mínimo). En caso afirmativo, se determinan los coeficientes de reparto energético a cada vehículo, y se absorbe de cada vehículo la energía que le corresponda.

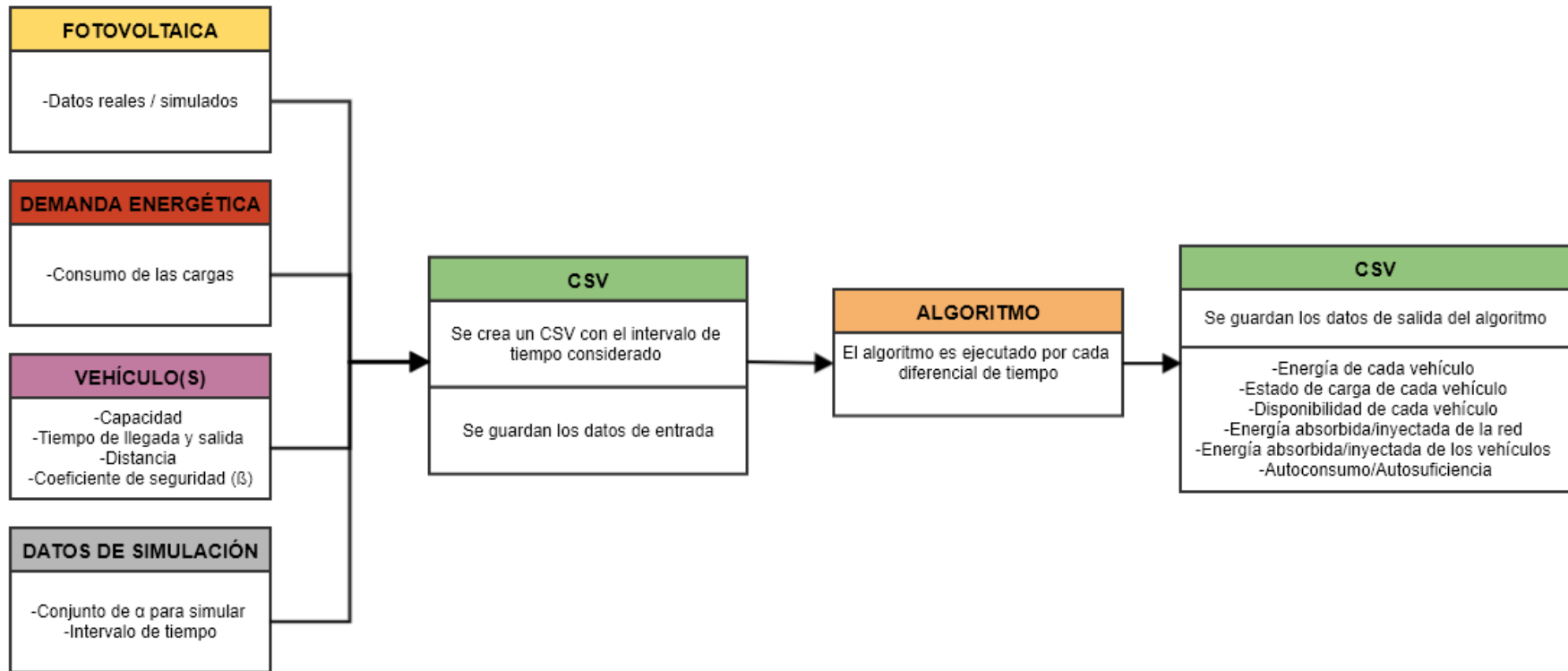


Figura 3.7: Diagrama de flujo de la ejecución del programa. Elaboración propia.

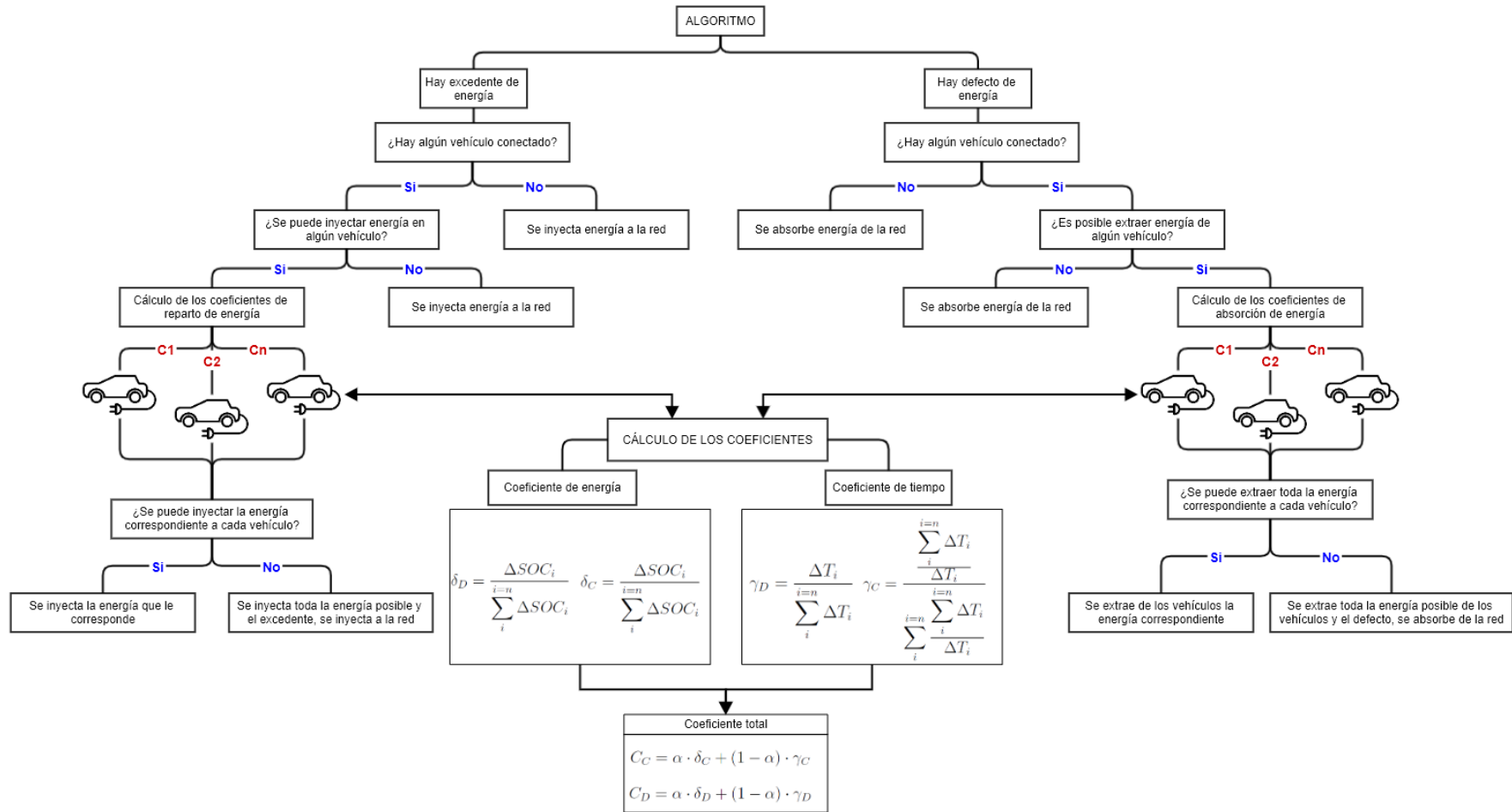


Figura 3.8: Algoritmo implementado en el software. Elaboración propia.

Capítulo 4

Resultados y discusión

Una vez se ha descrito el desarrollo software, se plantean dos casos de estudio que se simularán en el programa: el edificio D de la escuela de Telecomunicaciones, al cual se conectará un gran número de vehículos, y la Magic Box, que representa una oficina a la cual se conecta 1 vehículo.

4.1. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación

Con el objetivo de mostrar las implicaciones que tendría conectar vehículos eléctricos a un edificio con alta demanda, se propone como caso de estudio el Edificio D de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (Figura 4.1).



Figura 4.1: Vista aérea del Edificio D desde Google Earth [22].

Del emplazamiento se conoce la curva horaria de demanda anual, en base a medidas hechas en contador. Por otra parte, como se puede ver en la Figura 4.1, el edificio no dispone de instalación fotovoltaica, por lo que, se plantea un diseño para instalar la máxima potencia posible. Para ello, se ha llevado a cabo un levantamiento 3D del edificio en *SketchUp* [23] y se ha diseñado una instalación en la superficie del edificio D, y la superficie del Edificio A colindante.

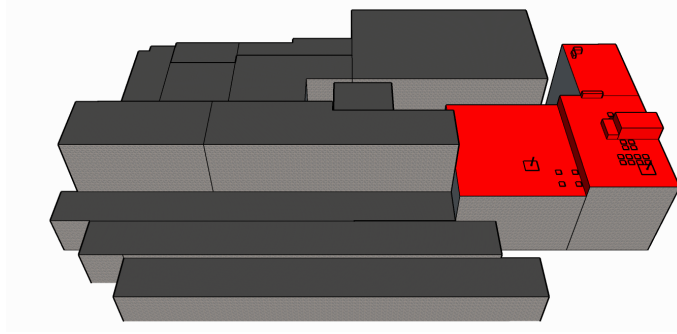


Figura 4.2: Levantamiento del Edificio D en *SketchUp*. Elaboración propia.

