

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIOS DE LA TELECOMUNICACIÓN**

**DISEÑO Y ESTUDIO DE VIABILIDAD
DE UNA PROPUESTA DE
UTILIZACIÓN DE BATERÍAS DE
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS COMO
APOYO A LA INTEGRACIÓN DE
ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA
ETSI DE TELECOMUNICACIÓN**

IGNACIO GARRIDO BOTELLA

2017

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: Diseño y estudio de viabilidad de una propuesta de utilización de baterías de vehículos eléctricos como apoyo a la integración de energía fotovoltaica en la ETSI de Telecomunicación.

Autor: Ignacio Garrido Botella

Tutor: Jesús Fraile Ardanuy

TRIBUNAL:

Presidente: D.

Vocal: D.

Secretario: D.

Suplente: D.

Fecha de lectura:

Calificación:

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIOS DE LA TELECOMUNICACIÓN**

**DISEÑO Y ESTUDIO DE VIABILIDAD DE
UNA PROPUESTA DE UTILIZACIÓN DE
BATERÍAS DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS COMO APOYO A LA
INTEGRACIÓN DE ENERGÍA
FOTOVOLTAICA EN LA ETSI DE
TELECOMUNICACIÓN**

IGNACIO GARRIDO BOTELLA

2017

Resumen

Con la creciente demanda de energías renovables, en los últimos años estamos asistiendo a la instalación progresiva de paneles fotovoltaicos en edificios del sector terciario. Esta generación, y el consecuente almacenamiento de energía fotovoltaica, deben venir acompañados de un soporte tecnológico que garantice el correcto funcionamiento del sistema, en función de la demanda y del precio de la energía.

En este trabajo se estudiará un plan de optimización en el uso y almacenamiento de energía en baterías de vehículos eléctricos. Adicionalmente, se han supuesto una serie de escenarios en los que se han implementado un conjunto de condiciones finales para hacer más atractivo este tipo de sistemas para los propietarios de los vehículos (estado de carga mínimo a la salida, nunca se descarga por debajo del estado de carga con el que llega el vehículo, etc.).

El estudio se basará en los datos de consumo y producción fotovoltaica de la ETSI de Telecomunicación - UPM, recogidos en el proyecto Monitoring del grupo Robolabo. Para la simulación de almacenamiento de energía en baterías de vehículos eléctricos se utilizarán los datos de periodo de estancia en la Escuela y distancia recorrida en el trayecto hasta la misma por el alumnado y el personal de la Escuela (PDI y PAS); datos recogidos en una encuesta realizada por varios grupos de investigación de la Escuela, en el curso académico 2016/2017.

El estudio se basa en el modelo de vehículo Nissan Leaf. Se ha hecho un plan de carga y descarga por hora de la batería de cada vehículo, en función de las condiciones iniciales y finales de los mismos, de la situación energética de la Escuela y de las limitaciones de la red (potencia máxima suministrable de 3.68 kW en una toma común).

Abstract

With the growing demand of renewable energies, in the last years we have been assisting to the progressive installation of solar panels in tertiary sector buildings. This generation, and the consequently photovoltaic energy storage must be hold by a technological support that guarantee the correct operation of the system, in function of the demand and the price of energy.

In this work, an optimization planning in the use and storage of energy in the batteries of electric vehicles would be studied. It has been supposed a series of scenarios in which a group of final conditions has been implemented, in order to do a more attractive system for the owners of the vehicles (minimum state of charge at the exit, never discharges under the state of charge with which the vehicle has arrived, etc.).

The study is going to be based in the consumption and the photovoltaic energy production of ETSI de Telecomunicación – UPM. This data has been taken by the project Monitoring of the group Robolabo. For the simulation of energy storage in the batteries of the electric vehicles, it would be used data of the staying period at the university, and the distance of the journey. This data was taken from a survey made by various groups of investigation of the university, in the years 2016 and 2017.

The study is based on the vehicle model Nissan Leaf. It has been done a planning of the charge and discharge (by hour) of the battery of each vehicle, in function of the initial and final conditions, the energy situation of the university and the physical limitations (3.48 kW of maximum power).

Palabras clave

Batería, sistema de almacenamiento de energía, vehículo eléctrico, producción fotovoltaica, optimización, V2B, PVPC, GAMS, R, EXCEL.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible si no hubiese tenido la guía y el apoyo de ciertas personas a las que me gustaría agradecer su ayuda.

En primer lugar, me gustaría expresar mi agradecimiento y admiración a mi tutor de TFG, Jesús Fraile Ardanuy, quien ha sido un excelente guía, y el apoyo principal de este proyecto. Tanto su labor docente como su orientación han sido fundamentales para ayudarme a comprender y enfocar el proyecto de la manera más adecuada.

También me gustaría agradecer a Alvaro Gutiérrez Martín la facilitación de los datos de consumo energético de la Escuela, datos sin los cuales no habría sido posible este proyecto.

Por último, me gustaría mencionar a todos los profesores que me han guiado estos cuatro años de Grado en Ingeniería y Servicios de la Telecomunicación, y a mi familia que me ha acompañado todo este tiempo y que lo ha hecho posible.

Índice

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
2	ENCUESTA Y DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS	3
2.1	DATOS RECOGIDOS A PARTIR DE LA ENCUESTA.....	3
2.1.1	ANÁLISIS DE LA POBLACIÓN OBJETIVO.....	4
2.1.2	ANÁLISIS DE LA MOVILIDAD DIARIA	5
2.2	DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS USADOS EN EL MODELADO	11
2.2.1	CONSUMO Y GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DE LA ETSIT-UPM.....	11
2.2.2	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.....	13
3	MODELADO	15
3.1	SIMULACIÓN Y LIMITACIONES	15
3.2	ESCENARIO I.....	16
3.3	ESCENARIO II.....	17
3.4	ESCENARIO III.....	17
3.5	ESCENARIO IV.....	17
3.6	ESCENARIO V.....	17
3.7	ESCENARIO VI.....	18
3.7	OTRAS LIMITACIONES	18
4	RESULTADOS	19
4.1	ESCENARIO I.....	20
4.2	ESCENARIO II.....	22
4.3	ESCENARIO III.....	24
4.4	ESCENARIO IV.....	26
4.5	ESCENARIO V.....	28
4.6	ESCENARIO VI.....	30
4.7	COMPARACIÓN DE LOS GASTOS FINALES.....	32
4.8	OTRAS LIMITACIONES	34
5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	42
4.1	CONCLUSIONES.....	42
4.2	LÍNEAS FUTURAS	43
6	BIBLIOGRAFÍA.....	44

7	ANEXOS	46
7.1	ANEXO I - ANÁLISIS DE LA ENCUESTA	46

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Una creciente concienciación con el cambio climático está impulsando a la Unión Europea, y en concreto a España, a un compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, proponiendo metas progresivas con la firma de diversos tratados. Uno de los objetivos prioritarios a corto plazo es alcanzar en el año 2020 una reducción de las emisiones del conjunto de la Unión Europea de un 20% con respecto a los niveles de 1990. El objetivo final es conseguir una mejora en la seguridad del suministro, y una economía baja en emisiones de CO₂ (menor del 80% con respecto a los niveles de 1990), eficiente en el uso de energías renovables y competitiva en este ámbito para el año 2050 [1].

Este progresivo aumento de la demanda de energías renovables, unido al gran potencial de España en lo referente a energía solar y a la bajada de precios de los paneles fotovoltaicos, está causando el incremento de pequeñas instalaciones fotovoltaicas en el sector residencial y terciario. Con objeto de aumentar el grado de autoconsumo renovable y disminuir la dependencia de la red, es habitual que estos sistemas de generación incluyan un sistema adicional de almacenamiento basado en baterías, que almacene la energía en los periodos en los que la generación fotovoltaica supera al consumo, para volver a utilizarla en los periodos en los que la generación no pueda cubrir el consumo del edificio. Hasta el momento este tipo de almacenamiento se ha realizado con baterías estáticas, bien de plomo-ácido o, más modernamente, con baterías de ion-Li de varios fabricantes, tanto del sector de energía solar [2], como del sector del automóvil [3]. Pese a que el precio de las baterías ha caído más de un 80% en los últimos 6 años, debido al gran desarrollo de éstas para su utilización en los VE, el precio del almacenamiento todavía sigue siendo elevado (alrededor de 200\$/kWh en el caso de las baterías de Tesla) [4].

Del mismo modo, estamos asistiendo a una introducción gradual del vehículo eléctrico (VE) en nuestro país [5]. Actualmente, este tipo de vehículos permiten cubrir la demanda de movilidad diaria de la mayor parte de la población [6], pero los vehículos tienen una tasa de ocupación muy baja, entre el 90-95% del tiempo (unas 20-22 horas al día) [7], lo que supondrá en el futuro una gran cantidad de VE aparcados en los parkings de edificios del sector terciario durante periodos prolongados y estables a lo largo del día, y, por lo general, en las horas de máxima generación fotovoltaica. Esto nos brinda una oportunidad en el almacenamiento y gestión de este exceso de producción de energía fotovoltaica, usando las baterías de los VE en lugar de la utilización de las baterías estáticas, de forma que tengamos un ahorro significativo en todo el sistema, evitando la adquisición de estos elementos de elevado precio.

El objetivo de este TFG consiste en la realización de un estudio de la viabilidad en el uso de baterías de VE para almacenar el exceso de producción fotovoltaica en un edificio universitario, en particular en uno de los edificios de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIT-UPM). Posteriormente, se diseñará un plan de carga y descarga de la batería de cada vehículo a lo largo del periodo en el que permanecerá aparcado en el parking de la Escuela, de forma que se minimice el coste de la energía adquirida a la red eléctrica.

El estudio se apoya en los datos de consumo y producción fotovoltaica de la ETSI de Telecomunicación, concretamente del edificio C, recogidos en el proyecto Monitoring del grupo Robolabo [8]. Para analizar la disponibilidad de los VE para esta aplicación, se utilizarán los datos de movilidad extraídos de una encuesta realizada al alumnado y personal de la ETSIT-UPM a lo largo del curso 2016-2017. Con esta encuesta se determina el periodo de estacionamiento de los

vehículos en la Escuela y la distancia recorrida en el trayecto casa-Escuela por el alumnado y el personal de la Escuela (PDI y PAS).

Para este estudio se estimará el consumo que tendría un VE que hiciese estos recorridos diarios y el SoC con el que llegarían los VE a la Escuela, basándonos en las características técnicas del modelo comercial más vendido en España en el año 2016, el Nissan Leaf [9].

En el presente TFG se desarrollará un algoritmo de carga/descarga horaria de la batería de los vehículos, teniendo en cuenta las restricciones horarias de estacionamiento en la Escuela, de las condiciones iniciales de cada una de las baterías de estos vehículos (tales como el estado de carga (*State of Charge*, SoC) a la llegada, el estado de carga mínimo necesario al partir, etc.), del consumo y generación FV de la ETSIT-UPM y de las limitaciones en la potencia máxima de carga-descarga, limitadas a 16 A (3.68 kW de potencia máxima por vehículo).

Finalmente, se han supuesto una serie de escenarios en los que se han implementado un conjunto de condiciones finales para hacer más atractivo este tipo de sistemas para los propietarios de los VE (SoC mínimo a la salida, nunca se descarga por debajo del SoC con el que llega el vehículo, etc.).

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo será el desarrollo de un plan de carga y descarga horaria de las baterías de un conjunto de VE aparcados en el parking de un edificio del sector terciario durante horario laboral, sirviendo esta capacidad de almacenamiento como apoyo para lograr una minimización del coste de la energía comprada a la red. Este estudio será una aproximación a un escenario real, que se podrá utilizar como base para el modelado de un sistema de control de red de alimentación inteligente.

Puesto que el modelado de este tipo de sistemas de distribución depende de la legislación de cada país y del tipo de organización en la que se ofrezca el servicio, uno de los objetivos del diseño es la propuesta de varios escenarios posibles y el consecuente estudio de cada uno de ellos.

Finalmente, se simularán los distintos escenarios y se analizarán una serie de variables para cada uno como estudio de la rentabilidad y la libertad de acción del mismo. Estas variables serán el SoC mínimo con el que debe llegar el vehículo para que sea rentable para la Escuela aplicar el modelo de optimización, el dinero ahorrado frente al caso de la no implementación del modelo y la energía que se ganaría/perdería por parte de la Escuela si, una vez diseñado un plan de carga/descarga para una hora de salida determinada, el propietario retira el VE antes de tiempo.

2 ENCUESTA Y DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS

Durante el presente curso académico 2016/2017 y gracias a la dirección de la ETSIT-UPM, se ha llevado a cabo una encuesta, vía web, al alumnado y al personal (PDI y PAS) de dicho centro. El objetivo de la encuesta era la recogida de datos de movilidad y horario de los encuestados con objeto de realizar un análisis de viabilidad para la transición de vehículos convencionales (con motor de combustión interna) a VE y, adicionalmente obtener información de su grado de conocimiento sobre esta tecnología y estudiar qué factores limitantes tienen los encuestados a la hora de cambiar sus vehículos actuales por VE.

En este TFG, a partir de los datos obtenidos se modelará el sistema de carga/descarga de la batería de VE aparcados en el parking de la Escuela, suponiendo que se pudiesen integrar en el sistema de gestión energética del edificio.

Así mismo, se recogerán otros datos con los que hacer el modelado, como producción fotovoltaica en el edificio C, datos del vehículo con el que se hará el estudio, precio de la energía por horas, ...

2.1 DATOS RECOGIDOS A PARTIR DE LA ENCUESTA

La encuesta se compone de las siguientes 17 preguntas clasificadas en tres grupos, información general, movilidad y conocimiento sobre VE:

1. Información general:
 - a. ¿Grupo al que pertenece el encuestado (PDI, PAS, estudiante)?
 - b. ¿Sexo?
 - c. ¿Rango de edad?
2. Movilidad:
 - a. Código postal de tu domicilio.
 - b. ¿Kilómetros recorridos en el viaje de ida (lunes, martes, miércoles, jueves, viernes)?
 - c. ¿Kilómetros recorridos en el viaje de vuelta (lunes, martes, miércoles, jueves, viernes)?
 - d. ¿Hora de llegada (lunes, martes, miércoles, jueves, viernes)?
 - e. ¿Hora de salida (lunes, martes, miércoles, jueves, viernes)?
3. Conocimientos previos sobre VE:
 - a. ¿Qué experiencia previa tienes conduciendo vehículos eléctricos?
 - b. ¿Qué factores te influirían en la posible compra de un vehículo eléctrico?
 - c. ¿Cuáles son los principales inconvenientes para no cambiarte todavía a un vehículo eléctrico?
 - d. ¿Qué autonomía tendría que tener el coche eléctrico para poder ser tu opción de movilidad diaria?
 - e. ¿En cuánto tiempo debería poder recargarse el vehículo eléctrico para que lo considerases una opción?
 - f. El Vehículo Eléctrico, recargando en horario nocturno con una tarifa supervalle, puede suponer un coste de unos 1,55 €/100km (0,092 €/kWh), frente a un mínimo de 7,79 €/100km de un vehículo de combustión tradicional. ¿A qué precio estarías dispuesto a pagar el kWh por recargar tu vehículo eléctrico en un punto de recarga rápida (1/2 hora aproximadamente)?
 - g. ¿Conoces las aplicaciones Vehicle To Grid (V2G)?
 - h. ¿Conoces las aplicaciones Vehicle To Building o Vehicle to Home (V2B-V2H)?
 - i. Si fueses propietario de un vehículo eléctrico y vinieses diariamente a la Escuela, ¿Te interesaría utilizarlo en este tipo de sistemas, garantizando un nivel de carga mínimo cuando cojas tu vehículo para volver a casa?

Y el espacio de encuestados es:

- **Encuesta:** 170 encuestados (25 de PAS, 77 de PDI y 68 estudiantes).
- **Escuela:** más de 2500 alumnos, 134 plazas de PAS y 269 profesores.

Margen de error: 11.72% para estudiantes, 8.40% para personal de la Escuela y 7.29% si se considera el total como único grupo, para un nivel de confianza del 95% y una variabilidad de 50% (no hay datos anteriores a la encuesta) [10].

Una vez recolectada la información, se pasará a la evaluación y la limpieza de datos. Para hacer esta parte del estudio se ha dividido la encuesta en tres partes: Una primera parte, en la que se recogen datos generales de los alumnos y del personal de la Escuela que han realizado la encuesta. Una segunda parte en la que se recoge información básica sobre su movilidad diaria hacia y desde la Escuela (hora de llegada y salida, distancias recorridas, etc.). Esta información se utilizará posteriormente para modelar la capacidad de almacenamiento distribuido disponible en la ETSIT-UPM si dichos VE se integrasen en el sistema de gestión energético del edificio C. En la última parte (recogida en los anexos de este TFG) se presentan los resultados sobre conocimientos previos sobre VE y tecnologías asociadas así como los factores que limitan la introducción del VE en este colectivo.

2.1.1 ANÁLISIS DE LA POBLACIÓN OBJETIVO

Se realizaron 170 encuestas válidas con las siguientes distribuciones:

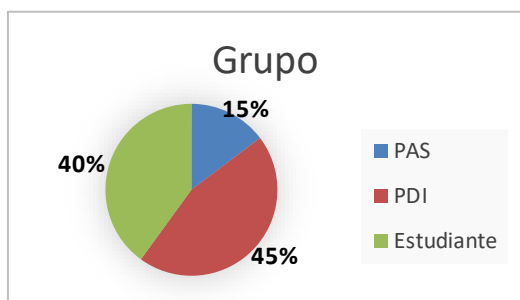


Figura 1: Grupo

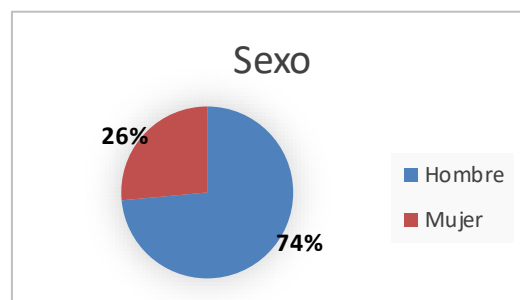


Figura 2: Sexo

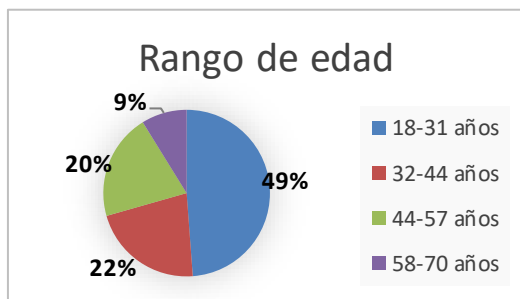


Figura 3: Rango de edad

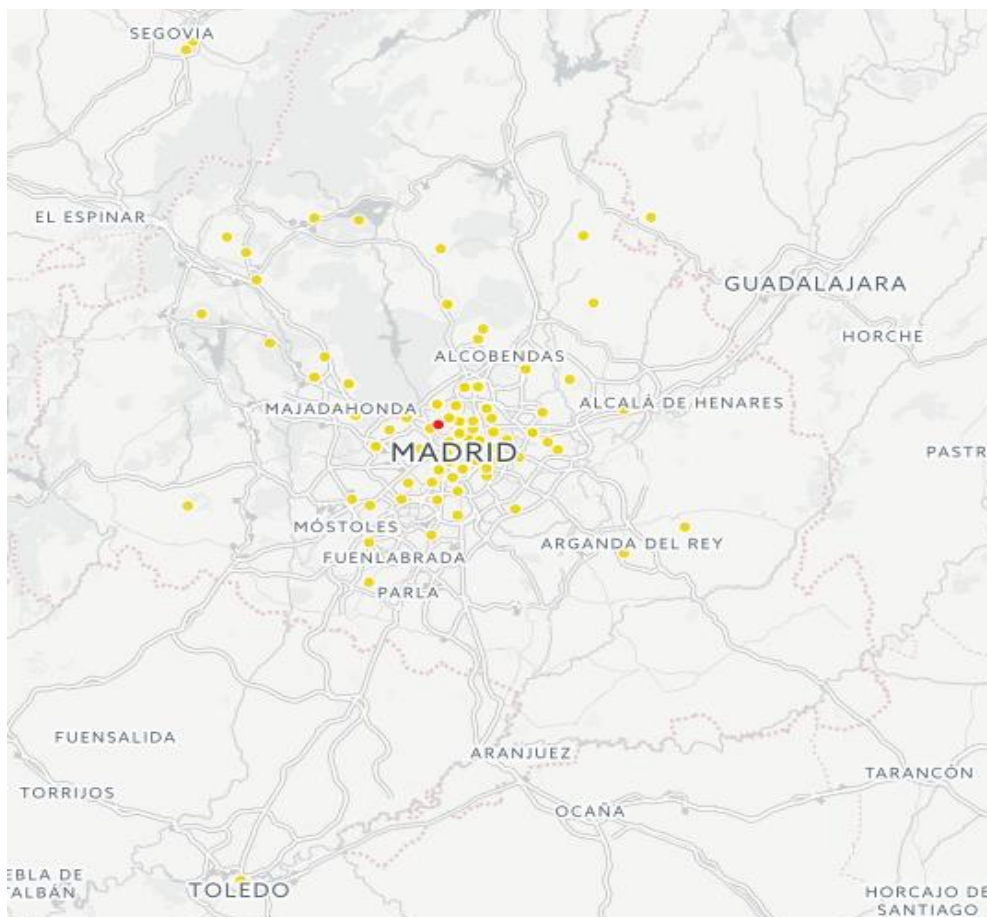
En *Figura 1* se observa que, del total de los encuestados, 25 personas pertenecen a PAS (que representa un 15% del total), 77 personas pertenecen a PDI (un 45%) y hay 68 estudiantes entre los encuestados (un 40%). Con los datos de capacidad de cada parking, siendo el parking B y D-Dirección (197 plazas) para PDI y PAS, y el parking A y D (195 plazas) para los alumnos, podemos ver que este dato que, en porcentaje, se aproxima bastante a la realidad.

En *Figura 2* se observa que 45 personas encuestadas son mujeres (un 26%), y 125 encuestados son hombres (un 74%). En cuanto al rango de edad (*Figura 3*), 83 encuestados tienen entre 18 y 31 años (un 49%), 37 tienen entre 32 y 44 años (22%), 35 tienen entre 44 y 57 años (20%) y 15 tienen entre 58 y 70 años (9%). Teniendo en cuenta que la mayor parte de los estudiantes tienen menos de 31 años, no sorprende que casi un 50% de los que han respondido a la encuesta sean menores de 31 años.

Cabe destacar que menos de un 3% de los estudiantes a los que se les envió la encuesta la respondieron, mientras que más del 25% del personal la respondió.

2.1.2 ANÁLISIS DE LA MOVILIDAD DIARIA

En esta sección se realiza un estudio de la distancia media diaria recorrida por cada grupo. A partir de los datos anteriores y de las distancias recorridas, se pueden hacer las siguientes gráficas.



Mapa 1

En Mapa 1 se muestra la posición de los encuestados con respecto a la Escuela (rojo).

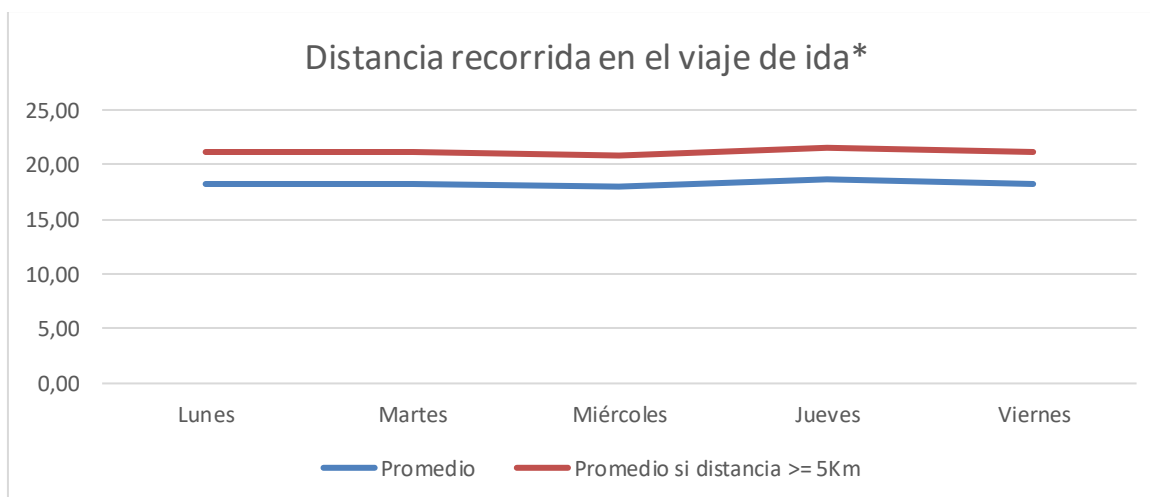


Figura 4: Distancia viaje de ida

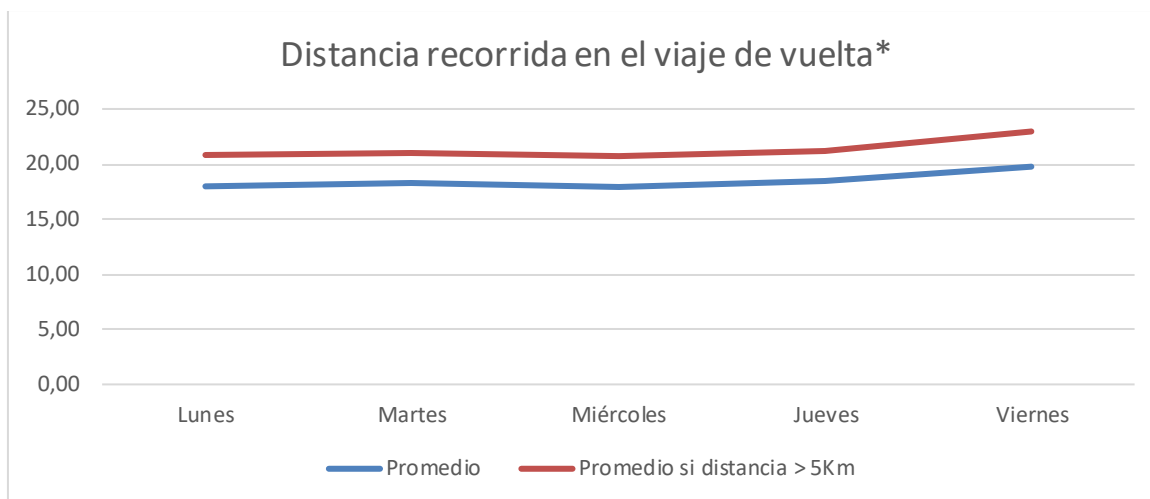


Figura 5: Distancia viaje de vuelta

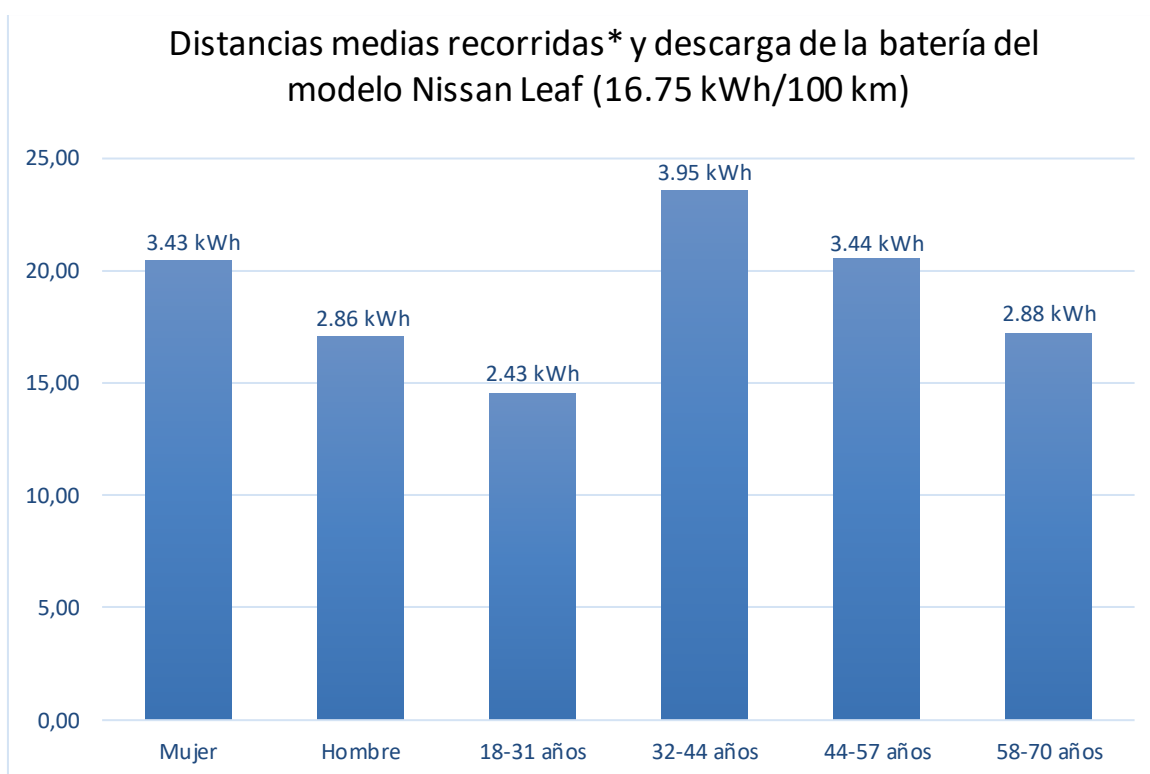


Figura 6: Distancia y consumo Nissan Leaf/sexo y edad

Tabla 1: Distancia y consumo Nissan Leaf/PDI, PAS o estudiante

Grupos: PDI y PAS (parking B y D-Dirección), estudiante (parking A y D)	Distancia media [km]	Descarga media de la batería [kWh] para un modelo Nissan Leaf (16.75 kWh/100 km)
Promedio (PDI)	18.47	3.09
Promedio si distancia ≥ 5 km (PDI)	22.67	3.79
Promedio (PAS)	26.32	4.41
Promedio si distancia ≥ 5 km (PAS)	27.25	4.56
Promedio (Estudiante)	14.67	2.45
Promedio si distancia ≥ 5 km (Estudiante)	16.61	2.78
Promedio absoluto	17.97	3.01
Promedio absoluto si distancia ≥ 5 km	20.77	3.48

*Todas las distancias se miden en km.

Nótese que en *Figura 4* y *5* se ha separado el caso en que el que se recorre más de 5 km y el resto, porque podría ser interesante tener una distancia mínima que supondría una descarga base con la que llegarían los coches a la Escuela. Esta medida de 5 km supondría que el Nissan Leaf llegaría con alrededor de 1 kWh menos de carga de la batería que con la que salió de casa. De todos modos, en el estudio final no se ha hecho esta distinción.

También es notable la gran variedad de distancias recorridas hasta la ETSIT-UPM. La mayor distancia recogida es de 110 km y la más pequeña es 2 km, obteniendo una desviación estándar de 17.07 km. Es importante destacar que esta desviación estándar es muy parecida, e incluso superior en algunos casos, a la distancia media recorrida por los distintos grupos (ver *Figura 6* y *Tabla 1*). Esta gran variabilidad de distancias hace muy difícil la predicción del SoC con el que llega un vehículo al trabajo, que, unido a la necesidad de una descarga de la batería mínima para que el sistema de optimización tenga sentido, puede suponer un problema a la hora de implementar un sistema de carga/descarga de la batería de los vehículos.

En *Figura 4* se observa como varía muy poco la distancia media recorrida de un día para otro. Es más, un 96.5% de los encuestados recorren la misma distancia todos los días, y los que hacen un recorrido distinto algunos días de la semana, varían en unos pocos kilómetros su ruta (por lo general menos de 5 km). Es por ello que para el estudio y modelado final se utilizará las distancias del lunes para calcular el SoC de la batería con el que llegaría el vehículo a la Escuela. En *Figura 5* se observa como la distancia recorrida en el camino de vuelta, en la mayoría de los casos, es prácticamente igual a la distancia recorrida en el camino de ida. Esto último facilita en gran medida la predicción del SoC que necesitaría el VE al salir del trabajo para llegar a su casa.

En *Tabla 1* se muestran los datos de distancia media recorrida en el viaje de ida del lunes por parte de PDI, PAS y los estudiantes. Suponiendo que todo el personal encuestado tuviese un modelo específico de VE (Nissan Leaf), es posible estimar las descargas medias de la batería durante los trayectos, ya sean de ida o de vuelta, asumiendo un consumo medio de 16.75 kWh/100 km [11]. Estos datos son muy interesantes, pues los VE que se aparque en los parkings B y D-Dirección (PDI y PAS), llegarán con una mayor descarga de la batería que aquellos que se aparken en los parkings A y D (estudiantes).