Atendiendo al criterio de no sombrear la fila trasera en el mediodía solar del solsticio de invierno, se determina que, la potencia instalada es de 60.2 kW. Una vez simulado el sistema, los datos se exportan de *PVSyst*, cuyos resultados se encuentran disponibles en el Anexo y se importan al programa desarrollado.

Para ilustrar el comportamiento eléctrico del Edificio D, se ha elaborado en la Figura 4.3 una gráfica en la cual se muestra la generación fotovoltaica y el consumo en líneas continua y discontinua, respectivamente en las distintas estaciones.

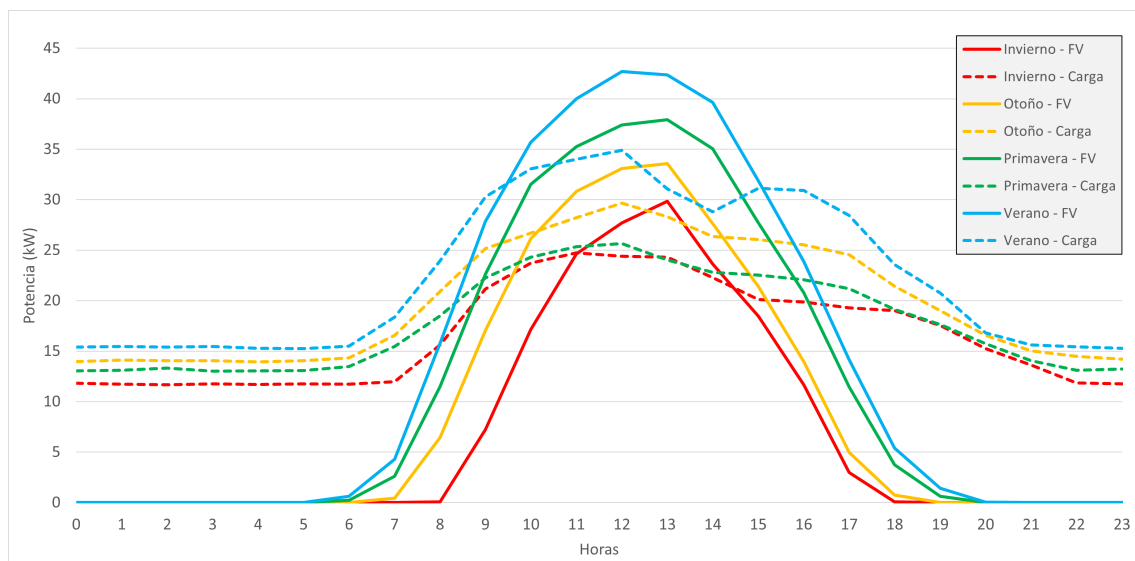


Figura 4.3: Curvas de la generación y el consumo promedio por estaciones del Edificio D. Elaboración propia.

En la Figura 4.3 se puede ver los periodos en los cuales existe un excedente y un defecto de energía. Por ejemplo, en invierno el edificio tiene un excedente de energía desde las 11:00 hasta las 15:00, periodo en el cual se inyectaría energía a los vehículos.

Por otra parte, para hacer el estudio lo más realista posible, se ha llevado a cabo un estudio de una encuesta realizada en 2016 a los alumnos, docentes y personal del centro sobre sus patrones de llegada, salida y distancia desde su vivienda a la Escuela, cuyos resultados están expuestos en la Figura 4.4.

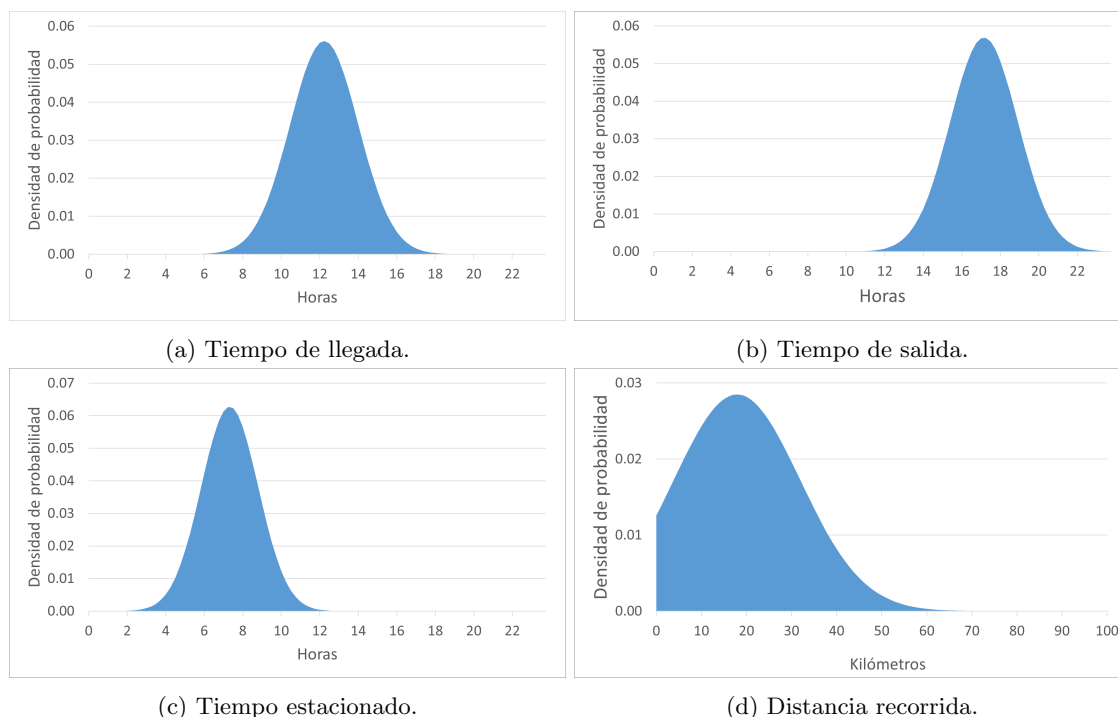


Figura 4.4: Distribución estadística de las variables analizadas en la encuesta. Elaboración propia.

En la Figura 4.4 se observa como la mayor parte del personal y alumnado, acude a la escuela por la mañana y la abandonan por la tarde, con un estacionamiento promedio en la escuela de 7 horas, y una distancia desde su vivienda a la escuela que no supera los 50 kilómetros en su mayor parte.

A continuación, se muestra en las Figuras 4.5 y 4.6, la energía absorbida e inyectada a la red y los vehículos, respectivamente y en la Figura 4.7 los parámetros de autoconsumo y autosuficiencia mensuales para el Edificio D.

Las Figuras 4.5 y 4.6, muestran que el comportamiento energético del edificio y de los vehículos no es uniforme a lo largo del año, esto es debido a las diferencias entre la generación y el consumo en las distintas estaciones. En primer lugar, destacar que en los meses de julio y agosto no hay variaciones con respecto al escenario en el cual no hay vehículos conectados, puesto que en dichos meses no acude personal a la escuela. Por otra parte mencionar que, los vehículos se verían beneficiados desde un punto de vista energético en los meses cercanos al verano puesto que, al existir mayor excedente de energía, su batería se ve más recargada, hecho que se puede observar en las subfiguras (b), puesto que la inyección de energía en la red disminuye y en los vehículos aumenta. Sin embargo, desde el punto de vista del edificio, éste sacaría mayor provecho en aquellos meses en los cuales hay un defecto energético, es decir, en invierno, ya que, como se puede ver en las subfiguras (a), la energía absorbida de los vehículos tiene su máximo en el mes de noviembre. Finalmente, el autoconsumo alcanza sus valores máximos en los meses de junio y septiembre, con una mejora porcentual respecto de no tener vehículos de casi el 30 % en marzo, mientras que la mayor mejora de autosuficiencia se obtiene en los meses de noviembre y diciembre con una mejora porcentual de más del 20 %.

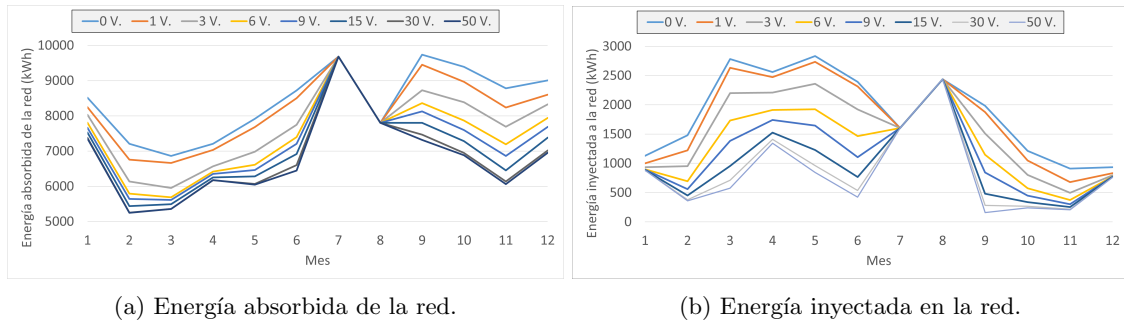


Figura 4.5: Parámetros energéticos mensuales del edificio D. Elaboración propia.