Por último, en *Figura 6* se representa la distancia media recorrida según en el viaje de ida del lunes a la Escuela de los distintos grupos y la descarga de la batería del modelo de vehículo Nissan Leaf al recorrer ese trayecto. La tabla se divide en sexo (hombre, mujer) y edad (18-31 años, 32-44, 44-57, 57-70), y se indica la descarga de la batería para un modelo de VE concreto, el Nissan Leaf. Con respecto al sexo, las mujeres recorren 3.4 km más que los hombres, diferencia que se puede deber al menor número de encuestadas que encuestados, suponiendo así sus respuestas un mayor peso en este apartado. En cuanto a la edad, el grupo que menos distancia recorre es el de 18-31 años (14.52 km), grupo mayoritariamente formado por alumnos que suelen vivir más cerca de la Escuela. El grupo que más lejos vive de la Escuela es el que tiene una edad comprendida entre 32 y 44 años (23.59 km), que, unido al grupo con edades comprendidas entre 44 y 57 años (20.55 km), cumplen el perfil de familia que vive en el extrarradio de Madrid. La distancia recorrida por el grupo de personas con edades comprendidas entre 58 y 70 años es menor que la de los grupos anteriores (17.2 km), probablemente porque vivan en barrios más céntricos.

En relación a los horarios de entrada y salida de la Escuela, se ha construido una tabla de ocupación de plazas a lo largo del día. Dicha tabla tiene 24 columnas (horas) y 170 filas (vehículos) de unos y ceros, indicando con un 1 las horas en las que el vehículo está en el parking y con un 0 en las horas en las que no está. Esta tabla servirá para hacer el modelado y aplicar los métodos de optimización. A continuación, se añade un extracto de la misma.

Tabla 2: extracto tabla 1s y 0s

Vehículo	H 1	H 2	H 3	H 4	H 5	H 6	H 7	H 8	H 9	H 10	H 11	H 12	H 13	H 14	H 15	H 16	H 17	H 18	H 19	H 20	H 21	H 22	H 23	H 24
V.1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
V.2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V.3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
V.4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
V.5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
V.7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
V.8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
V.9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
V.10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
V.11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
V.12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
V.13	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
V.14	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

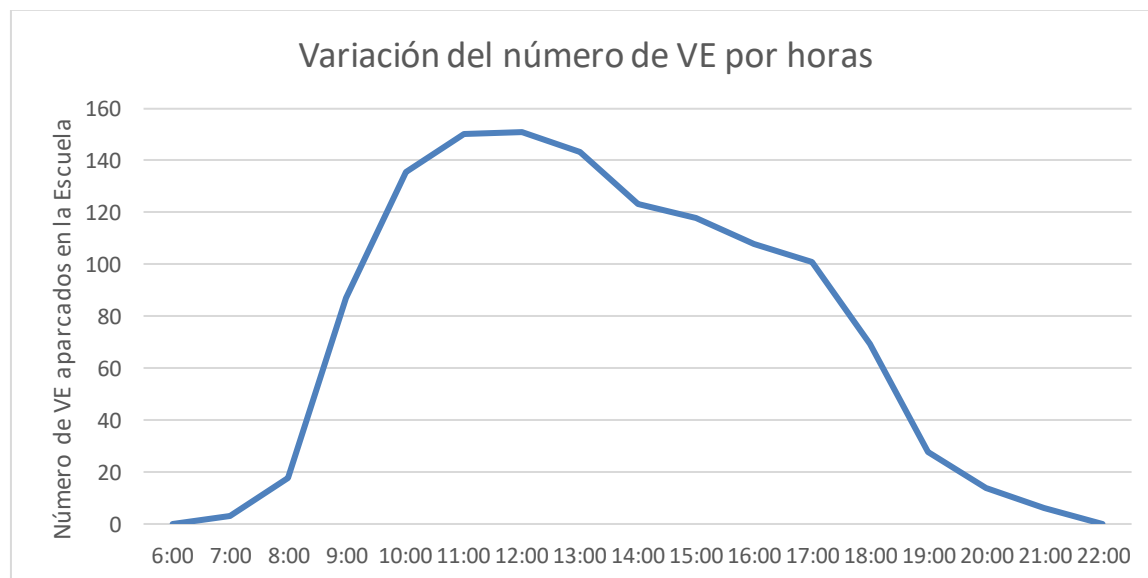


Figura 7: Variación del número de VE/horas

Si bien hay ciertas horas del día en que la mayoría de los vehículos están estacionados en la ETSIT-UPM, la pronunciada variación de las horas de salida y de entrada obliga a realizar un plan específico de optimización individual para cada batería.

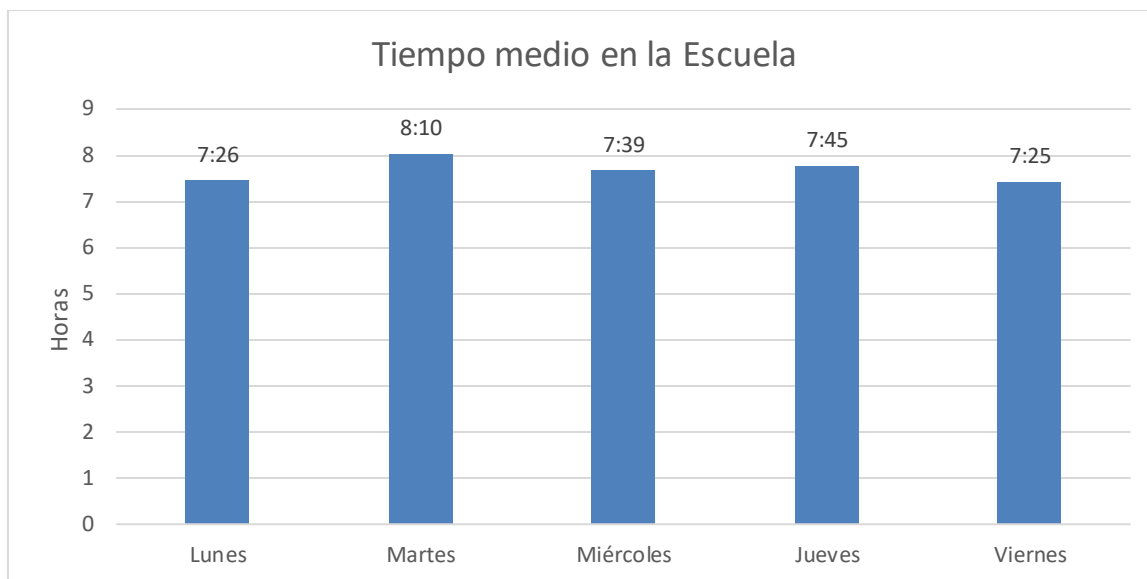


Figura 8: Tiempo medio en la Escuela

En Figura 8 se representa el periodo de estancia medio de lunes a viernes de los VE en el parking de la Escuela. El tiempo mínimo es 7:25 horas el viernes y el máximo 8:10 horas el martes. Al no haber mucha diferencia, se escogerán los valores de periodo de estancia del lunes, para así hacerlos coincidir con el día seleccionado en cuanto a las distancias para el modelado. Nótese que el periodo de estancia del lunes es algo menor que el de los siguientes tres días porque es el día en el que se hacen los exámenes de las evaluaciones intermedias, y por lo general los alumnos permanecerán menos tiempo en la Escuela ese día.

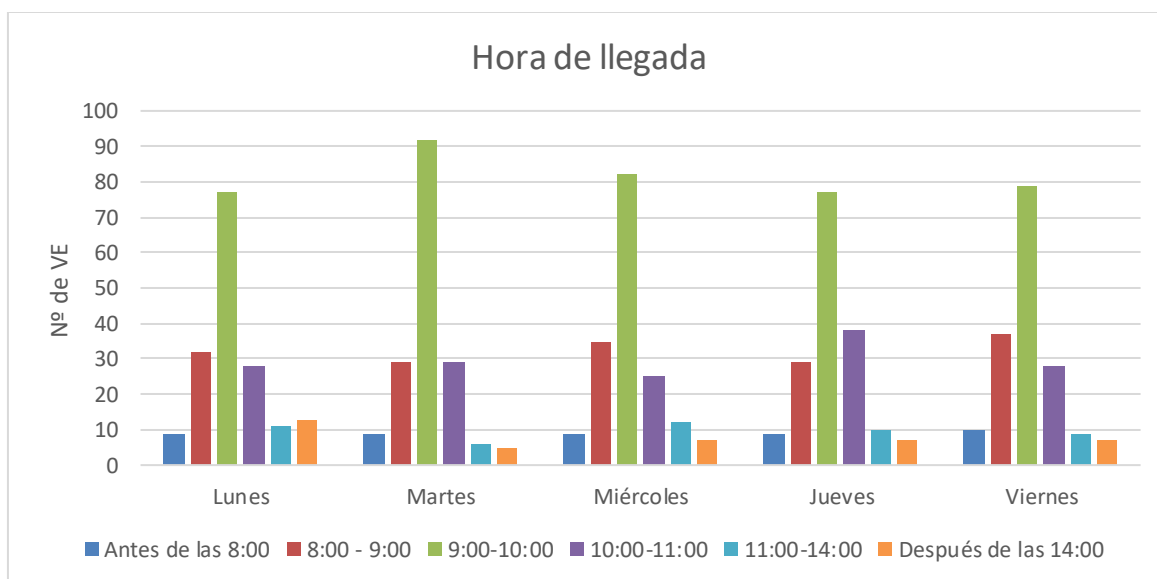


Figura 9: Hora Llegada

Tabla 3: Hora llegada

Hora de llegada	Porcentaje del total de VE
Antes de las 8:00	5.41%
8:00 - 9:00	19.06%
9:00-10:00	47.88%
10:00-11:00	17.41%
11:00-14:00	5.65%
Después de las 14:00	4.59%

En *Figura 9* se muestra el número de VE que llegan a la Escuela a una determinada hora, para los cinco días de la semana de horario laboral. En *Tabla 3* se muestra el porcentaje de VE que llegan a una determinada hora, sacado de la media de los cinco días de la semana. Como era de esperar, la mayoría de los VE llegan entre las 8:00 y las 11:00, siendo las 9:00 - 9:10 el periodo con mayor afluencia. Esta es la hora en la que empiezan las clases, y por lo tanto a la que deben llegar la mayor parte de los estudiantes.

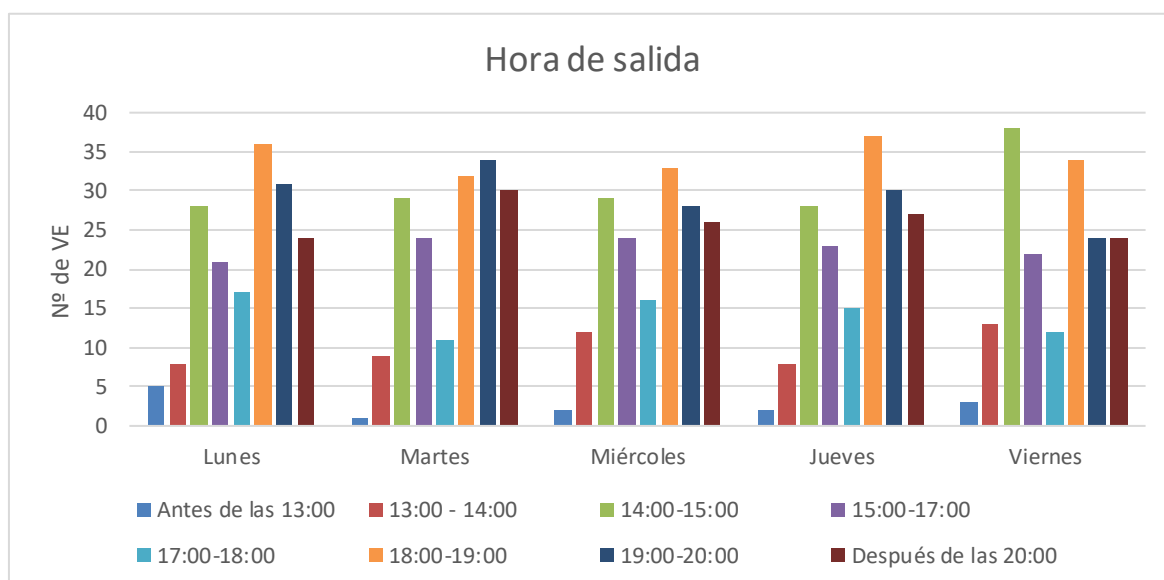


Figura 10: Hora salida

Tabla 4: Hora salida

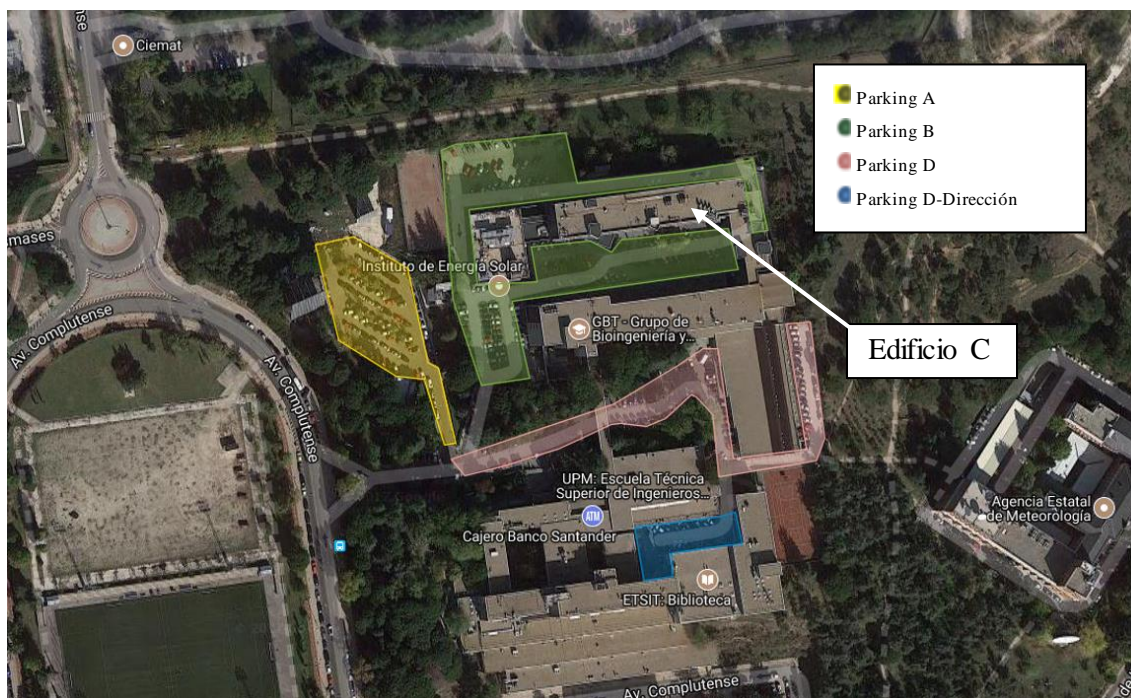
Hora de salida	Porcentaje del total de VE
Antes de las 13:00	1.53%
13:00 - 14:00	5.88%
14:00-15:00	17.88%
15:00-17:00	13.41%
17:00-18:00	8.35%
18:00-19:00	20.24%
19:00-20:00	17.29%
Después de las 20:00	15.41%

En *Figura 10* se muestra el número de VE que salen de la Escuela a una determinada hora. En *Tabla 4* se muestra el porcentaje de VE que salen a una determinada hora, sacado de la media de los cinco días de la semana. A diferencia de la hora de llegada, aquí hay una mayor dispersión de valores, habiendo un pico de salidas en el periodo 14:00-17:00, y otro en el periodo 18:00-20:00. Lógicamente habrá un grupo de gente que se irá en la hora de la comida y otro al final de la jornada.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS USADOS EN EL MODELADO DEL SISTEMA

Para que el estudio se aproxime lo máximo a la realidad, se han recogido una serie de datos que servirán de base sobre la que modelar el algoritmo de optimización.

2.2.1 CONSUMO Y GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DE LA ETSIT-UPM



Mapa 2

En Mapa 2 se muestra una imagen aérea de la ETSI de Telecomunicación-UPM, con los cuatro parkings y el Edificio C señalados.

Lo primero es adaptar los datos de la encuesta a las plazas de parking disponibles en la ETSI de Telecomunicación. En la Escuela hay cuatro parkings, con una capacidad total de 392 plazas. Éstos se dividen en parking A (101 plazas), parking B (170 plazas), parking D (94 plazas) y parking D-Dirección (27 plazas), siendo los parkings B y D-Dirección para personal y los otros dos para alumnos. La encuesta fue respondida por 102 personas de PDI y PAS, y 68 alumnos, por lo que, en este estudio, se asumirá que se instalarán 75 puntos de recarga entre el parking A y D, y 110 entre el parking B y D-Dirección, habiendo una afluencia media de VE de 170.