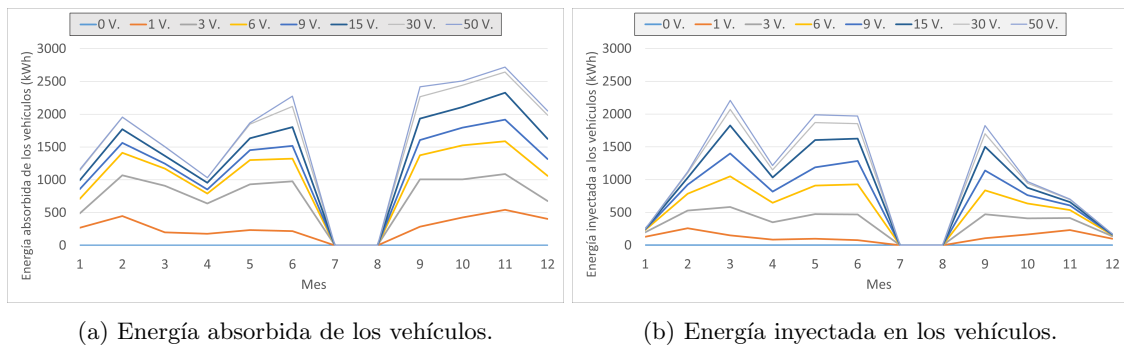


Figura 4.6: Parámetros energéticos mensuales de los vehículos conectados al del edificio D. Elaboración propia.

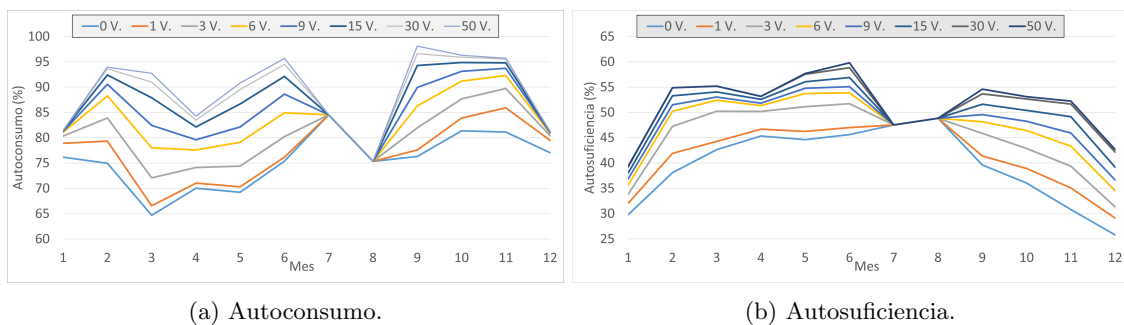


Figura 4.7: Parámetros mensuales del edificio D en función del número de vehículos conectados. Elaboración propia.

Como se ha observado en las Figuras anteriores la evolución de los parámetros no es uniforme a lo largo del año, ya que existen variaciones en el consumo y en la generación fotovoltaica, tal y como se vio en la Figura 4.3. Con el objetivo de esclarecer la evolución con dichas variables, se plantean tres escenarios de estudio, cuyos resultados se muestran en cómputo anual, los cuales contemplan un 100 %, 75 % y 50 % de generación fotovoltaica.

En la Figura 4.8 se observa cómo, a medida que disminuye la generación fotovoltaica del sistema, el edificio necesita absorber más energía de la red y tiene menos excedentes. Sin embargo, si se analizan las asíntotas a las que tienden dichos parámetros, se observa cómo, para la energía absorbida e inyectada en la red, el sistema satura para más de 30 y 20 vehículos conectados, respectivamente.

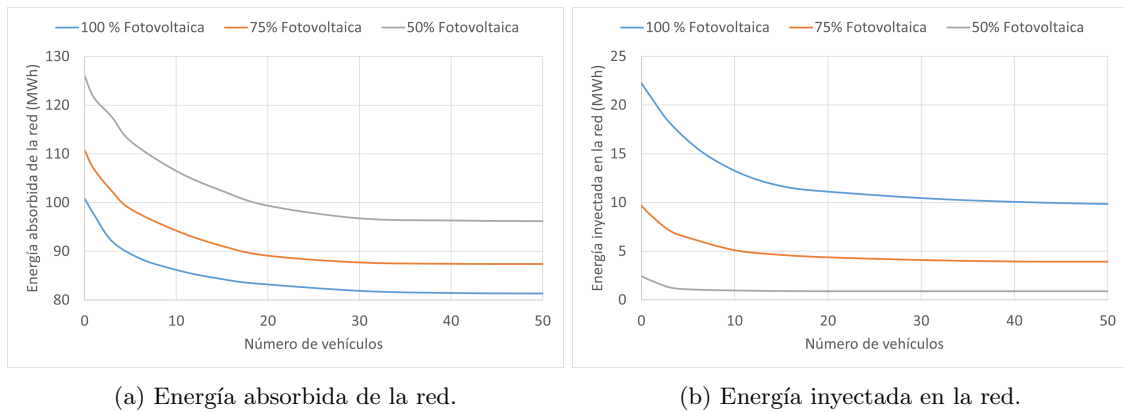


Figura 4.8: Energía inyectada y absorbida de la red para los 3 casos de estudio. Elaboración propia.

En la Figura 4.9 se reflejan los parámetros energéticos fundamentales que afectan a los vehículos: energía absorbida e inyectada por ellos. A medida que disminuye la generación fotovoltaica, el defecto energético en el sistema se acentúa, por lo que ese defecto de energía tiene que ser cubierto por los vehículos, y por esa razón la energía absorbida de ellos aumenta, mientras que al disminuir los excedentes, la inyectada hacia ellos es menor.

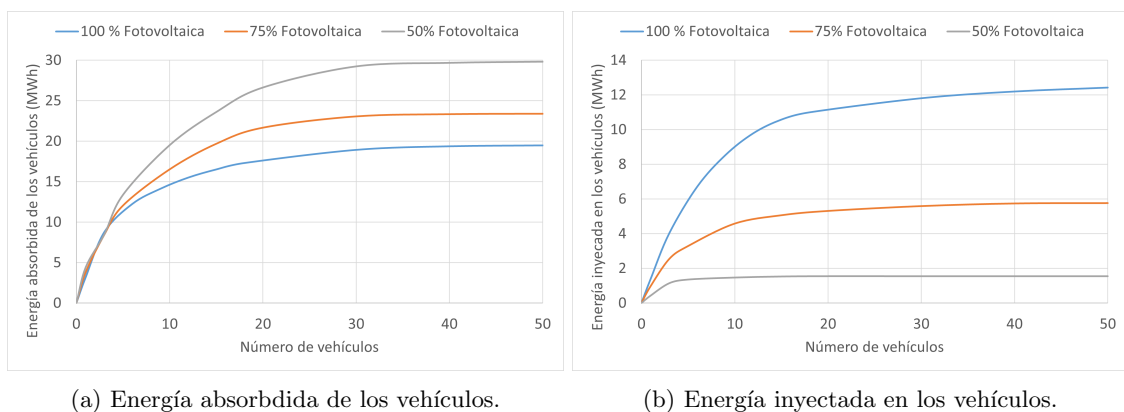


Figura 4.9: Energía inyectada y absorbida de los vehículos para los 3 casos de estudio. Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 4.10 se reflejan los parámetros de autoconsumo y autosuficiencia para el caso de estudio planteado. De la Figura se obtiene que, la mejora de autoconsumo para un 50 % de generación fotovoltaica es mínima, ya que, al no haber prácticamente excedente de energía, el autoconsumo ya es de por sí muy elevado (95 %). Sin embargo, para una generación fotovoltaica del 100 % se podría aumentar el autoconsumo un 15 %.

Por otra parte, si se estudia la autosuficiencia, se observa cómo, la mayor mejoría de dicho parámetro se obtiene para un escenario con un 50 % de generación fotovoltaica, en el cual se consigue aumentar en un 20 %. Tanto para el autoconsumo como para la autosuficiencia, se puede considerar que el sistema satura para una conexión de vehículos superiores a 30, por lo que el sistema no experimentaría una mejoría si se conectasen más vehículos.

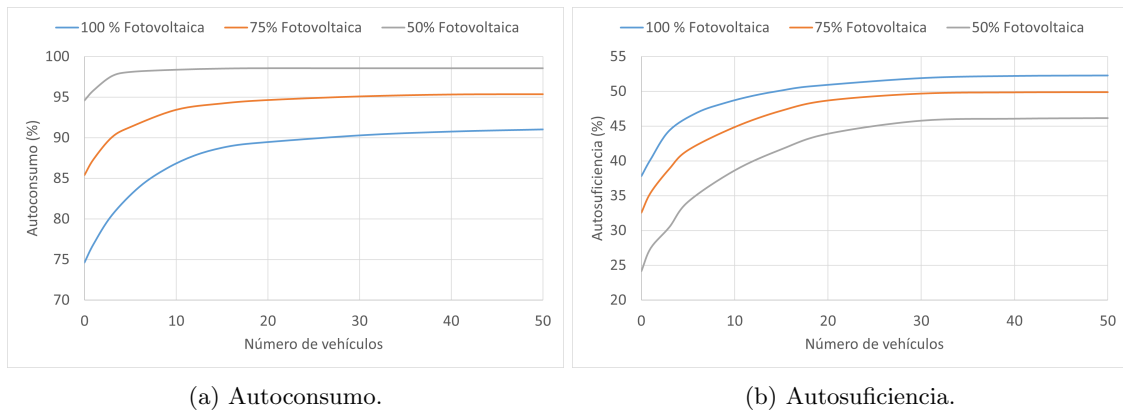


Figura 4.10: Autoconsumo y autosuficiencia para los 3 casos de estudio. Elaboración propia.