Por otro lado, se ha tenido acceso a las medidas de consumo eléctrico y generación fotovoltaica del Edificio C de la ETSIT-UPM a través de los datos registrados en el proyecto Monitoring del grupo Robolabo [8], y gracias a la inestimable ayuda del profesor Álvaro Gutiérrez Martín. El estudio se centrará en el periodo de un año entero, por lo que se han seleccionado días de invierno, primavera, verano y otoño. Los días escogidos son el miércoles 18/01/2017, el martes 18/04/2017, el lunes 18/07/2016 y el martes 18/10/2016. Nótese que se han escogido días lectivos, pues son los días en los que hay más vehículos en la Escuela.

En las figuras siguientes, se muestra el consumo del edificio C (azul) y la producción fotovoltaica (verde) de esos días.

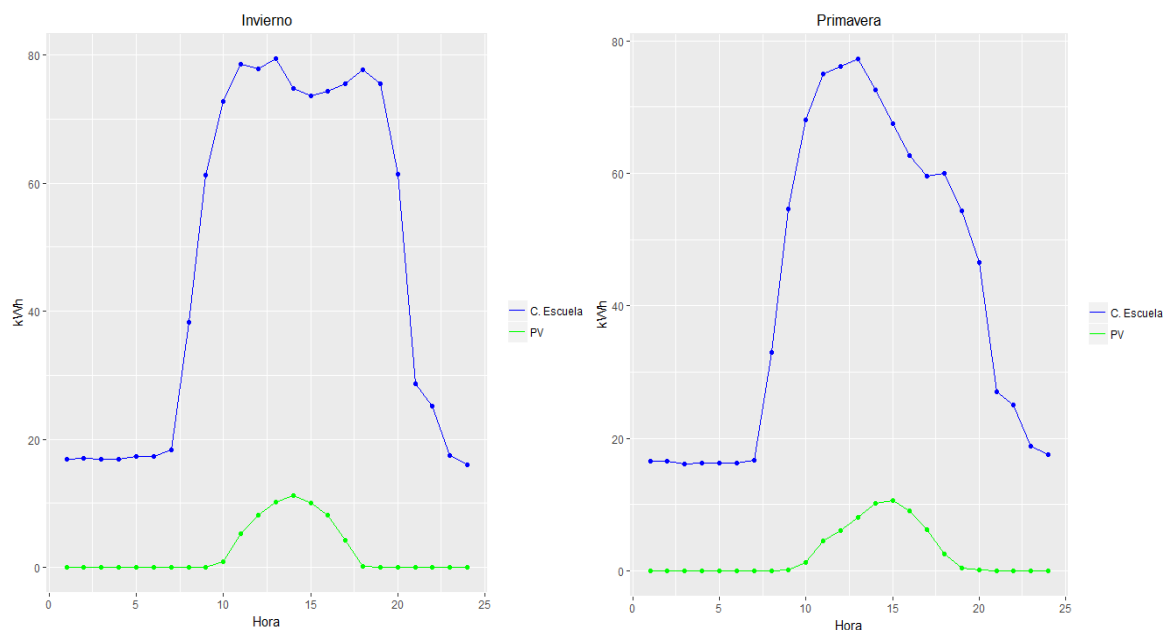


Figura 11: Consumo y PF edificio C (invierno y primavera 2017)

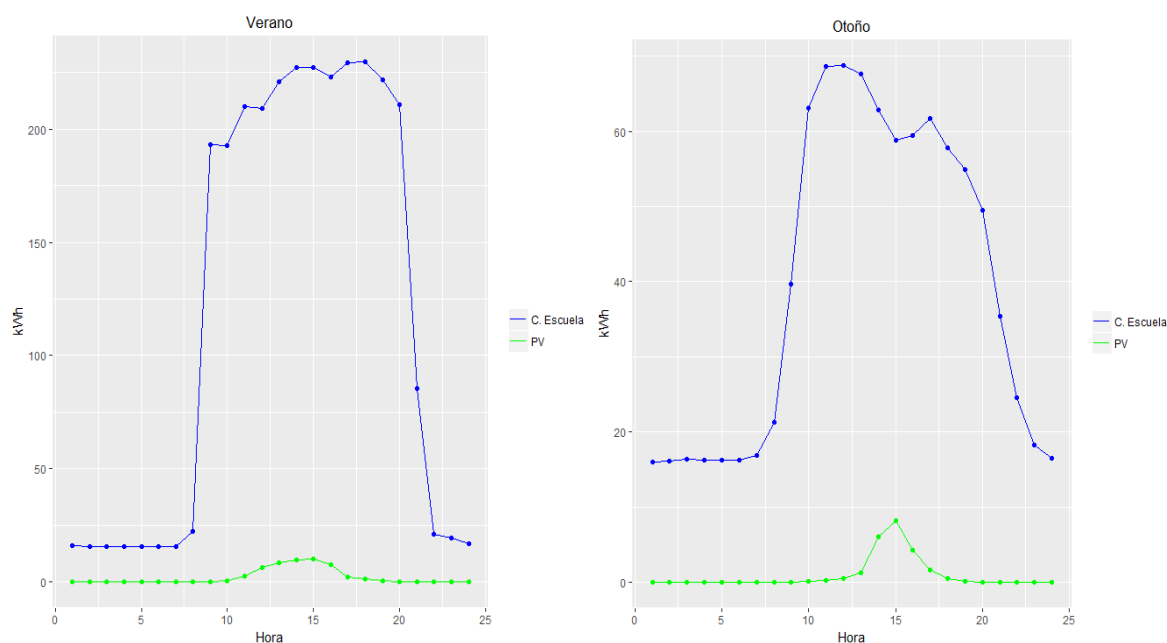


Figura 12: Consumo y PF edificio C (verano y otoño 2016)

En Figura 11 se representan los valores de consumo y generación fotovoltaica de los días escogidos de invierno y primavera. Se observa que el consumo del edificio C de la Escuela está en torno a 75 kWh en las horas de trabajo del día., con un consumo base alrededor de los 17 kWh, mientras que la producción fotovoltaica nunca supera este mínimo, alcanzando un máximo de 11.21 kWh (con un pico de potencia de 11.52 kWp) en invierno, y de 10.55 kWh (con un pico de potencia de 10.86 kWp) en primavera, alrededor las 14:00 horas. Sorprende tener un máximo de generación superior en invierno al de primavera, diferenciándose las 8-9 horas de producción fotovoltaica de invierno frente a las 10-11 horas de primavera. Esta diferencia en horas de producción a lo largo del día compensa el valor de generación fotovoltaica máximo mayor en invierno que en primavera, teniendo una generación media de 2.42 kWh en invierno y 2.46 kWh en primavera.

En cuanto a la demanda energética de la Escuela, en invierno hay un máximo en 79.43 kWh, siendo la media a lo largo del día de 47.03 kWh. En primavera hay un máximo de demanda en 77.30 kWh,

estando la media en 42.12 kWh. Esta diferencia en las medias entre invierno y primavera se puede deber al mayor consumo por calefacción en invierno, unido a un menor número de horas de sol en esta estación.

En *Figura 12* se representan los valores de consumo y generación fotovoltaica de los días escogidos de verano y otoño. Respecto a los días de invierno y primavera destaca la alta demanda de energía en el verano, probablemente debido al consumo del aire acondicionado. También se observa que la producción fotovoltaica del día de otoño tiene una forma extraña. Esto se debe a que fue un día lluvioso [12].

En verano existe producción fotovoltaica durante unas 12 horas diarias, que es algo más que lo que se producía en primavera en el tiempo, pero no en cantidad de energía. Al igual que ocurría en invierno y en primavera, la producción fotovoltaica de verano y otoño nunca superara el consumo base de la Escuela, que se sitúa en unos 17 kWh. En verano se produjo de media 2.00 kWh, habiendo un máximo de 10.25 kWh a las 14:00 (con un pico de potencia de 10.50 kWp). En otoño hay una producción media de 0.95 kWh a lo largo del día, estando el máximo de producción en 8.19 kWh a la misma hora (con un pico de potencia de 10.03 kWp). La diferencia entre el día de otoño y los valores de invierno-primavera se explica como el resultado de un día lluvioso, y la de verano con la de las anteriores estaciones debido a la mayor temperatura (lo ideal es un día soleado y con temperatura moderada).

En cuanto a la demanda energética de la Escuela, la media de consumo de verano es de 119.59 kWh, siendo 229.83 kWh el máximo consumo de ese día. El valor medio de consumo de otoño es 39.28 kWh, siendo el máximo consumo del día 68.77 kWh. Así, el día de verano será el de máximo consumo del año, y el de otoño el de mínimo consumo. Esto supone un pequeño handicap en el modelado de una red de optimización pues será en los meses de verano cuando haya menos vehículos en la Escuela, debido al calendario universitario.

2.2.2 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Así mismo, se estudiarán las características de los VE comercializados actualmente en España [9]. En 2016 se vendieron 2840 vehículos eléctricos, siendo el más vendido el Nissan Leaf. Las características de los diez modelos más vendidos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5: Capacidades y consumo de los modelos de VE más vendidos en España en el año 2016

Modelo	Unidades vendidas	Capacidad [kWh] - actual (nuevo modelo) *	Consumo medio [kWh/100km]*
Nissan Leaf	545	24 y 30	16.75
Citroën C-Zero	496	16	14.88
Renault Zoe	436	22 (41)	17.06
Renault Kangoo Z.E.	329	24 (40)	15.50
Nissan e-NV200	308	24	28.71
BMW i3	200	22 (33)	15.09
Smart Fortwo ED	155	17.6 (17.6)	15.89
Kia Soul EV	88	27	18.00
Piaggio Porter Eléctrico	50	17	15.45
Peugeot Partnert Eléctrico	47	22.5	13.23

*Los datos de capacidad están sacados de [13] y el consumo medio de [11].

A partir de *Tabla 5* se observa que los datos de capacidad de baterías y de consumo medio son muy parecidos en casi todos los modelos. Es por ello que se ha decidido que el estudio final se hará a partir de los datos del modelo Nissan Leaf, por ser el vehículo más vendido, y por tener unas características de capacidad y consumo medio en la media del resto de modelos. Cabe mencionar que los modelos PHEV también tienen unas características similares de consumo medio (utilizando únicamente la batería como fuente de energía), y una batería más pequeña. No se estudiarán estos modelos, pero la inclusión de los mismos en el programa de optimización tendría unos resultados muy similares a los que da con VE.

Se ha tomado 3.68 kW como potencia máxima que es capaz de suministrar la red, siendo los límites de corriente y de tensión 16 A y 230 V respectivamente. Este valor se ha tomado pues es el límite de una toma común. Existen métodos de carga rápida en los que el Nissan Leaf soporta hasta 50 kW de potencia de entrada hasta cargar al 80 % de la capacidad de la batería [14], pero no se han supuesto en este estudio.

Por último, se ha tomado el precio de la energía de la página web de la Red Eléctrica Española (REE) [15]. El precio que se ha tomado como referencia es el PVPC, que es la tarifa por defecto. Como podemos ver en las gráficas (*Figura 8*), tiene poca variación a lo largo del día y la curva tiene formas similares a lo largo del año. Esto puede ser un problema a la hora de optimizar el proceso debido a la poca flexibilidad que nos dará.

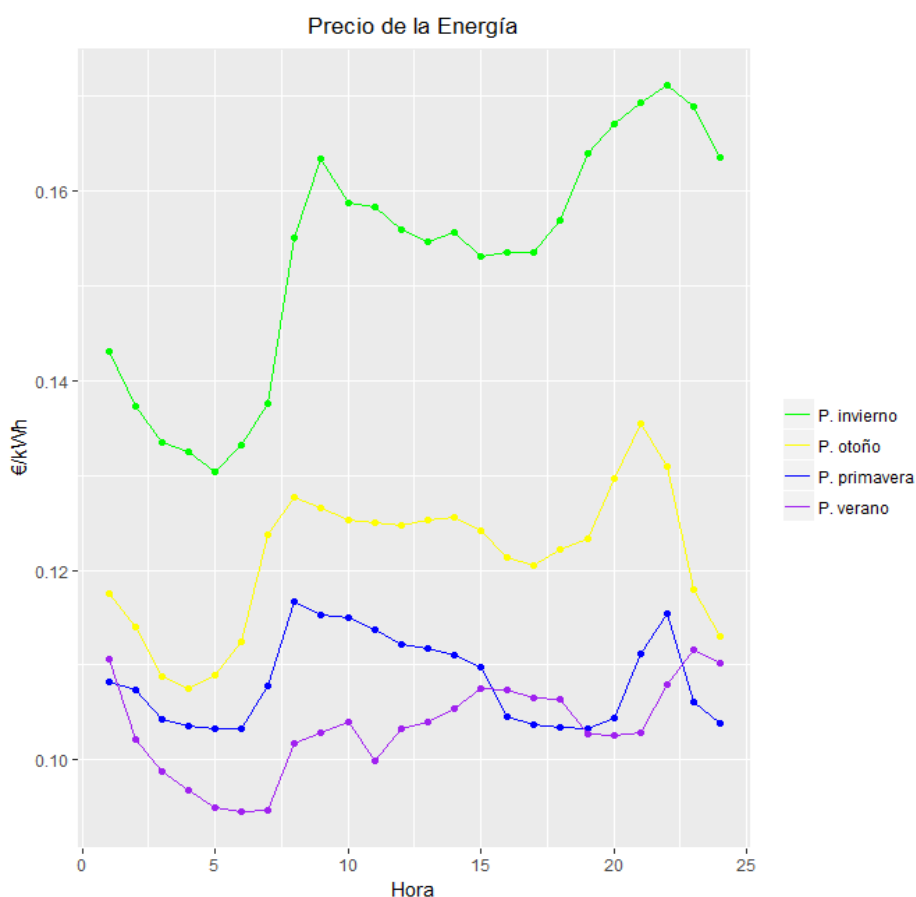


Figura 13: PVPC

Viendo las curvas de PVPC en *Figura 13*, parece que el día más propicio para implementar el algoritmo de optimización será el de primavera, debido a su pendiente decreciente en las horas laborales (cuando llega el VE la energía es más cara que cuando se va).

3 MODELADO

El desarrollo e implementación de este tipo de sistemas de apoyo al sistema de gestión energética del edificio, depende en gran medida de la legislación vigente de cada país y de las características del lugar donde se desarrollen. Uno de los objetivos del trabajo es proponer distintos escenarios que se adapten a la situación particular de la ETSI de Telecomunicación y proporcionen un servicio más atractivo para los propietarios de los VE, en el que tanto la Escuela como los conductores obtengan un beneficio.

Se propondrán cinco escenarios, y se realizará un estudio posterior de los resultados. El objetivo final será conseguir que el vehículo salga de la Escuela con más carga que con la que llegó, y que la ETSI de Telecomunicación haya podido ahorrar en el gasto en energía.

En algunos casos se asegura que el vehículo se irá de la Escuela con al menos 18 kWh (20 VE llegan con un SoC de menos de 18 kWh), lo que le daría una autonomía de más de 100 km. También se estudiarán casos en los que el vehículo se irá de la Escuela con la misma carga con la que llegó, lo cual no supondría ninguna utilidad al propietario del vehículo, por lo que se puede suponer caso irreal, pero serviría como estudio comparativo con los primeros modelos.

Como medida de calidad se comparará el gasto que supone cada modelo con respecto al gasto actual del edificio C de la Escuela, sin la inclusión de VE.

3.1 SIMULACIÓN Y LIMITACIONES

Para simular el sistema se ha usado el programa de optimización matemática GAMS (General Algebraic Modeling System). Este programa permite el modelado de sistemas para realizar optimizaciones matemáticas, permitiendo resolver problemas lineales, no lineales y optimización entera mixta.

El modelo de optimización programado consiste en un sistema de ecuaciones en el que se calculará el SoC de cada batería por hora, intentando minimizar el precio pagado por la energía en la Escuela. El coste total por hora (CH) viene dado por la ecuación (coste en la hora t):

$$CH(t) = PE(t) * \left[CE(t) - PF(t) + \sum_{i=1}^{170} (Carga_i(t) - Carga_i(t-1)) \right]; t = 0:23$$

Ecuación 1: Coste total por hora

Donde:

$CH(t)$ = Coste total por hora en la hora t [€].

$PE(t)$ = Precio de la energía en la hora t [€/kWh].

$CE(t)$ = Consumo de la Escuela en la hora t [kWh].

$PF(t)$ = Producción fotovoltaica en la hora t [kWh].

$Carga_i(t)$ = SoC del vehículo i en la hora t [kWh].

Se formará una matriz de 170 filas y 24 columnas, en la que cada fila representa un vehículo y cada columna una hora. La carga de la batería de un vehículo en la hora t representará la carga de dicho vehículo al final de esa hora, es decir, en la hora “ $t:59$ ”.

Nótese que haría falta un valor $Carga(t = -1)$ y que el vector $Carga(t)$ tuviese 25 posiciones, es decir, que el vector añada una posición más al principio del mismo con el estado final de carga del día anterior. Al no haber VE en el parking de la Escuela antes de las 6:00 de la mañana, $Carga_i(t < \text{hora de llegada})$ vale el estado de carga de la batería del VE a la llegada a la Escuela, de modo que no supone un gasto hasta la llegada del mismo. Se sigue el mismo proceso a la hora de salida, valiendo $Carga_i(t > \text{hora de salida})$ el SoC de la batería del VE a la salida de la Escuela.

Con respecto al resto de variables que dependen del tiempo, $X(t=i)$ se referirá a X durante toda la hora i . Por ejemplo, $CE(t=3)$ se referirá al consumo de la Escuela en el periodo de tiempo que va desde las 3:00 hasta las 3:59.

La función objetivo tendrá como misión minimizar el consumo por hora de la Escuela, y tiene la forma:

$$OBJ = \sum_{t=0}^{23} CH(t)$$

Ecuación 2: Función objetivo

Así mismo, se supondrán una serie de limitaciones como la potencia máxima suministrable (3.68 kW), el SoC del vehículo máximo (24 kWh), la potencia máxima contratada (450 kW) y las limitaciones específicas de cada uno de los modelados que se explicarán a continuación. En todos los escenarios se limitará el SoC mínimo de los VE a 4.8 kWh, es decir, el 20% de la capacidad total de la batería.

Si hubiese más producción fotovoltaica que consumo en la ETSIT-UPM, y la energía FV generada fuera mayor que la energía máxima suministrable en una hora a las baterías (3.68 kWh como máximo por cada vehículo aparcado), ese exceso de generación se perdería en la red sin contraprestación económica.

Por último, se utilizará la *Tabla 2*, en el programa de optimización GAMS y se multiplicará cada casilla por la carga de la batería de un vehículo determinado en esa hora, de modo que se optimice únicamente en las horas en las que hay un '1'.

3.2 ESCENARIO I

El primer escenario no es realmente un sistema optimizador. Consiste en que, nada más conectar un VE a la red, éste se carga de manera continua, y lo más rápido posible, hasta llegar a un SoC mínimo de salida prefijada (18 kWh), momento en el que deja de cargar. En ningún momento el vehículo se descargará proporcionándole energía a la Escuela. En el caso en que el vehículo llegase a la Escuela con una carga superior a ese SoC de salida prefijado de 18 kWh no se cagaría ni descargaría y sería indiferente en cuanto al gasto total.

Esta disposición no supone ninguna mejora, es más, es un modelo bastante poco eficiente en cuanto a la optimización en el consumo, pues es la Escuela la única que proporciona esa energía, sin recibirla de vuelta por parte del vehículo. La única ventaja es que es un escenario muy conservador que garantizaría al propietario un SoC al irse, aun cogiendo el vehículo antes de la hora prevista de salida.

La utilidad de este escenario es poder servir como base para comparar la calidad del resto de escenarios de optimización.

3.3 ESCENARIO II

Este escenario consiste en asegurar a todos los VE, un SoC de 18 kWh a la salida, o el SoC con el que llegó a la Escuela, si éste es superior a 18 kWh. Durante el periodo de carga/descarga se permitirá al sistema descargar la batería del vehículo por debajo de estos límites.

De entre todos los escenarios que aseguran un SoC de 18 kWh a la salida, este es el escenario con aplicación plausible en la Escuela más rentable. También es un escenario un poco limitado para los propietarios de los vehículos, pues retirar el VE del parking antes de la hora de salida prefijada podría suponer una pérdida de energía con respecto al SoC de la batería con el que llegó a la Escuela. Por ejemplo, supongamos que un conductor llega a la Escuela con un SoC en su batería de 16 kWh y el sistema de optimización determina que cargará 3 kWh durante las dos horas previas a su salida. Si el conductor decide irse de la Escuela dos horas antes de la hora de salida prefijada, el vehículo se iría con un SoC de 15 kWh, menor que con el que había llegado. Este sistema tendrá la desventaja de la necesidad de cumplir los plazos de entrada/salida de una manera bastante estricta.

3.4 ESCENARIO III

En este escenario el vehículo se iría con el SoC con el que llegó, permitiendo a la Escuela un plan de carga/descarga libre, con la capacidad máxima de la batería como límite superior y con el 20% de la capacidad total (4.8 kWh) como límite inferior.

Este modelo no supondría ninguna ventaja para el propietario del VE, por lo que no tendría una aplicación práctica en la Escuela. Podría ser un modelo real en hogares particulares, en los que el vehículo se conectase a la red de la casa. También podría aplicarse en lugares en los que el parking no es gratuito y utilizar la libre disposición de la batería del vehículo, suponiendo unos límites, como método de pago de ese estacionamiento.

En nuestro estudio no tendría una aplicación real, excepto en ciertos modelos de edificios del sector terciario en los que se pudiese dar una retribución alternativa (parking gratuito, coche de empresa, etc.), pero servirá para hacer una comparación con el escenario II y ver cómo afecta ese SoC de salida prometido de 18 kWh.

3.5 ESCENARIO IV

Este escenario tiene unas características similares al escenario II. El sistema se compromete a suministrar un SoC mínimo de salida de 18 kWh (o su valor en el momento de llegada a la Escuela si el SoC inicial es superior a estos 18 kWh). La diferencia con el escenario II está en que nunca se podrá descargar la batería del vehículo por debajo del SoC con el que llegó.

Este sería el modelo más conservador y que menos beneficiaría a la Escuela. La ventaja para el propietario sería que se podría ir antes de la hora de salida establecida y nunca se iría con menos carga de la batería que con el que llegó. Nótese que si se va antes de la hora de salida se podría ir con una SoC distinto a esos 18 kWh prometidos, siendo siempre el SoC de salida igual o superior al de entrada.

3.6 ESCENARIO V

Este escenario es similar al escenario IV en cuanto a que el vehículo nunca se descargaría por debajo del SoC de batería con el que llega. La diferencia está en el SoC de salida prometido. En este caso se aseguraría un SoC de salida igual al de entrada.

Este es un sistema aplicable en la Escuela, a pesar de la aparente falta de ventajas para el propietario del VE, debido que es un sistema muy conservador. Cabe destacar que el propietario del VE podría

coger el vehículo a cualquier hora y se iría con un SoC igual o superior al SoC con el que llegó. En el caso de cogerlo a la hora supuesta de salida, el SoC sería el mismo que el de entrada.

La razón de esta implementación es que puede ser muy útil a la hora analizar qué periodo de tiempo es mejor para almacenar energía, y cuáles son los periodos de tiempo más adecuados para descargar esta energía almacenada. De este modo no se limita el sistema teniendo que llegar a ese SoC prometido a la salida de 18 kWh que nos impediría aplicar los mecanismos de optimización que se aplicarían con una batería estática.

Este modelo podría ser útil en lugares en los que hay mucho exceso de producción fotovoltaica.

3.7 ESCENARIO VI

Este será el último de los escenarios estudiados. En este escenario se hace el plan de carga/descarga de la batería moviéndose en el rango ± 4.8 kWh (un 20% del total de la batería) con respecto al SoC con el que llega el VE a la Escuela. Esta libre disposición de 9.6 kWh de la batería se verá retribuida con +0.1 kWh extra cuando el propietario retire su VE del parking de la Escuela en la hora de salida prefijada. A su vez, este rango de ± 4.8 kWh se verá limitado por los 4.8 kWh de SoC mínimos y 24 kWh de SoC máximo.

Es un buen escenario para implementar en la ETSI de Telecomunicación-UPM, ya que es beneficioso tanto para el propietario del VE como para la Escuela. Además, es bastante conservador, pues el propietario del VE lo podría retirar antes de la hora supuesta de salida, y por lo general se iría con un SoC parecido al SoC con el que llegó (se iría como mínimo con -4.8 kWh con respecto al SoC con el que llegó, y como máximo con +4.8 kWh). Así mismo, la Escuela nunca perdería mucho dinero si el VE se va antes de tiempo, debido al límite superior de +4.8 kWh (caso en que se carga mucho la batería y se planea descargarla en las últimas horas del día).

Este escenario no supondría un problema para la mayoría de VE, pues podrían realizar el viaje de vuelta en el peor de los casos, caso en el que propietario retira el VE antes de tiempo y se va con -4.8 kWh. Al no garantizar 18 kWh de salida, habría algunos VE que no lo podrían realizar.

3.8 OTRAS LIMITACIONES

Además de los escenarios ya propuestos, se estudiarán otros escenarios que limiten nuestro sistema o que lo hagan no óptimo de cara al modelo real sin VE. Este apartado se centrará en los escenarios II, IV y VI, pues son los más aplicables en el ámbito de la Escuela.

Primero se estudiará cuál es el SoC mínimo que hace rentable “aceptar” un vehículo en el sistema. Esto es a razón del SoC de 18 kWh prometido a la salida. Cuando se “acepta” un vehículo que llega con un SoC muy pequeño puede ser un problema tener que cargar la batería hasta 18 kWh, llegando incluso a ser más rentable el sistema sin incluir el vehículo al sistema que incluye el vehículo. Este estudio se hará para los escenarios II y IV, pues son en los que hay que alcanzar esos 18 kWh.

También se estudiará el dinero que se ganaría/perdería si, suponiendo una hora de salida, el propietario del vehículo decide retirarlo antes de tiempo. Se verá cómo en algunos casos se gana dinero y en otros se pierde. Este estudio se hará para el escenario VI, debido a la gran variabilidad de SoC de las baterías de los VE mientras están aparcados, y a que es uno de los escenarios más aplicables en el ámbito de la Escuela.

4 RESULTADOS

En este apartado se estudiará cada una de las topologías de las que se ha hablado anteriormente y se analizarán los resultados.

En todas las gráficas de este apartado se representará valores de energía consumida en una hora. Todos los valores se representarán al final de la hora, es decir, el valor representado en hora(eje x) = 1 es el valor de la energía consumida entre las 0:00 y las 1:00, y así sucesivamente.

En el escenario real, es decir, sin la inclusión de VE en el sistema, el gasto por hora debido a la energía consumida en el edificio C es el siguiente.

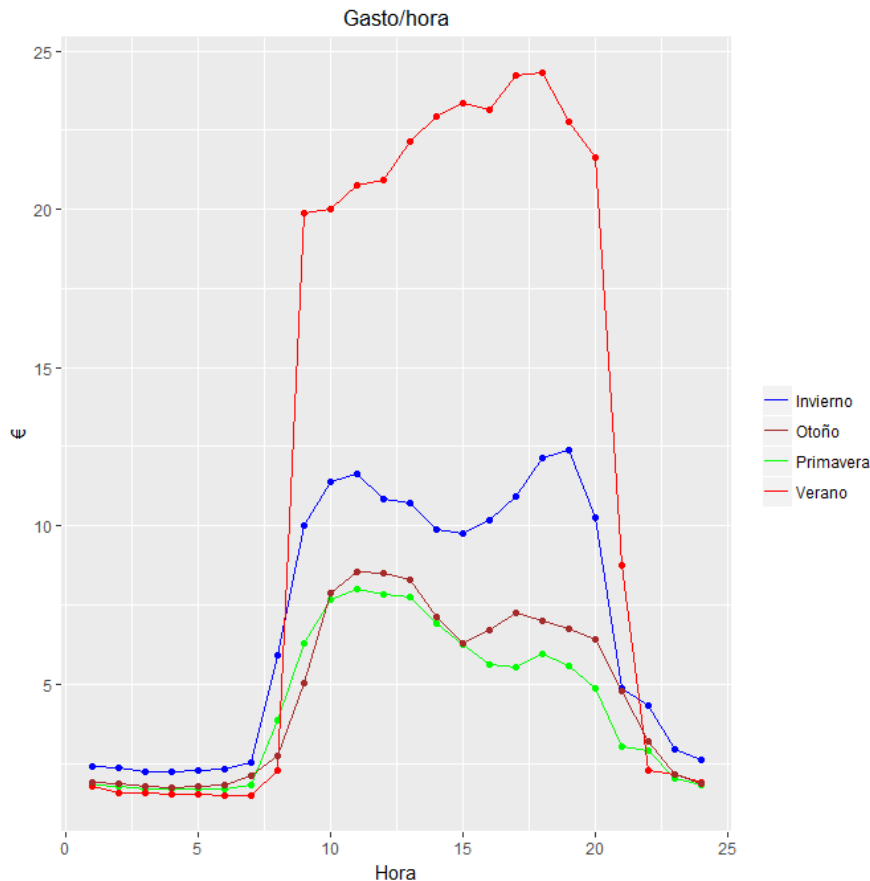


Figura 14: Gasto/hora.

En Figura 14 se muestra el gasto por hora del edificio C. Este gasto se ha calculado como:

$$\text{Gasto}(t) = [CE(t) - PF(t)] * PE(t); \quad t = 1: 24$$

Ecuación 3: Gasto sin vehículos.

Donde:

$CE(t)$ = Consumo de la escuela en la hora t [kWh].

$PF(t)$ = Producción fotovoltaica [kWh].

$PE(t)$ = Precio de la energía en la hora t [€/kWh].

Los gastos totales al final del día son 167.09 € en invierno, 103.94 € en primavera, 294.25 € en verano y 113.49 € en otoño. Sorprende que, habiendo consumido cantidades muy parecidas de energía en los días de invierno y primavera, haya una diferencia de más de un 50% en el gasto. Esto se debe a que el precio de la energía en el día de invierno fue muy superior al del resto de estaciones.

También destaca el gasto en el día de verano frente al resto de estaciones, debido principalmente al alto consumo concentrado en las horas laborales. Cabe destacar que el gasto base de verano es el menor de todos, a la vez que su gasto medio y su gasto pico es el mayor.

Tabla 6: Gastos/día sin VE

	Gasto total [€/día]	Gasto pico [€/hora]	Gasto base [€/hora]	Gasto medio [€/hora]
Invierno	167.09 €	12.38 € (18:00 - 19:00)	2.24 € (3:00 - 4:00)	6.92 €
Primavera	103.94 €	8.02 € (10:00 - 11:00)	1.68 € (4:00 - 5:00)	4.33 €
Verano	294.25 €	24.32 € (17:00 - 18:00)	1.48 € (5:00 - 6:00)	12.26 €
Otoño	113.49 €	8.55 € (10:00 - 11:00)	1.74 € (3:00 - 4:00)	4.73 €

4.1 ESCENARIO I

En este escenario se cargan los VE según llegan a la Escuela, hasta alcanzar esos 18 kWh de SoC que se garantizaban a la salida, momento en el que los VE dejan de cargarse. En los casos en los que los VE llegasen con una carga superior a 18 kWh, no se haría nada.