4.2. Magic Box

La publicación del Real Decreto 244/2019 [24] que regula las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica del autoconsumo en España ha facilitado las vías administrativas para que tanto ciudadanos como empresarios, autoproduzcan su propia energía. Además, se contempla la posibilidad de compensar la energía excedente del sistema, de tal forma que, la energía que se genere y no se consuma *in situ*, pueda ser inyectada a la red, y descontada de la factura.

Sin embargo, el Real Decreto estipula que como máximo, se podrá compensar tanta energía como energía se haya consumido en un periodo de facturación. Esto quiere decir que, si una vivienda consume mensualmente 500 kWh, solo podrá compensar otros 500 kWh, por lo que, en caso de seguir inyectando energía a la red, esta se cedería gratuitamente a la red, sin retribución económica. Este hecho hace que muchas instalaciones se subdimensionen para que esto no ocurra. Ejemplo de ello es el diseño propuesto en una vivienda unifamiliar de 2.64 kW de potencia instalada, cuyo dimensionado se hizo teniendo en cuenta el criterio de no ceder energía gratuitamente a la red [25]. Es por ello, por lo que almacenar energía en la batería de un vehículo es tan interesante, ya que, en vez de inyectarla en la red, se almacena para ser utilizada en otro momento.

La *Magic Box* es una casa desarrollada y construida en la UPM, que tiene como objetivo ser una vivienda autosuficiente y con bajo impacto medioambiental, aunque en la práctica se está empleando como unas oficinas. La fuente energética de la vivienda es la instalación fotovoltaica, siendo un elemento arquitectónico más de la vivienda. La cubierta está formada por conjuntos de módulos fotovoltaicos con tres inclinaciones distintas: 12° , 25° y 39° , que junto con la instalación en la fachada, hace un total de 8.1 kW de potencia nominal instalada.

Tras analizar los datos de consumo y de generación fotovoltaica de la *Magic Box*, se muestra en la Figura 4.11 las curvas promedio por estaciones. En ella se observa como el excedente tiene un periodo mucho más amplio que el Edificio D, por lo que la *Magic Box* actuará, mayormente como un cargador de vehículos.

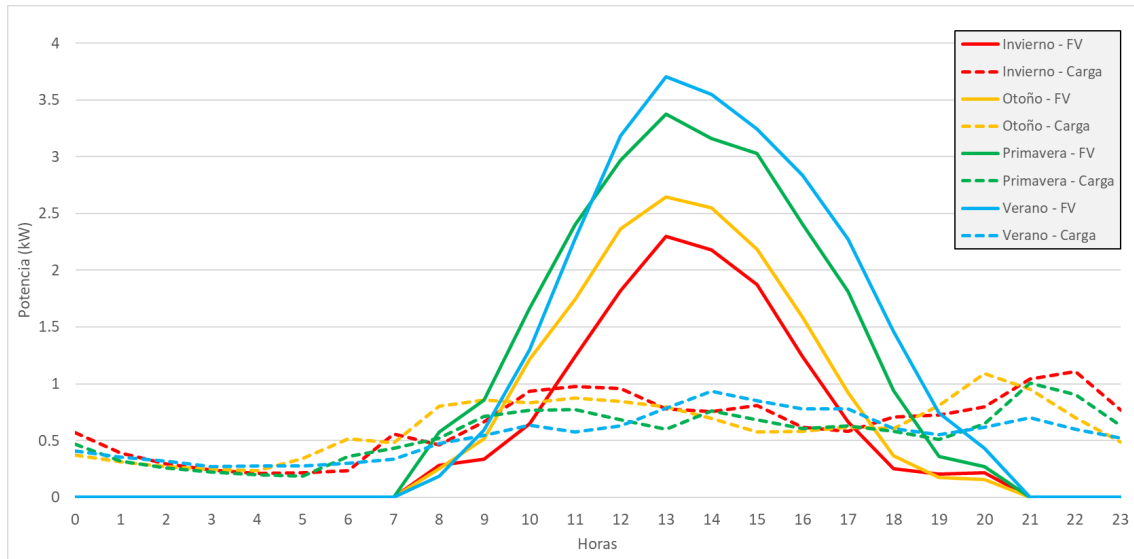
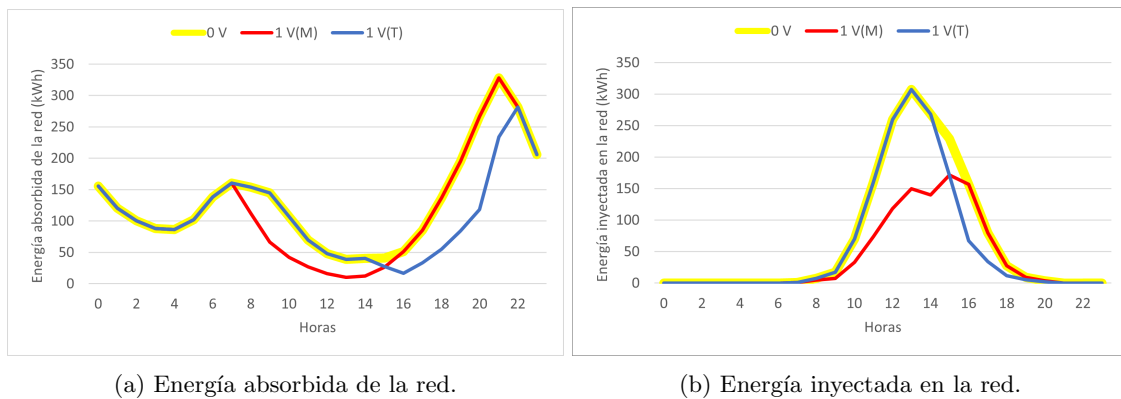


Figura 4.11: Curvas de la generación y el consumo promedio por estaciones de la *Magic Box*. Elaboración propia.

Tras elaborar un estudio, se observó que con dos vehículos el sistema saturaba (mismo efecto que se puede apreciar en el Edificio D), por lo que se decidió hacer el estudio con 1 vehículo, el cual tuviese dos patrones temporales distintos: de 9:00 a 15:00 y de 15:00 a 21:00. En la Figuras que se muestran a continuación, se representa en amarillo la curva promedio a lo largo de un año de la *Magic Box* de la variable que se esté estudiando, mientras que la roja y la azul muestran los resultados de la simulación con los patrones de mañana (M) y tarde (T).

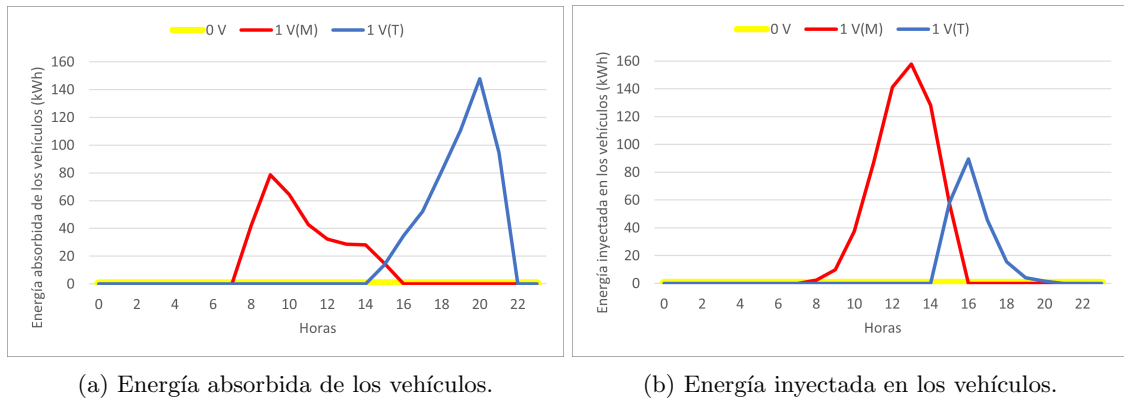


(a) Energía absorbida de la red.

(b) Energía inyectada en la red.

Figura 4.12: Energía absorbida e inyectada en la red en la *Magic Box*. Elaboración propia.

En la Figura 4.12 (b) se observa como la disminución de la energía inyectada en la red se actúa más en las horas centrales del día, ya que es en dicho periodo en el cual el excedente de energía se puede inyectar al vehículo. Por otra parte, la ventaja de tener conectado un vehículo a las horas finales del día, es que la batería de este puede hacer frente a la demanda energética, la cual es máxima durante dicho periodo. Este último hecho es apreciable en la Figura 4.12 (a), donde se observa una gran disminución de la energía absorbida de la red.