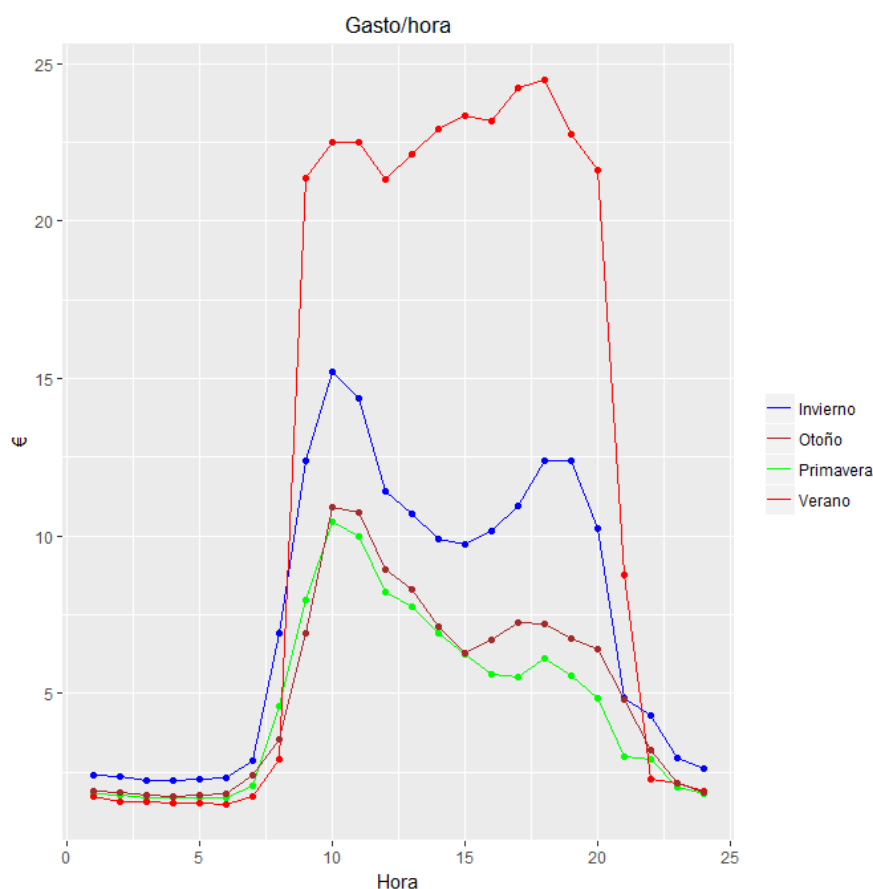


Figura 15: Gasto/hora E-I

En Figura 15 se muestra el gasto por hora del escenario I, en los cuatro días del año. Los gastos totales al final del día son 178.17 € en invierno, 111.94 € en primavera, 301.41 € en verano y 122.28 € en otoño, todos ellos algo superiores a los gastos del apartado anterior, representados en Figura 14. Esto es debido a que en este escenario no se realiza ningún tipo de optimización, y únicamente

se calcula el gasto que supondría cargar todos los VE para que a la salida tengan al menos los 18 kWh de SoC prometidos. Es más, al no haber ningún tipo de implementación, este escenario será el que tenga un mayor sobrecoste con respecto al escenario sin VE.

Destaca el alto incremento en el gasto por la energía comprada entre las horas 8:00-11:00, con respecto a *Figura 14*, horario en el que llegan la mayoría de VE y por lo tanto momento en el que habrá que cargarlos.

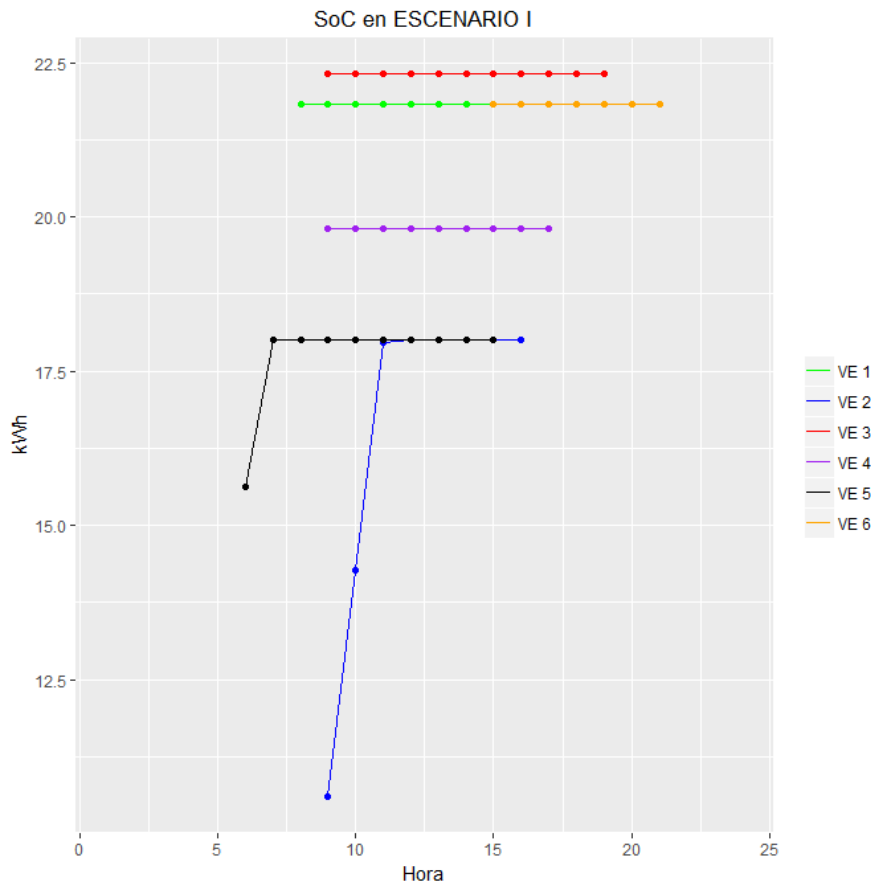


Figura 16: SoC E-I

En *Figura 16* se muestra el plan de carga/descarga de seis VE escogidos de entre los 170 vehículos. Estos seis vehículos serán los que se utilizarán en el resto de escenarios para mostrar el plan seguido (en todos se realiza la optimización con los 170 VE y se muestran estos seis). Las características de movilidad de estos seis VE son las siguientes.

Tabla 7: Características de seis VE (figuras apartado 4)

Vehículo eléctrico	Hora de llegada	Hora de salida	Carga inicial
VE 1	8:00	19:00	21.82 kWh
VE 2	9:00	16:00	10.60 kWh
VE 3	9:00	19:00	22.33 kWh
VE 4	9:00	17:00	19.81 kWh
VE 5	6:00	15:00	15.63 kWh
VE 6	15:00	21:00	21.82 kWh

En este escenario solo se cargarán VE 2 y VE 5 hasta llegar a 18 kWh, momento en el que dejarán de cargarse. El resto de VE mantendrán la carga con la que llegan a la Escuela. Nótese que no es un buen escenario, y su único objetivo será servir como referencia del caso peor para la comparación con el resto de escenarios.

4.2 ESCENARIO II

En este escenario, todos los VE se irán con un SoC de 18 kWh o con el SoC con el que llegaron, si éste es superior. El sistema tiene como límite de carga superior 24 kWh e inferior 4.8 kWh, pudiendo valer el SoC de la batería de un VE cualquier valor entre estos dos límites, siempre que se cumpla la primera condición.

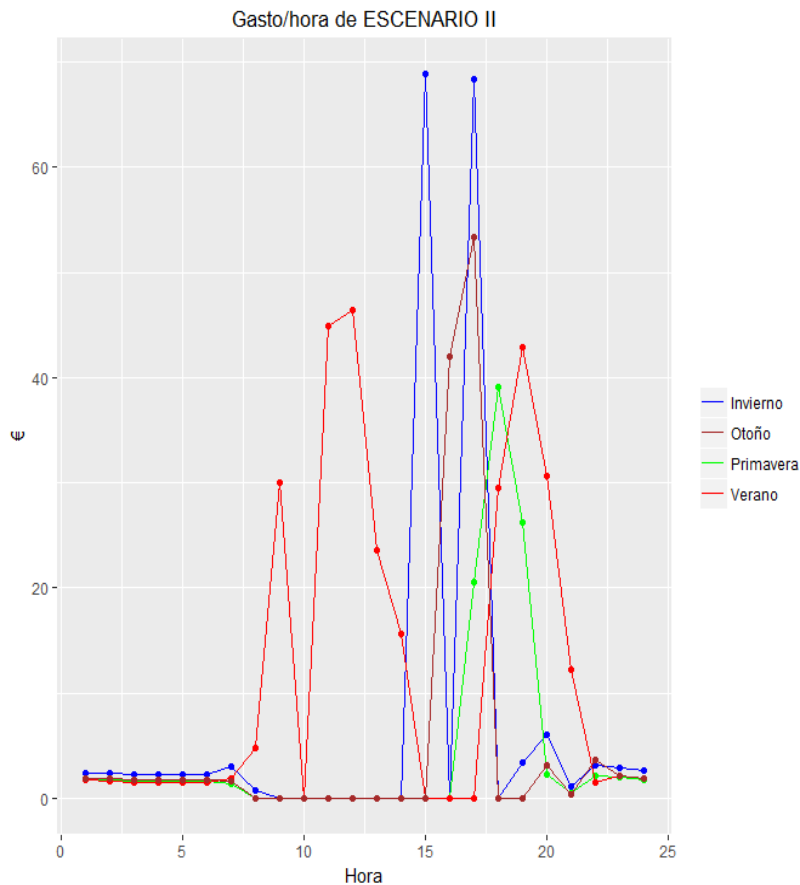


Figura 17: Gasto/hora E-II

En *Figura 17* se muestra el gasto por hora del escenario II, en los cuatro días del año. Los gastos totales al final del día son 174.19 € en invierno, 106.26 € en primavera, 297.64 € en verano y 119.13 € en otoño, todos ellos algo superiores a los gastos del escenario sin VE, representados en *Figura 14*, e inferiores a los gastos del escenario I, representado en *Figura 15*. Destacan los días de primavera y verano, días en los que apenas hay un sobrecoste con respecto al escenario sin VE de 2.31 € y 3.38 € respectivamente, consiguiendo que todos los VE salgan de la Escuela con 18 kWh, suficiente energía para hacer el viaje de vuelta. Nótese que conseguir un SoC a la salida de al menos 18 kWh para todos los VE implica un sobrecoste energético de 69.95 kWh para la Escuela. El peor día en cuanto al gasto es el de invierno, en el que hay un sobrecoste de 7.10 € con respecto al escenario sin VE.

Analizando *Figura 17*, se observa que el sistema más rentable es aquel que carga la mayoría de VE en muy pocas horas del horario laboral, teniendo un gasto muy elevado en las mismas, y teniendo un gasto nulo en el resto de horas, al abastecerse únicamente con la energía almacenada en los VE. Por ejemplo, hay gasto grande (mayor de 10 €/hora) únicamente en dos horas en invierno y otoño, y en tres horas en primavera, mientras que en verano se reparte el gasto a lo largo del día, debido al consumo muy superior del edificio C con respecto al resto de estaciones. Esas pocas horas en las que carga la mayoría de los VE son aquellas con menor precio de la energía (ver *Figura 13*). El resto de horas con precios más altos, el edificio C no consumirá energía proveniente de la red eléctrica, abasteciéndose únicamente con la energía almacenada en las baterías de los VE.

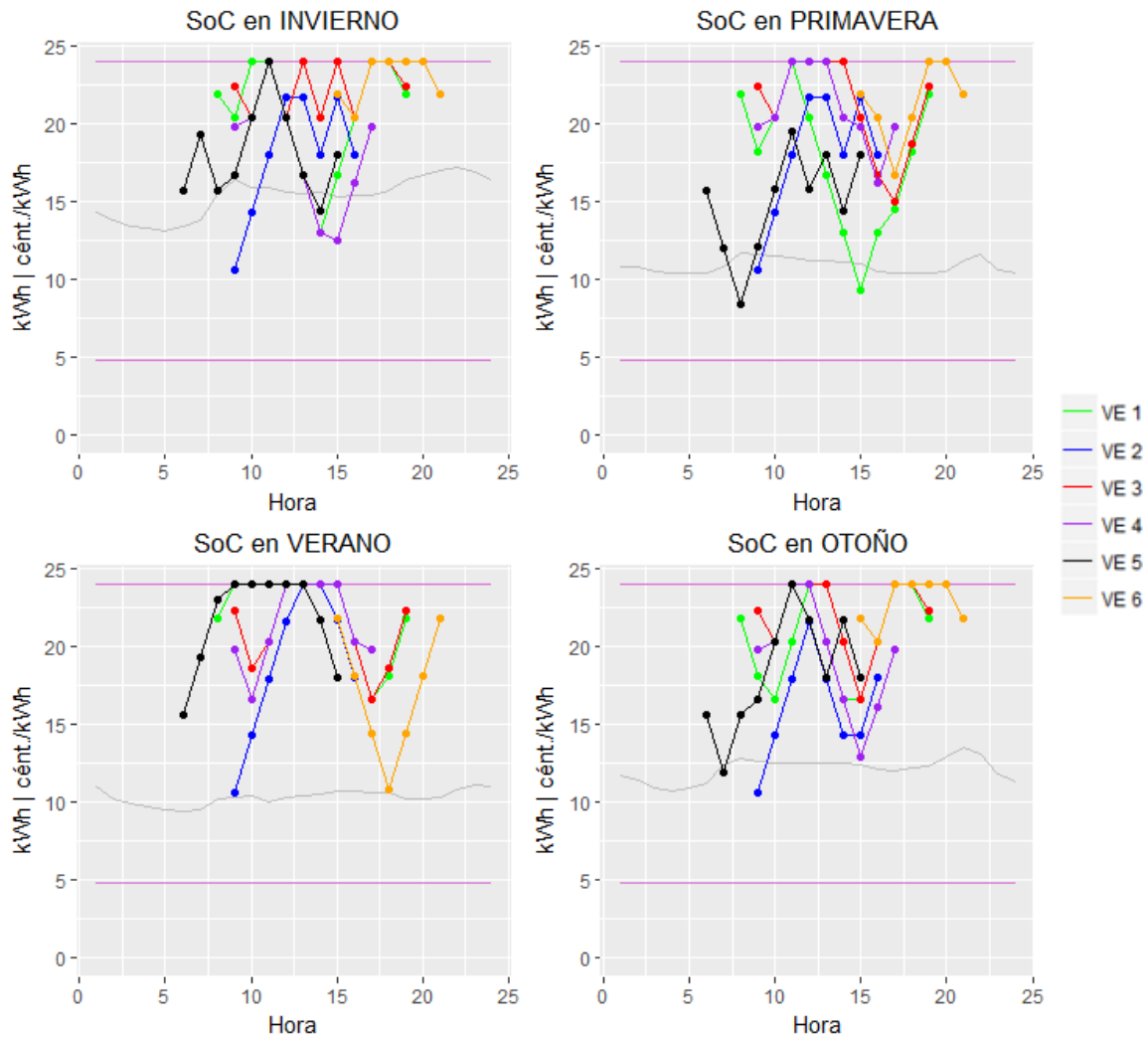


Figura 18: SoC E-II

En *Figura 18* se muestra el plan de carga y descarga de los seis vehículos de *Tabla 7* para los días de las cuatro estaciones. En gris se representa el precio de la energía en céntimos de euro/kWh, y en magenta se representan los límites que puede alcanzar el SoC de la batería superior (24 kWh), e inferior (4.8 kWh). Se observa como los VE que llegan con un SoC superior a 18 kWh se irán con la misma carga, mientras que los que llegan con un SoC menor se irán con 18 kWh de SoC. Este es el caso de VE 2 (azul) y VE 5 (negro).

A pesar de seguir una estrategia de carga/descarga distinta con cada vehículo debido a las características iniciales y finales diferentes, se pueden intuir las horas con más gasto y las de menos. Por ejemplo, en verano, el edificio C consume energía exclusivamente de los VE en las horas 15:00, 16:00 y 17:00 (*ver Figura 17*), y se observa como todos los VE se descargan en esas horas, mientras que se cargan en las siguientes.

Destaca que la mayor parte de las cargas/descargas se hacen a 3.68 kW (es decir, a la máxima potencia posible), y que, debido a las diferentes horas de entrada y salida, el sistema cargará algunos VE, a la vez que descarga otros. La media de todos dará el resultado mostrado en la *Figura 17*.

Por último, se observa que, por lo general, los VE se cargarán en las horas con precios de la energía más bajos, y se descargarán en las horas con precios más altos. Esto no ocurre con los VE que llegan con un SoC inferior a 18 kWh, debido a las limitaciones de la hora de salida y a los 18 kWh mínimos de SoC a la salida. Se verá como este mismo fenómeno se repite en el resto de escenarios.

4.3 ESCENARIO III

En este escenario, todos los VE se irán con el SoC con el que llegaron. El sistema tiene como límite de carga superior 24 kWh e inferior 4.8 kWh, pudiendo valer el SoC de la batería de un VE cualquier valor entre estos dos límites, siempre que se cumpla la primera condición.