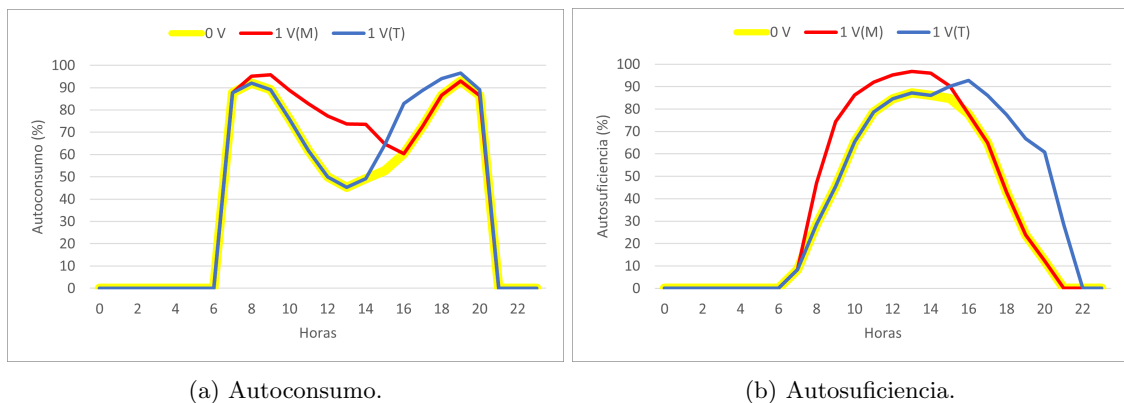
(a) Energía absorbida de los vehículos.

(b) Energía inyectada en los vehículos.

Figura 4.13: Energía absorbida e inyectada en los vehículos con diferentes turnos de trabajo en la *Magic Box*. Elaboración propia.

Las conclusiones extraídas en la Figura 4.12 se pueden observar cualitativamente en la Figura 4.13, ya que la absorción de energía de los vehículos es máxima durante la tarde, y la inyección de energía hacia ellos lo es durante el mediodía.

Finalmente, se muestra en la 4.14 las curvas de autoconsumo y autosuficiencia horarias en promedio anual. Como se visualiza en la Figura 4.14 (a), el autoconsumo aumenta desde un 50 % al mediodía hasta un 72 %, gracias a la inyección de energía al vehículo y no a la red, mientras que los aumentos durante la tarde son más discretos. Si se analiza la Figura 4.14 (b), se observan aumentos de autosuficiencia desde el 10 % hasta el 40 % a lo largo del día.



(a) Autoconsumo.

(b) Autosuficiencia.

Figura 4.14: Autoconsumo y autosuficiencia en la *Magic Box*. Elaboración propia.

A pesar de que en este capítulo se ha demostrado que tener conectado un vehículo a un edificio con una instalación fotovoltaica tiene múltiples ventajas, es necesario hacer un análisis de la energía almacenada en su batería justo antes de abandonar el vehículo, ya que el usuario podría negarse a ceder su batería si el estado de carga al regresar a su vivienda está cerca o por debajo del mínimo que el ha establecido.

Para el estudio que se ha llevado a cabo, el estado de carga mínimo del vehículo era 0,3 (ver Ecuación 4.1) ya que, en este caso, el usuario ha establecido un coeficiente de seguridad β de 1,2.

$$\begin{aligned}
 SOC_{min} &= SOC_{min(fabricante)} + \beta \cdot \frac{Consumo \cdot Distancia}{100 \cdot Capacidad} \\
 SOC_{min} &= 0,2 + 1,2 \cdot \frac{15 \cdot 30}{100 \cdot 50} \\
 SOC_{min} &= 0,3
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

En la Figura 4.15 se muestra el estado de carga del vehículo conectado a la *Magic Box* con turno de mañana y de tarde que abandona el edificio a las 15:00 y 19:00 respectivamente. Nótese que el eje abscisas tiene un rango de 0.3 a 1, ya que se evalúa el riesgo respecto al estado de carga mínimo del vehículo 4.1.

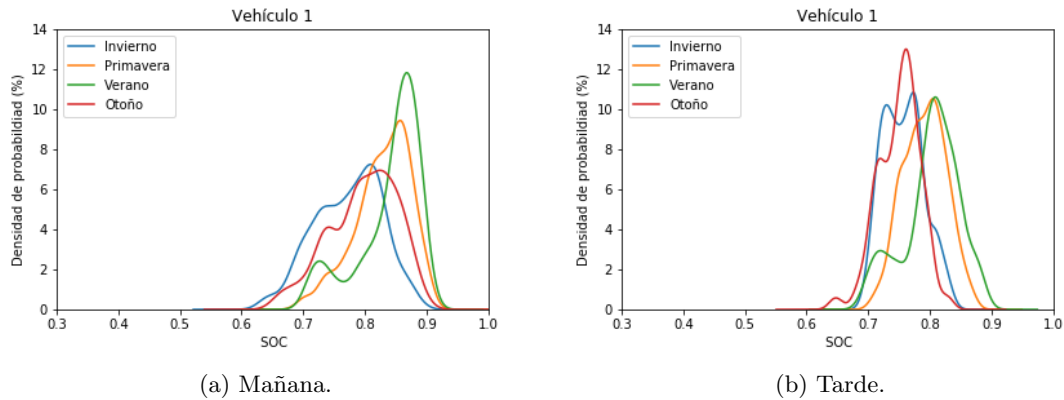


Figura 4.15: Estado de carga del vehículo al abandonar el edificio. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 4.15, tanto para el turno de mañana (a) como para el turno de tarde (b), el vehículo abandona el edificio con un estado de carga significativamente superior al mínimo, por lo cual, se puede asegurar que la propuesta es viable para usuario, ya que siempre tendrá energía para regresar a su vivienda. Sin embargo, se observan diferencias tanto estacionales, como para distintas jornadas de trabajo.

Si se analiza el estado de carga al abandonar la *Magic Box* en función de las estaciones, se puede asegurar que el vehículo tiene más energía en aquellas en las que, estadísticamente, hay más excedente de energía (primavera y verano), mientras que en las estaciones en las cuales el edificio tiene un defecto de energía, el estado de carga tiende a ser menor. En cuanto a las diferencias existentes entre los dos turnos de trabajo, se observa como el estado de carga tiende a ser inferior para el vehículo con turno de tarde, ya que, a la hora a la que abandona la *Magic Box*, la generación fotovoltaica es muy baja, y tiene que hacer frente al consumo con la energía almacenada en su batería.

Una de las conclusiones que se extraen de este estudio es que, en este caso, el usuario podría disminuir su coeficiente de seguridad β , ya que estadísticamente, siempre tendría energía suficiente para regresar a su vivienda. Este hecho, permitiría un mayor juego con la energía de su vehículo, con lo cual se debería ofrecer algún tipo de ventaja económica al usuario.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se recogen las conclusiones que se han obtenido tras la realización del proyecto y el análisis de los resultados que ha arrojado el programa. A su vez, se plantean las líneas futuras que habría que seguir para mejorar tanto el software como los algoritmos desarrollados.

5.1. Conclusiones

El actual sistema eléctrico nacional de generación de energía es insostenible desde el punto de vista medioambiental y de eficiencia. En este punto la tecnología solar fotovoltaica puede aportar ciertas ventajas y oportunidades ya que, aparte de ser una fuente renovable, permite llevar a cabo instalaciones de distintas potencias y características gracias a su modularidad, acercando la generación al consumo.

La principal desventaja de las energías renovables es que no se puede gestionar a diferencia de, por ejemplo, los combustibles fósiles. Durante las últimas décadas, ha habido avances tecnológicos en las baterías, reduciendo su coste y aumentando su capacidad, sin embargo, su coste sigue siendo muy elevado a día de hoy.

Por otro lado, como se ha visto en el Capítulo 1, el sector transportes supuso en 2019 un 29% de las emisiones de gases de CO_2 equivalentes a la atmósfera, por lo que, si se consigue electrificar dicho sector, se reducirían las emisiones nacionales considerablemente. Para conseguirlo, parte de la solución consiste en impulsar el vehículo eléctrico, ya que las emisiones se reducen en comparación con los vehículos tradicionales en caso de que la fuente energética sea renovable.

En este punto, se encuentran los dos elementos descritos anteriormente. En caso de disponer un vehículo eléctrico, se puede almacenar la energía excedente de la fotovoltaica en su batería, para poder ser descargada en los momentos en los que exista una demanda energética a satisfacer.

En un escenario en el que exista una penetración lo suficientemente elevada de vehículos eléctricos y de fotovoltaica, se podría impulsar y mejorar la red de generación distribuida, lo que permitiría la aparición de comunidades energéticas, haciendo a los ciudadanos dueños de la energía que compran y venden.

Para poder llegar al escenario descrito, es necesario llevar a cabo una labor de investigación y desarrollo de modelos de reparto de energía entre vehículos y edificios de tal forma que se maximice el ahorro energético y económico.

El objetivo principal del Trabajo de Fin de Máster ha sido desarrollar un software, encargado de establecer los parámetros y criterios necesarios para la repartición de energía en función de un algoritmo, el cual tiene en cuenta dos dimensiones: la energética y la temporal.

El software es capaz de definir una curva de consumo y generación fotovoltaica, a partir de la importación de datos de las diferentes curvas. Una vez establecidas, se define una flota de vehículos, cada uno con sus características propias como son las descritas en el Capítulo 3, y un intervalo de tiempo de estudio.

Finalmente, el programa lanza el algoritmo desarrollado para el intercambio de energía entre edificios y vehículos, cuya salida son 4 archivos CSV de todas las variables involucradas en el algoritmo en base horaria, mensual, mensual horaria y diaria, las cuales son analizadas en los Capítulos 3 y 4.

Los resultados, tras la simulación del Edificio D de la Escuela de Telecomunicación y la *Magic Box*, indican que hay una disminución de la energía absorbida e inyectada en la red, como consecuencia de la interacción de dicha energía con los vehículos. Este hecho permite al edificio obtener una cierta independencia energética con la red, la cual llega un punto que se satura, puesto que el sistema no es capaz de abastecer a tantos vehículos.

Con el objetivo de que haya una evolución y una mejoría del programa, se ha decidido publicar el código en abierto en *GitHub*¹ para que pueda ser mejorado en un futuro, con las recomendaciones que se muestran en la siguiente sección.

5.2. Desarrollos futuros

Como se ha descrito en el documento, el programa desarrollado integra los algoritmos necesarios para llevar a cabo un intercambio de energía entre un edificio y un conjunto de vehículos en cada diferencial de tiempo considerado. Sin embargo, ha sido necesario asumir ciertas simplificaciones para su implementación.

En esta sección, se plantean distintas mejoras que se podrían integrar en el algoritmo para hacer el sistema más eficiente y realista.

- Incorporar un algoritmo de envejecimiento de batería para ver cómo se comporta a los ciclos de carga y descarga a los que se ve sometida. Como se ha visto en el Capítulo 2, el envejecimiento de las baterías aumenta con el uso que se le da, por lo que, emplear dicho elemento como fuente energética, podría tener consecuencias negativas para la experiencia de usuario, ya que la autonomía se vería reducida.

¹<https://github.com/alejandrogonzalez97/TFM>

- Intercambio de energía entre vehículos: una de las grandes oportunidades del vehículo eléctrico, es el intercambio de energía entre ellos. Este hecho puede ser muy útil en aquellos lugares donde no existan puntos de recarga.
- El algoritmo desarrollado establece un valor constante anual de α , parámetro que es clave a la hora de repartir la energía. Desde el punto de vista del edificio al cual se le conectan los vehículos, dicho valor de α es indiferente, sin embargo, no lo es para el vehículo. Para poder optimizar el intercambio de energía de los vehículos se propone integrar en el programa un algoritmo de inteligencia artificial que varíe en cada instante de tiempo el valor de α . Este mismo hecho se repite con el valor de β , el cual es característico de cada vehículo, y se ha considerado constante a lo largo del año. En el proyecto desarrollado, se ha considerado un factor de β de 1,2, sin embargo, se abre la posibilidad a que cada usuario pueda aumentar o disminuir dicho factor para dar más juego a la energía.
- Optimización en función del precio de la electricidad: el software desarrollado es de tipo reactivo, es decir, actúa en consecuencia a las condiciones y parámetros del momento (por ejemplo, el estado de carga de cada vehículo), aunque también incorpora un parámetro que tiene en cuenta la dimensión temporal, ya que considera el tiempo que le queda a cada vehículo para regresar a su vivienda. Los parámetros considerados anteriormente permiten optimizar los indicadores energéticos del sistema, ya que el edificio absorbe la energía almacenada en las baterías (cargadas con energía solar fotovoltaica), en vez de absorberla de la red. Sin embargo, que haya una optimización energética no implica que la haya en la dimensión económica, ya que en ningún momento se ha tenido en cuenta el precio de venta de la electricidad. Un posible desarrollo futuro sería el incorporar datos de venta de energía eléctrica para que el sistema decida en base al algoritmo su fuente energética.
- Incorporar la optimización del sistema variando las cargas que componen la demanda energética tanto en el tiempo, como en la potencia, con el objetivo de desplazarlas a horas donde exista generación fotovoltaica, o el precio de la electricidad sea bajo.
- Establecer los criterios y parámetros necesarios para definir una retribución económica justa para los propietarios del vehículo eléctrico, de tal forma que se incentive a la ciudadanía para que preste sus baterías.

Bibliografía

- [1] Presidencia del Gobierno La Moncloa. Las emisiones de gases de efecto invernadero cayeron un 6,2% en España el año pasado [Prensa,Actualidad,Transición Ecológica y el Reto Demográfico]. <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transicion-ecologica/Paginas/2020/080720-emisiones.aspx>. accedido 2021-03-24.
- [2] Gobierno de España. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Estudio Ambiental Estratégico. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>.
- [3] Parlamento Europeo. Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía). <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313ST031218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>. accedido 2021-03-03.
- [4] PVSyst. PVSyst: Photovoltaic Software. <https://www.pvsyst.com/>. accedido 2021-05-13.
- [5] IEA: International Energy Agency. World Energy Outlook 2020 – Analysis. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>. accedido 2021-04-28.
- [6] REE. Red Eléctrica de España. <https://www.ree.es/es>. accedido 2021-05-20.
- [7] UNEF. UNEF:Unión Española Fotovoltaica. <https://unef.es/>. accedido 2021-03-20.
- [8] Eero Vartiainen and Gaetan Masson. The True Competitiveness Of Solar PV a European Case Study. *European Technology & Innovation Platform*, Mayo 2017.
- [9] Magnus commodities. Impacto de las pérdidas y de sus desvíos colaterales en la factura eléctrica. <https://www.magnuscmd.com/es/impacto-de-las-perdidas-y-de-sus-desvios-colaterales-en-la-factura-electrica/>. accedido 2021-06-28.
- [10] María Estefanía Caamaño Martín. Apuntes de Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos. Sistemas conectados a red, Noviembre 2020.

- [11] Juan Carlos Solano Jiménez. Energy and economic optimization of PV hybrid systems to supply buildings HVAC demand : battery modeling and control strategies. *UPM*, Abril 2018.
- [12] Universidad Politécnica de Madrid. MagicBox. <http://www.magicbox.etsit.upm.es/>. accedido 2021-07-01.
- [13] CEA: Comisario Europeo del Automóvil. Beneficios del coche híbrido o eléctrico si vives en Madrid. <https://www.cea-online.es/blog/245-beneficios-del-coche-hibrido-o-electrico-si-vives-en-madrid>. accedido 2021-04-06.
- [14] OTEA: Observatorio de la Transición Energética y la Acción Climática. La transición energética de un vistazo. <https://otea.info/transicion>. accedido 2021-04-04.
- [15] Yimin Zhou and Xiaoyun Li. Vehicle to grid technology: A review. *IEEE: 2015 34th Chinese Control Conference*, pages 9031–9036, Septiembre 2015.
- [16] Geotab. What can 6000 electric vehicles tell us about EV battery health? <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>. accedido 2021-04-21.
- [17] Christophe Guille and George Gross. A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy Policy*, 37(11):4379–4390, 2009.
- [18] Wouter Schram, Nico Brinkel, Wilfried van Sark, Gilbert Smink, and Thijs wijk. Empirical evaluation of v2g round-trip efficiency. *IEEE, International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Octubre 2020.
- [19] Electromaps. Todo sobre puntos de recarga y vehículo eléctrico. <https://www.electromaps.com/>. accedido 2021-07-06.
- [20] Peng Zhang, Kejun Qian, Chengke Zhou, Brian G. Stewart, and Donald M. Hepburn. A methodology for optimization of power systems demand due to electric vehicle charging load. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(3):1628–1636, Marzo 2012.
- [21] Juan Daniel Arango Castellanos, Harish Dhanasekaran Velayutha Rajan, Ann-Kathrin Rohde, Dimitri Denhof, and Michael Freitag. Design and simulation of a control algorithm for peak-load shaving using vehicle to grid technology. *SN Applied Sciences*, 1(9):1–12, Agosto 2019.
- [22] Google. Google earth. <https://www.google.com/intl/es/earth/>, Septiembre 2020. accedido 2021-04-27.
- [23] SketchUp. Software de diseño 3D y Modelado 3D. <https://www.sketchup.com/es/page/pagina-de-inicio>, Octubre 2020. accedido 2021-03-27.
- [24] Ministerio de la presidencia, relaciones con las cortes y memoria democrática. BOE-A-2019-5089. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id={BOE}-{A}-2019-5089>. accedido 2021-02-20.
- [25] Alejandro González Carballo. Diseño de una instalación de autoconsumo fotovoltaico para una vivienda unifamiliar. <http://oa.upm.es/66431/>, Febrero 2021.

- [26] Ministerio de Ciencia y Tecnología. ITC-BT-06. Instrucción Técnica Complementaria de Baja Tensión. Redes aéreas para distribución en Baja Tensión.