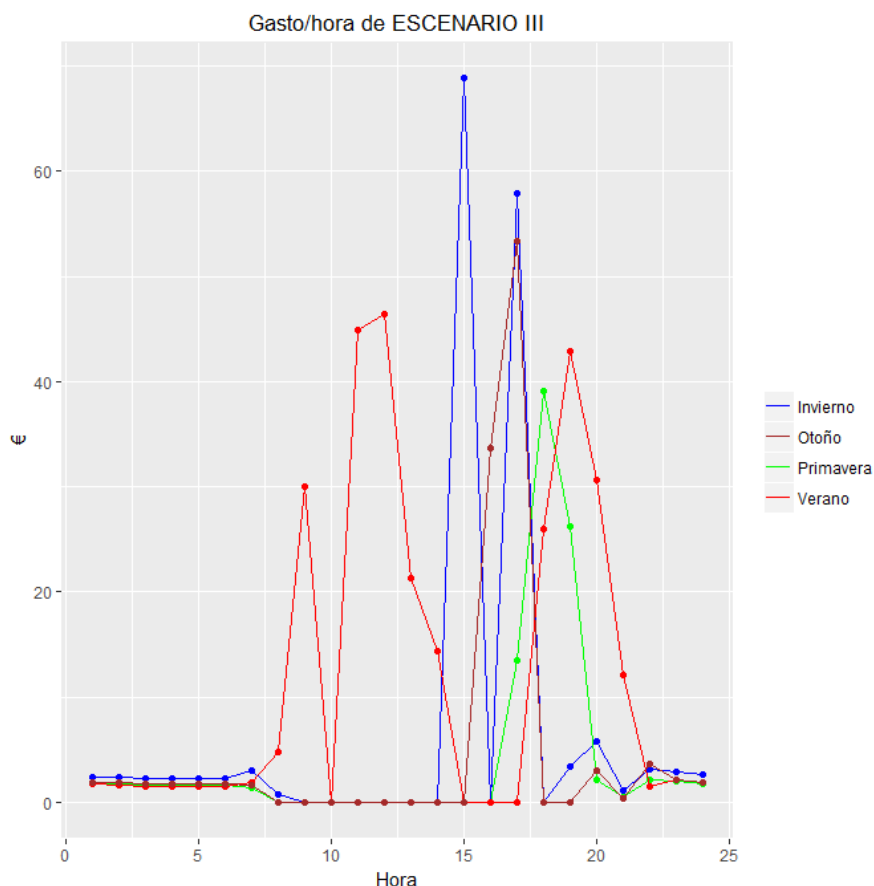


Figura 19: Gasto/hora E-III

En *Figura 19* se muestra el gasto por hora del escenario III en los cuatro días del año. Los gastos totales al final del día son 163.44 € en invierno, 98.99 € en primavera, 290.28 € en verano y 110.63 € en otoño, todos ellos algo inferiores a los gastos del escenario sin VE, representados en *Figura 14*. Esto es lógico, debido a que en este escenario el sistema tiene libertad casi absoluta para cargar y descargar los VE. Además, tampoco habrá un sobrecoste por llegar a esos 18 kWh de carga mínima a la salida.

En comparación con el escenario anterior (ver *Figura 17*), los gastos por hora son muy parecidos. El sistema óptimo será aquel que cargue la mayor parte de los VE en muy pocas horas, teniendo un gasto muy elevado en las mismas, y se abastezca de la energía sacada de las baterías de los VE el resto de las horas del día, obteniendo un gasto nulo en dichas horas. La mayor parte de esas horas de gastos muy altos estarán entre las 15:00 y las 19:00, horas con un PVPC menor (ver *Figura 13*), y, por lo general, horas previas a la salida de la mayoría de VE (ver *Figura 10*).

Este es el escenario que otorga más libertad al sistema, obteniendo un ahorro en el gasto total de energía con respecto al escenario sin VE de 3.65 € en invierno, 4.95 € en primavera, 3.97 € en verano y 2.86 € en otoño. Esto supone un ahorro de 1402.51 € al año, siendo el escenario III el más rentable para la Escuela.

A partir de estos datos, se llega a la conclusión de que el mejor tipo de día para implementar este escenario será uno con las condiciones del de primavera, en el que le PVPC decrezca según avanza el horario laboral (ver *Figura 13*), y además haya un decremento en el consumo de la Escuela por la tarde.

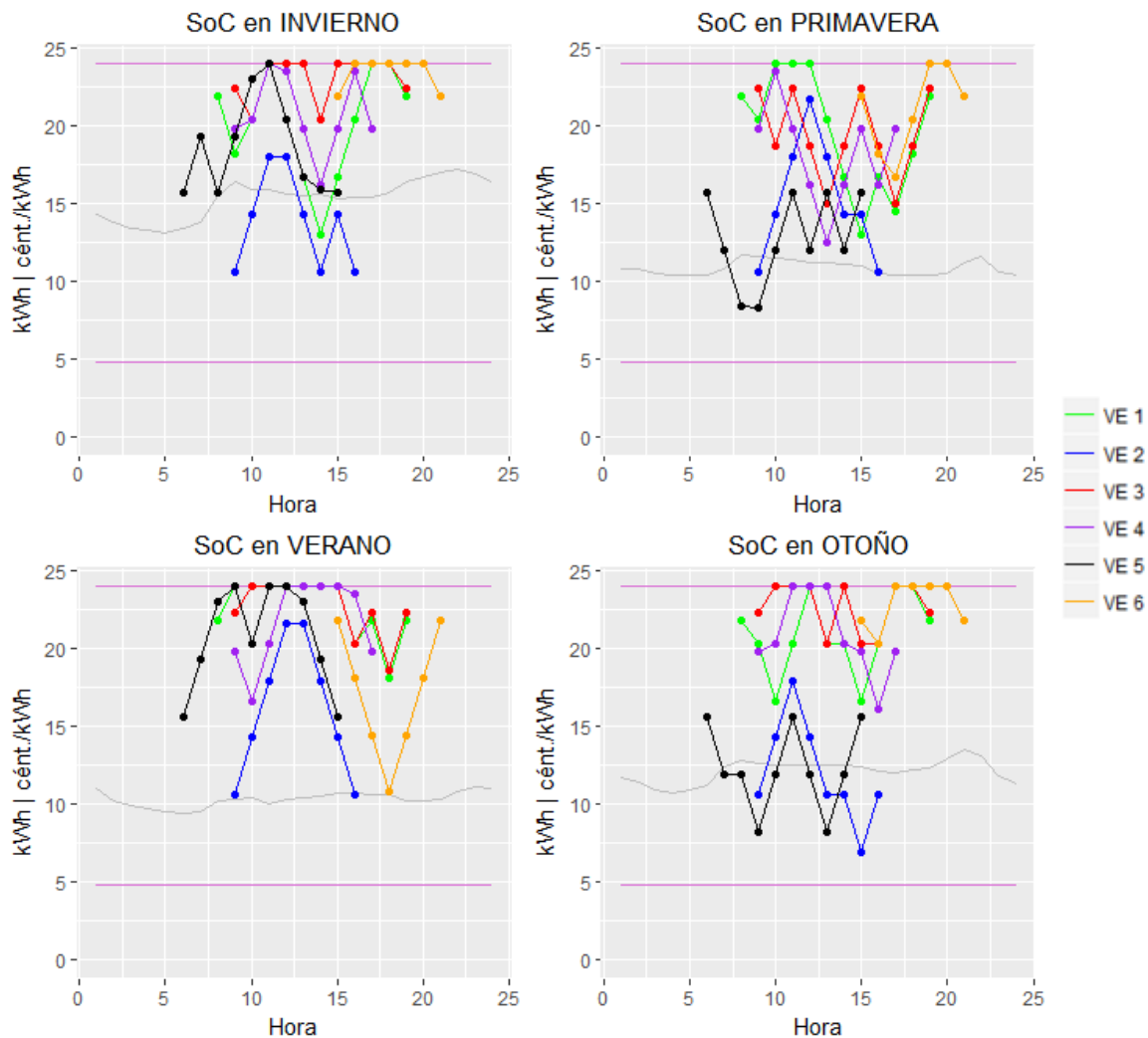


Figura 20: SoC E-III

En *Figura 20* se muestra el plan de carga y descarga de los seis vehículos de *Tabla 7* para los días de las cuatro estaciones. Se observa que aquellos VE que llegan a la Escuela con un SoC superior a 18 kWh no siguen el mismo plan de carga/descarga que seguían en el escenario II (ver *Figura 18*), a pesar de que las condiciones del escenario III para estos vehículos son las mismas que las del escenario II. Esto es lógico, pues el sistema incluirá los 20 VE (de entre los 170 VE) que llegan con un SoC inferior a 18 kWh y que ya no tendrá que cargar hasta 18 kWh a la salida.

En este escenario, a diferencia del escenario II, se observa como los VE que llegan con un SoC inferior a 18 kWh también se cargan en las horas con precios más bajos, y se descargan en las horas con precios más altos, debido a que ya no se les tiene que garantizar el SoC de 18 kWh a la salida.

Por último, de este escenario en comparación con el escenario II, destaca el sobrecoste que tiene proporcionar un SoC de 18 kWh a esos 20 VE que llegan con un SoC inferior (69.95 kWh extra). Este sobrecoste no se ve compensado por la libre disposición de las baterías del resto de VE, llegando a ser más rentable para la Escuela el escenario sin VE que el escenario II. Este sobrecoste debido a esos 20 VE es de 10.75 € en invierno, 7.27 € en primavera, 7.36 € en verano y 8.50 € en otoño. De nuevo, son los días con unas condiciones similares al de primavera los mejores para implementar este tipo de escenarios.

4.4 ESCENARIO IV

En este escenario, todos los VE se irán con un SoC de 18 kWh o con el SoC con el que llegaron, en el caso en que sea superior. El sistema tiene como límite superior un SoC de 24 kWh y como límite inferior el SoC con el que llegó el VE a la Escuela, pudiendo valer la carga de la batería cualquier valor entre estos dos límites, siempre que se cumpla la primera condición. Este escenario tiene características similares al escenario II, con la diferencia de que en el escenario II se permite descargar la batería del VE por debajo del SoC con el que llega a la Escuela, mientras que en este escenario no se permite.

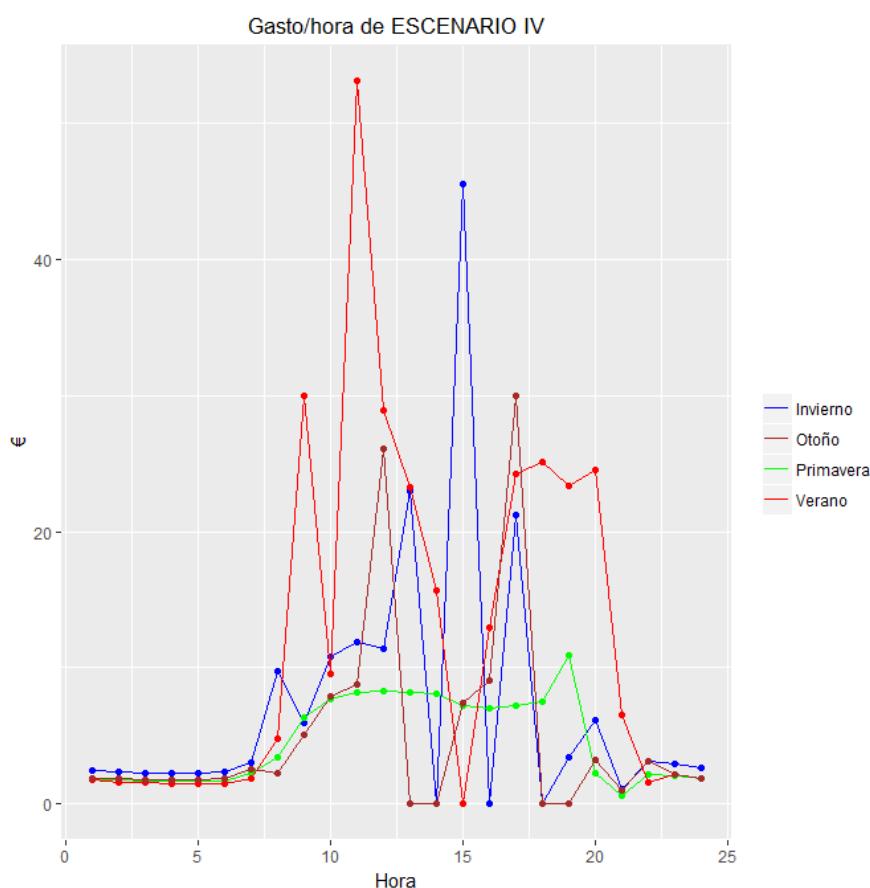


Figura 21: Gasto/hora E-IV

En Figura 21 se muestra el gasto por hora del escenario IV, en los cuatro días del año. Los gastos totales al final del día son 175.77 € en invierno, 111.09 € en primavera, 299.00 € en verano y 121.04 € en otoño, todos ellos algo superiores a los gastos del escenario II, representados en Figura 17. Con respecto al escenario II se produce un sobrecoste de 1.58 € en invierno, 4.83 € en primavera, 1.36€ en verano y 1.91 € en otoño. Con respecto al escenario I, habría un ahorro en el gasto total en energía de 2.40 € en invierno, 0.85 € en primavera, 2.41 € en verano y 1.24 € en otoño.

Sorprende la gran diferencia entre Figura 17 y Figura 21, pues, teniendo los escenarios II y IV unas características similares (y gastos en energía muy parecidos), los sistemas se comportan de un modo radicalmente distinto. Es más, hay ciertos días que tienen un comportamiento similar al del escenario II, y otros tienen un comportamiento más parecido al del escenario I. Los días de invierno, verano y otoño se comportan de una manera muy parecida a como se comportaban en el escenario II, días con los que la diferencia entre los precios de la energía al final del día es menor, y con los que las curvas del gasto/hora tienen formas más parecidas. Por ejemplo, en invierno se sigue optimizando según el algoritmo de cargar la mayor parte de los VE en muy pocas horas con precios más bajos, teniendo un gasto grande en las mismas, y disminuyéndolo mucho en el resto de las horas. Cabe destacar que, a pesar de este comportamiento similar, ya deja de haber gasto nulo en la mayor parte de las horas de horario laboral de invierno. Por otro lado, el día de primavera tiene un comportamiento más parecido al del escenario I. Además, la diferencia en el gasto total en energía de este día con respecto

al escenario I es menor que la diferencia con respecto al escenario II. En *Figura 21* se comprueba como el gasto en horario laboral en primavera es más plano que el del resto de los días, y como ya no se sigue el algoritmo de carga de la mayoría de VE en unas pocas horas del día. Sorprende este comportamiento, porque era el día de primavera en el que la optimización en el escenario III suponía un mayor ahorro, y en escenario II un menor sobrecoste con respecto al escenario sin VE.

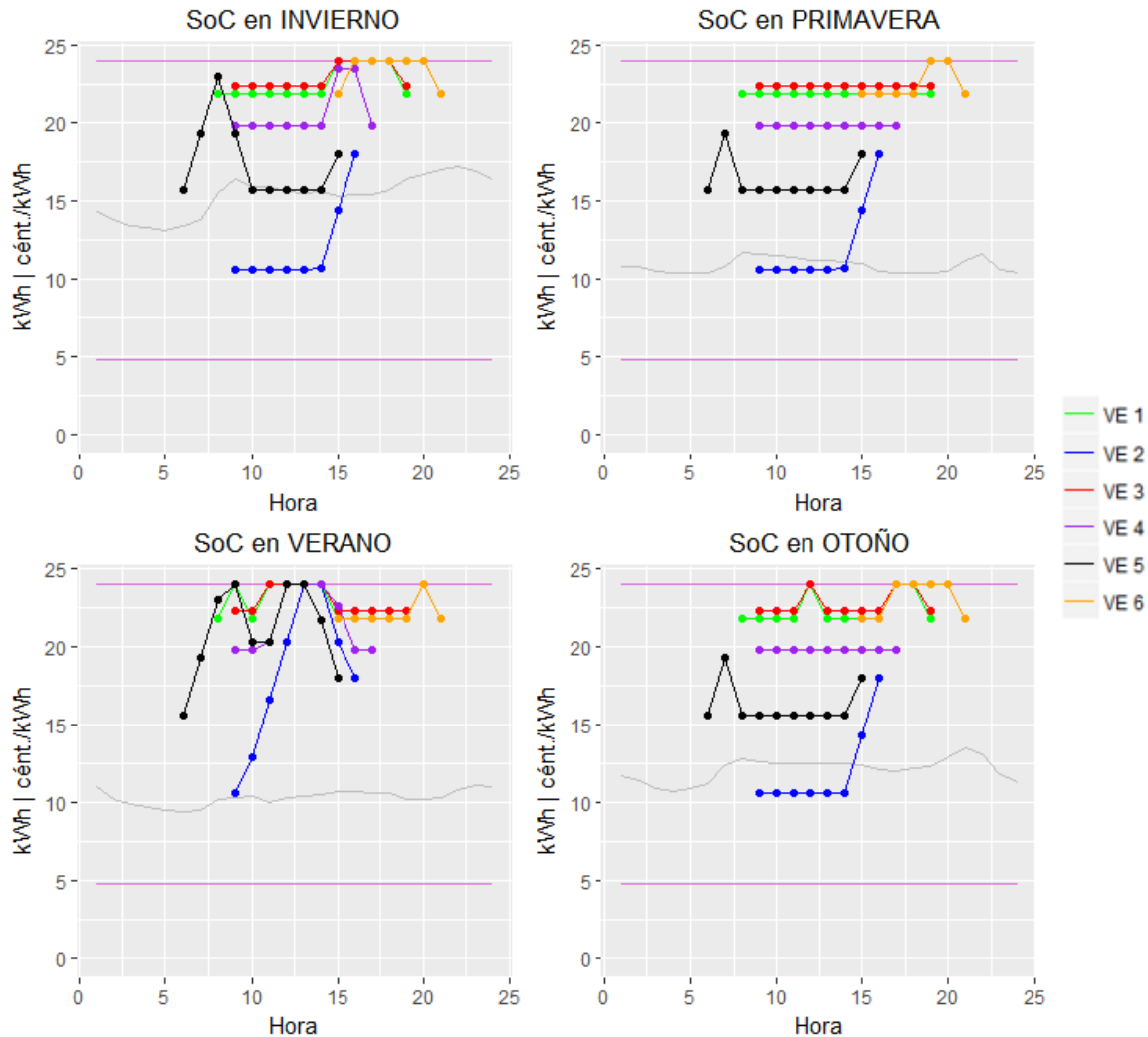


Figura 22: SoC E-IV

En *Figura 22* se muestra el plan de carga y descarga de los seis vehículos de *Tabla 7* para los días de las cuatro estaciones. En comparación con el escenario II (ver *Figura 18*) y III (ver *Figura 20*) se observa que los VE tienen un comportamiento mucho más estático, habiendo muchas horas seguidas en las que no cambian de SoC.