Anexo

En este Anexo se muestra la simulación en PVSyst del sistema fotovoltaico diseñado para el Edificio D. Las características de la instalación se resumen a continuación:

- Módulos fotovoltaicos: Canadian Solar (430 W), CS3W-430PB-AG 1500V SE.
- Inversor: Huawei Technologies (55 kW), SUN2000-55KTL-IN-HV-D1
- Elementos:
 1. Módulos fotovoltaicos: 140 unidades (60,2 kW)
 2. Inversor: 1 unidad (55 kW)
- Pérdidas del sistema:
 1. Módulos montados libres con circulación de aire
 2. Pérdidas óhmicas del 1.5%, tal y como estipula el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, ITC-BT-06 [26]
 3. Pérdidas de suciedad: 3%
 4. Pérdidas de eficiencia del módulo: 0.3%
 5. Pérdidas LID: 2%
 6. Indisponibilidad: 2%

PVsyst - Informe de simulación

Sistema conectado a la red

Proyecto: EDIFICIO D, ETSIT

Variante: 140 Módulos

Cobertizos en un edificio

Potencia del sistema: 60.2 kWp

Madrid University - España

PVsyst estudiante

PVsyst estudiante

PVsyst estudiante

Autor(a)

Alejandro Gonzalez (Spain)



PVsyst V7.2.3

VC1, Fecha de simulación:
22/05/21 17:52
con v7.2.2

Alejandro Gonzalez (Spain)

Resumen del proyecto

Sitio geográfico Madrid University España	Situación Latitud 40.45 °N Longitud -3.72 °W Altitud 656 m Zona horaria UTC+1	Configuración del proyecto Albedo 0.20
Datos meteo Madrid University Meteonorm 8.0 (1991-2013) - Sintético		

Resumen del sistema

Sistema conectado a la red Orientación campo FV Plano fijo Inclinación/Azimut 30 / -8 °	Cobertizos en un edificio Sombreados cercanos Cálculo eléctrico detallado según el diseño de módulo	Necesidades del usuario Carga ilimitada (red)
Información del sistema Conjunto FV Núm. de módulos 140 unidades Pnom total 60.2 kWp	Inversores Núm. de unidades 1 Unidad Pnom total 55.0 kWca Proporción Pnom 1.095	

Resumen de resultados

Energía producida 88.72 MWh/año	Producción específica 1474 kWh/kWp/año	Proporción rend. PR 76.35 %
---------------------------------	--	-----------------------------

Tabla de contenido

Resumen de proyectos y resultados	2
Parámetros generales, Características del conjunto FV, Pérdidas del sistema.	3
Definición del sombreado cercano - Diagrama de iso-sombreados	5
Resultados principales	6
Diagrama de pérdida	7
Gráficos especiales	8



PVsyst V7.2.3

VC1, Fecha de simulación:
22/05/21 17:52
con v7.2.2

Alejandro Gonzalez (Spain)

Parámetros generales

Sistema conectado a la red		Cobertizos en un edificio			
Orientación campo FV		Configuración de cobertizos		Modelos usados	
Orientación		Núm. de cobertizos	36 unidades	Transposición	Perez
Plano fijo		Promedio de diferentes conjuntos		Difuso	Perez, Meteonorm
Inclinación/Azimet	30 / -8 °	Tamaños		Circunsolar	separado
		Espaciamiento cobertizos	4.00 m		
		Ancho de colector	1.05 m		
		Proporc. cob. suelo (GCR)	26.2 %		
		Ángulo límite de sombreado			
		Ángulo límite de perfil	9.6 °		
Horizonte		Sombreados cercanos		Necesidades del usuario	
Horizonte libre		Cálculo eléctrico detallado según el diseño de módulo		Carga ilimitada (red)	

Características del conjunto FV

Módulo FV		Inversor	
Fabricante	Generic	Fabricante	Generic
Modelo	CS3W-430PB-AG 1500V SE	Modelo	SUN2000-55KTL-IN-HV-D1
(Definición de parámetros personalizados)		(Base de datos PVsyst original)	
Unidad Nom. Potencia	430 Wp	Unidad Nom. Potencia	55.0 kWca
Número de módulos FV	140 unidades	Número de inversores	1 unidades
Nominal (STC)	60.2 kWp	Potencia total	55.0 kWca
Módulos	5 Cadenas x 28 En series	Voltaje de funcionamiento	600-1450 V
En cond. de funcionam. (50°C)		Potencia máx. (=>30°C)	66.0 kWca
Pmpp	54.6 kWp	Proporción Pnom (CC:CA)	1.09
U mpp	1012 V		
I mpp	54 A		
Potencia FV total		Potencia total del inversor	
Nominal (STC)	60 kWp	Potencia total	55 kWca
Total	140 módulos	Núm. de inversores	1 Unidad
Área del módulo	313 m²	Proporción Pnom	1.09
Área celular	278 m²		

Pérdidas del conjunto

Pérdidas de suciedad del conjunto		Factor de pérdida térmica		Pérdidas de cableado CC				
Fracción de pérdida	3.0 %	Temperatura módulo según irradiancia		Res. conjunto global	312 mΩ			
		Uc (const)	29.0 W/m²K	Fracción de pérdida	1.5 % en STC			
		Uv (viento)	0.0 W/m²K/m/s					
LID - Degradación Inducida por Luz		Pérdida de calidad módulo		Pérdidas de desajuste de módulo				
Fracción de pérdida	2.0 %	Fracción de pérdida	-0.3 %	Fracción de pérdida	2.0 % en MPP			
Pérdidas de desajuste de cadenas								
Fracción de pérdida	0.1 %							
Factor de pérdida IAM								
Efecto de incidencia (IAM): Perfil definido por el usuario								
10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.990	0.930	0.740	0.000



PVsyst V7.2.3

VC1, Fecha de simulación:
22/05/21 17:52
con v7.2.2

Alejandro Gonzalez (Spain)

Pérdidas del sistema.

Indisponibilidad del sistema

Frac. de tiempo	2.0 %
	7.3 días,
	3 períodos

PVsyst estudiante

PVsyst estudiante

PVsyst estudiante

PVsyst estudiante



PVsyst V7.2.3

VC1, Fecha de simulación:
22/05/21 17:52
con v7.2.2

Parámetro de sombreados cercanos

Perspectiva del campo FV y la escena de sombreado circundante

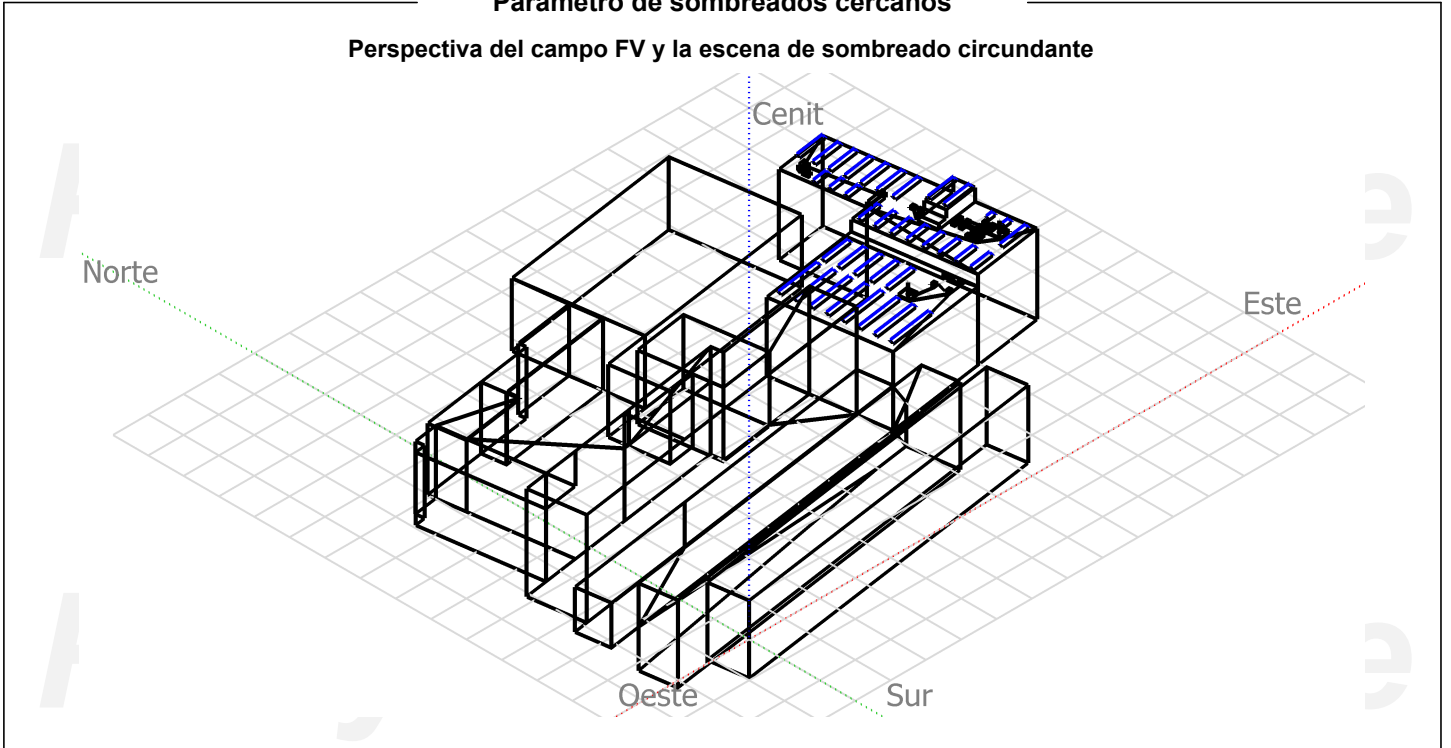
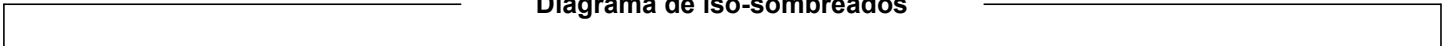


Diagrama de iso-sombreados



PVsyst estudiante

PVsyst estudiante



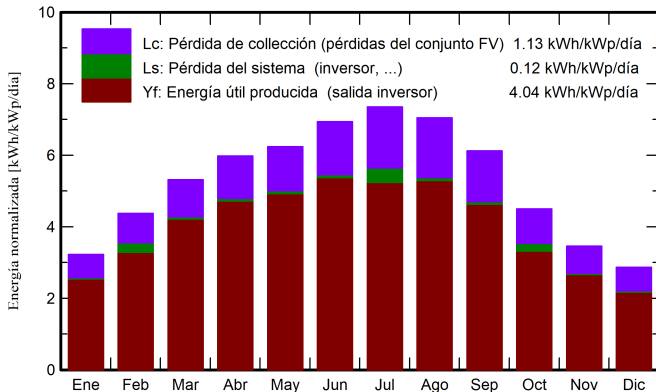
Resultados principales

Producción del sistema

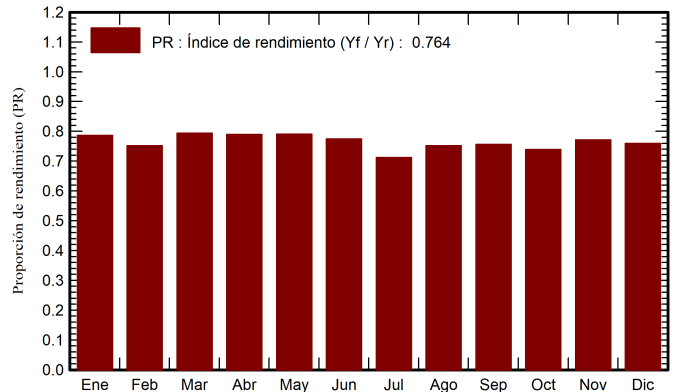
Energía producida 88.72 MWh/año

Producción específica 1474 kWh/kWp/año
Proporción de rendimiento (PR) 76.35 %

Producciones normalizadas (por kWp instalado)



Proporción de rendimiento (PR)



Balances y resultados principales

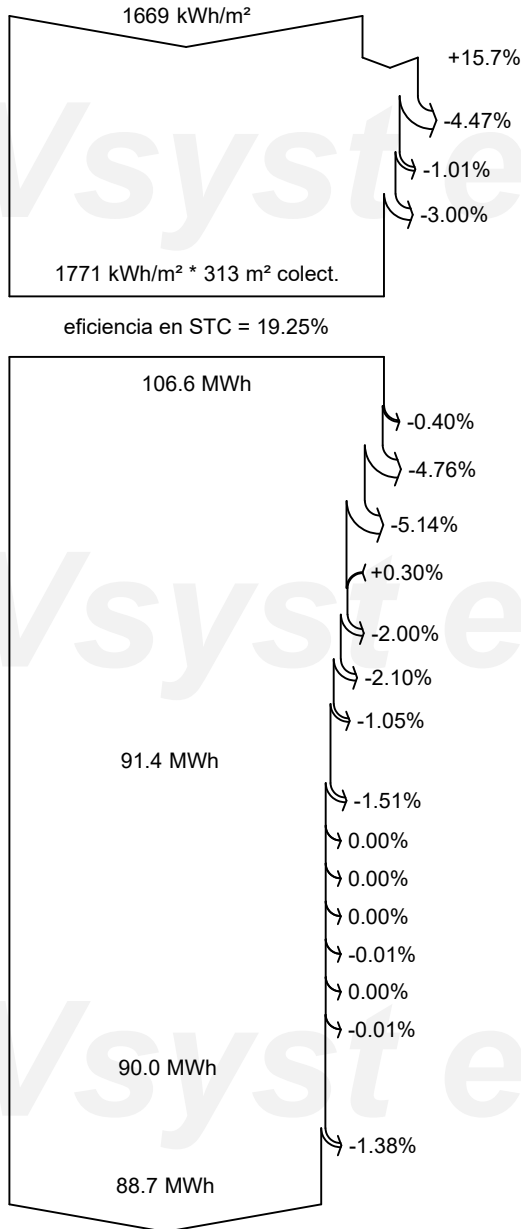
	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	MWh	MWh	proporción
Enero	61.6	27.83	5.98	100.1	89.9	4.81	4.742	0.787
Febrero	83.9	30.80	7.23	122.5	111.8	5.99	5.544	0.752
Marzo	131.7	51.94	10.70	164.7	150.6	7.99	7.875	0.794
Abril	163.4	65.20	13.18	179.4	164.9	8.66	8.533	0.790
Mayo	195.6	68.74	18.18	193.3	178.7	9.35	9.207	0.791
Junio	219.3	69.55	24.06	208.2	193.1	9.86	9.707	0.775
Julio	234.8	58.57	27.66	228.0	211.7	10.54	9.781	0.713
Agosto	205.9	60.84	27.03	218.3	201.9	10.04	9.881	0.752
Septiembre	152.0	45.67	21.76	183.6	168.8	8.50	8.365	0.757
Octubre	102.1	42.45	16.10	139.5	126.7	6.60	6.208	0.739
Noviembre	66.1	27.38	9.51	103.7	92.9	4.89	4.818	0.772
Diciembre	52.4	23.36	6.58	88.8	79.5	4.12	4.057	0.759
Año	1668.8	572.31	15.72	1930.2	1770.5	91.35	88.717	0.764

Legendas

- GlobHor Irradiación horizontal global
- DiffHor Irradiación difusa horizontal
- T_Amb Temperatura ambiente
- GlobInc Global incidente plano receptor
- GlobEff Global efectivo, corr. para IAM y sombreados
- EArray Energía efectiva a la salida del conjunto
- E_Grid Energía inyectada en la red
- PR Proporción de rendimiento



Diagrama de pérdida



Irradiación horizontal global

Global incidente plano receptor

Sombreados cercanos: pérdida de irradiancia

Factor IAM en global

Factor de pérdida de suciedad

Irradiancia efectiva en colectores

Conversión FV

Conjunto de energía nominal (con efic. STC)

Pérdida FV debido al nivel de irradiancia

Pérdida FV debido a la temperatura.

Sombreados: pérdida eléctrica cálculo detallado de módulos

Pérdida calidad de módulo

LID - Degradación inducida por luz

Pérdidas de desajuste, módulos y cadenas

Pérdida óhmica del cableado

Energía virtual del conjunto en MPP

Pérdida del inversor durante la operación (eficiencia)

Pérdida del inversor sobre potencia inv. nominal

Pérdida del inversor debido a la corriente de entrada máxima

Pérdida de inversor sobre voltaje inv. nominal

Pérdida del inversor debido al umbral de potencia

Pérdida del inversor debido al umbral de voltaje

Consumo nocturno

Energía disponible en la salida del inversor

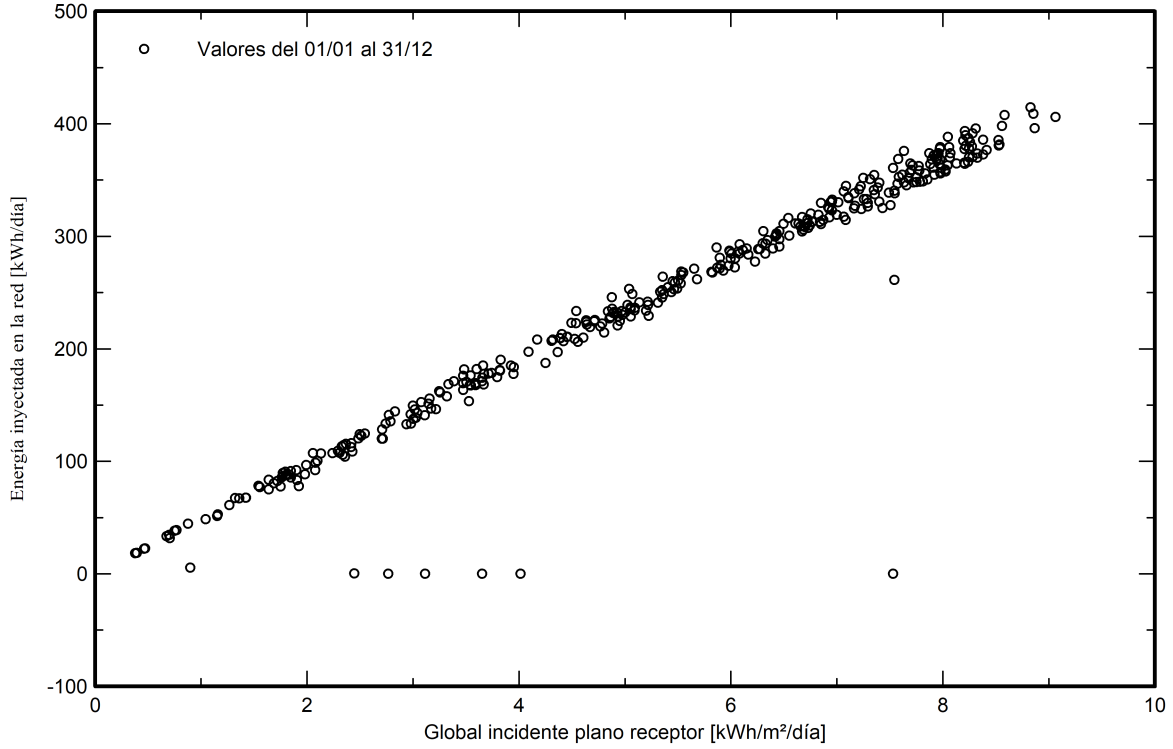
Indisponibilidad del sistema

Energía inyectada en la red



Gráficos especiales

Diagrama entrada/salida diaria



Distribución de potencia de salida del sistema