Por ejemplo, en el día de primavera, el más parecido en comportamiento al escenario I (ver *Figura 16*), hay vehículos que no cambian de SoC en ningún momento, teniendo un comportamiento idéntico al que tenían en el escenario I. El día de verano es el que tiene un comportamiento más dinámico, siendo el más parecido al escenario II tanto en forma de las figuras *Figura 21* y *Figura 22*, como en gasto.

A partir de estos datos, se llega a la conclusión que en la implementación de este escenario es mejor un PVPC con una forma más plana, como el de verano, que en forma de balsa, como el del resto de días (ver *Figura 13*). El peor tipo de día para implementar este escenario será uno con las condiciones del de primavera, en el que el PVPC decrezca según avanza el horario laboral, y además haya un decremento en el consumo de energía en la Escuela por la tarde.

4.5 ESCENARIO V

En este escenario, todos los VE se irán con el SoC con el que llegaron. El sistema tiene como límite de carga superior 24 kWh y como límite inferior el SoC con el que llegó el VE a la Escuela, pudiendo valer la carga de la batería cualquier valor entre estos dos límites. Este escenario tiene características similares al escenario IV, con la diferencia de que en el escenario IV el VE se iba con un SoC de 18 kWh, o con el SoC con el que llegó si era superior, mientras que en este escenario siempre se va con el SoC con el que llegó.

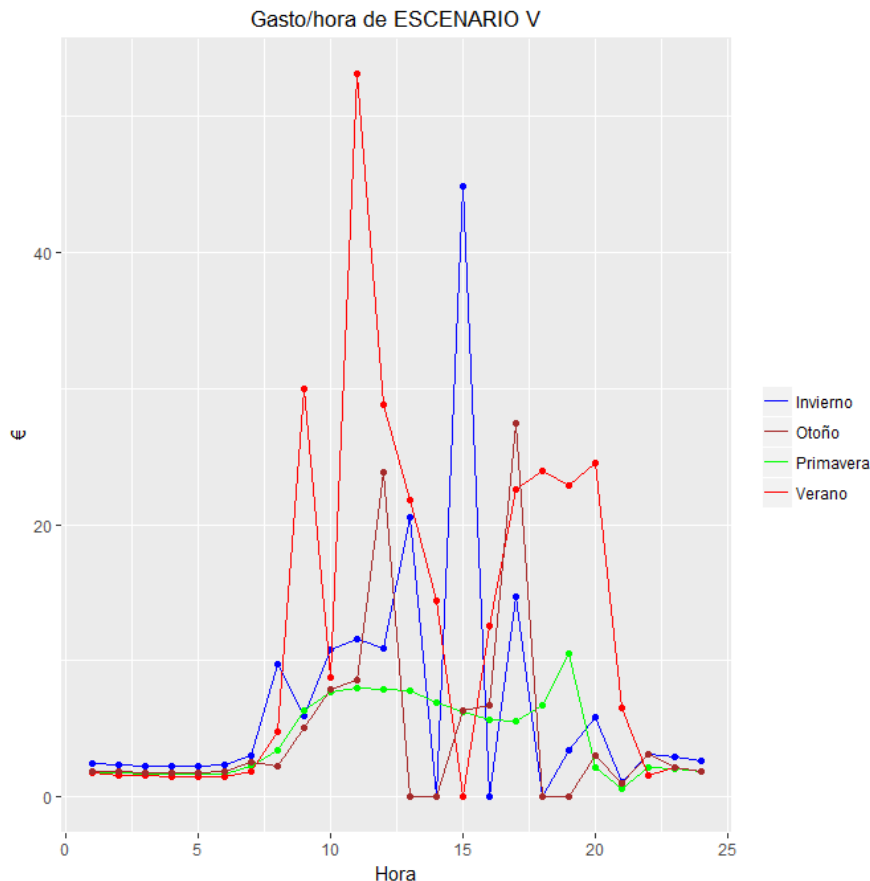


Figura 23: Gasto/hora E-V

En Figura 23 se muestra el gasto por hora del escenario V, en los cuatro días del año. Los gastos totales al final del día son 164.98 € en invierno, 103.62 € en primavera, 291.64 € en verano y 112.47 € en otoño, todos ellos algo inferiores a los gastos del escenario sin VE, representados en Figura 14. Esto es lógico, debido a que en este escenario el sistema tiene libertad para cargar y descargar los coches, siempre que no lo haga por debajo del SoC de llegada, y, en el peor de los casos, no cargará ni descargará las baterías, quedándose el sistema con el mismo gasto que en el escenario sin VE.

Este es el tercer escenario más rentable para la Escuela, dando un ahorro en el gasto en energía con respecto al escenario sin VE de 2.11 € en invierno, 0.32 € en primavera, 2.60 € en verano y 1.02 € en otoño. Esto supondría un ahorro de 544.50 € al año, con respecto al escenario sin VE.

De nuevo es el día de primavera el que menos permite optimizar en este tipo de escenarios en los que no se puede descargar las baterías por debajo del SoC de llegada (escenarios IV y V). Esto sorprende, ya que es el mismo día de primavera el que más permite optimizar en los sistemas en los que sí se puede descargar las baterías por debajo del SoC de llegada (escenarios II y III).

Con respecto a Figura 23, el sistema tiene un comportamiento muy similar al ya observado en el escenario IV (Ver Figura 21). El comportamiento de los días de invierno, verano y otoño se asemeja más al de los mismos días en el escenario III, mientras que el de primavera se asemeja más al del escenario I.

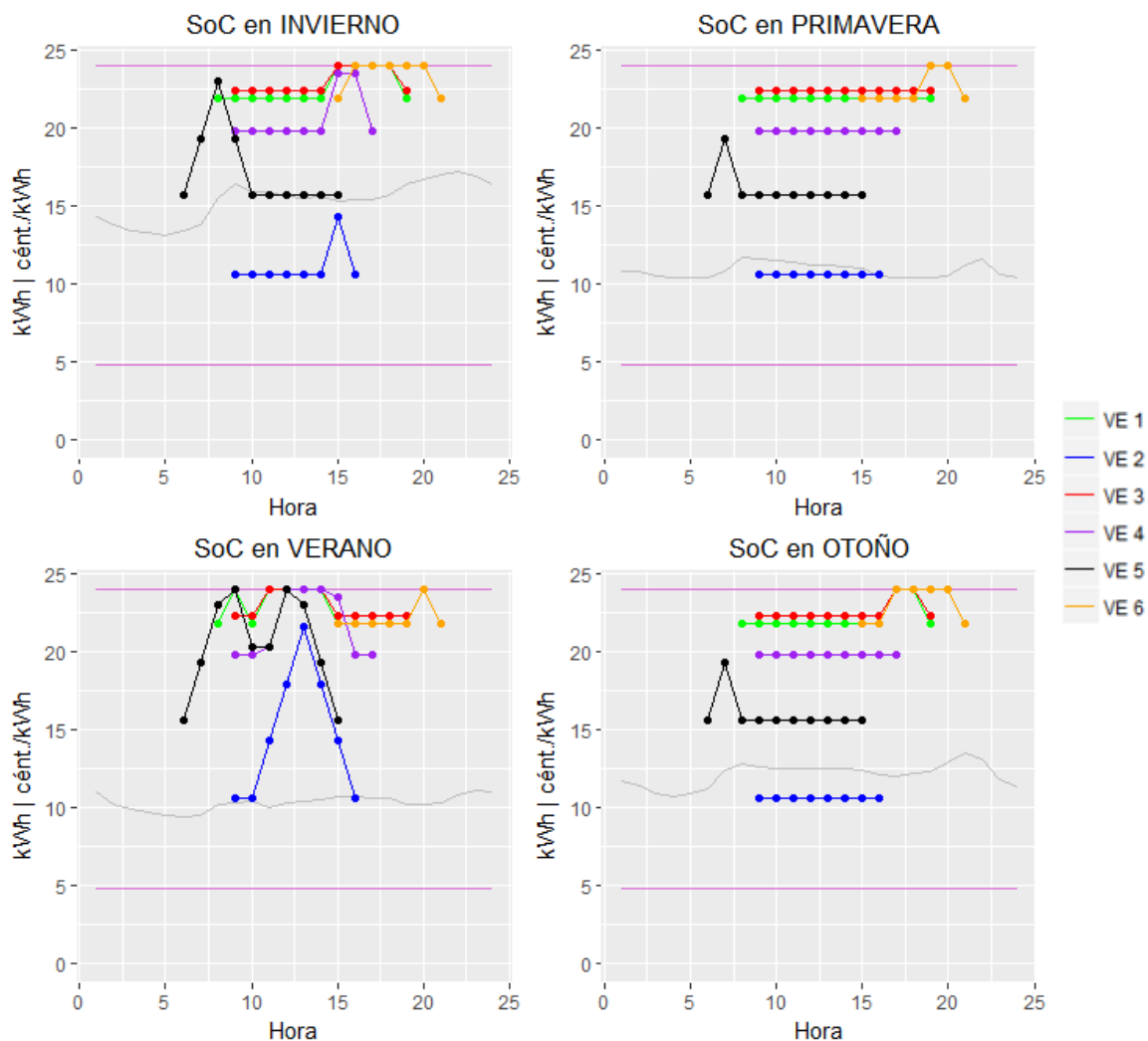


Figura 24: SoC E-V

En Figura 24 se muestra el plan de carga/descarga de los seis vehículos de Tabla 7 para los días de las cuatro estaciones. En comparación con el escenario IV (Ver Figura 22) se observa que aquellos VE que llegan a la Escuela con un SoC superior a 18 kWh siguen el mismo plan de carga/descarga. Esto es porque para estos VE el escenario V tiene las mismas condiciones que el escenario IV. Cabe destacar que el comportamiento de los VE con SoC superior a 18 kWh no se mantenía en el escenario III con respecto al escenario II.

Aquellos VE que siguen un plan distinto al del escenario IV son los 20 vehículos que llegan a la Escuela con un SoC inferior a 18 kWh. Este es el caso de los vehículos de Figura 24 VE 2 (azul) y VE 5 (negro). A pesar de este comportamiento distinto al del escenario IV, se ve como sigue siendo un sistema mucho más estático que el de los escenarios II y III. El día con un plan de carga/descarga más dinámico es el de verano, día que a su vez proporciona un beneficio mayor con respecto al escenario sin vehículos.

Por último, de este escenario, en comparación con el escenario IV, destaca el sobrecoste que tiene proporcionar un SoC de 18 kWh a esos 20 VE que llegan con un SoC inferior. Este sobrecoste no se ve compensado por la libre disposición de las baterías del resto de VE, llegando a ser más rentable para la Escuela el escenario sin VE que el escenario IV. Este sobrecoste debido a esos 20 VE es de 10.78 € en invierno, 7.47 € en primavera, 7.36 € en verano y 8.57 € en otoño. Esta diferencia entre costes es prácticamente idéntica al sobrecoste que tenía el escenario II con respecto al escenario III.

4.6 ESCENARIO VI

En este último escenario todos los VE se irán de la Escuela con 0.1 kWh más que el SoC con el que llegaron. A cambio se permitirá que, mientras el VE está en el parking de la Escuela, el sistema optimizador pueda cargar y descargar las baterías ± 4.8 kWh con respecto al SoC con el que llegaron.

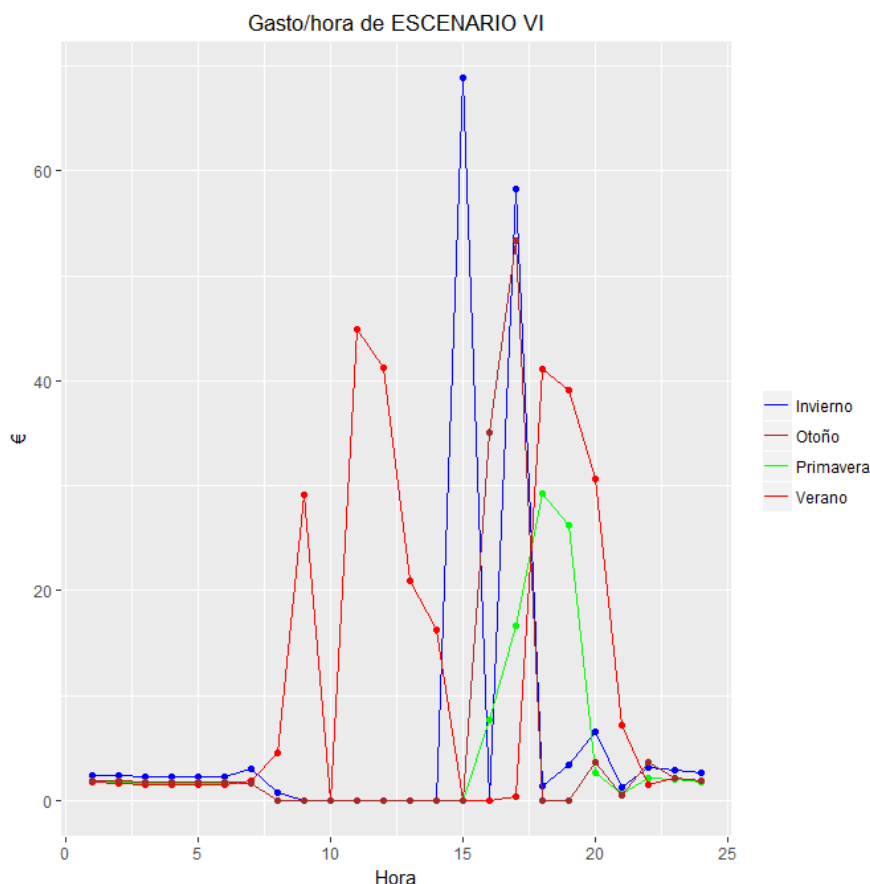


Figura 25: Gasto/hora E-VI

En *Figura 25* se muestra el gasto por hora del escenario VI, en los cuatro días del año. Los gastos totales al final del día son 166.12 € en invierno, 100.85 € en primavera, 292.54 € en verano y 112.72 € en otoño, todos ellos algo inferiores a los gastos del escenario sin VE, representados en *Figura 14*.

El escenario más parecido a este es el escenario III, y todos los días tienen un gasto horario muy parecido al de éste. Siendo el escenario III más rentable, habría una diferencia en el ahorro de energía entre ambos escenarios de 2.68€ en invierno, 1.86 € en primavera, 2.26 € en verano y 2.09 € en otoño. Destaca el día de primavera, ya que es el día en el que hay un gasto total más parecido entre ambos escenarios, pero tiene el gasto horario más diferente (*ver Figura 19*). También destaca el día de verano, en el que se invierten los gastos de las horas 11:00 y 12:00, y 18:00 y 19:00 con respecto al escenario III. Cabe destacar que esta diferencia con el escenario III se debe únicamente a la libre disposición del rango 4.8 kWh – 24 kWh de la batería, frente a los ± 4.8 kWh de los que dispone este escenario (que en muchos casos es un rango inferior debido a los límites de 4.8 kWh de SoC mínimo y 24 kWh de SoC máximo).

Este es el segundo escenario más rentable, dando un ahorro en el gasto en energía con respecto al escenario sin VE de 0.97 € en invierno, 3.09 € en primavera, 1.71 € en verano y 0.77 € en otoño. Esto supondría un ahorro en energía de 596.77 € al año.

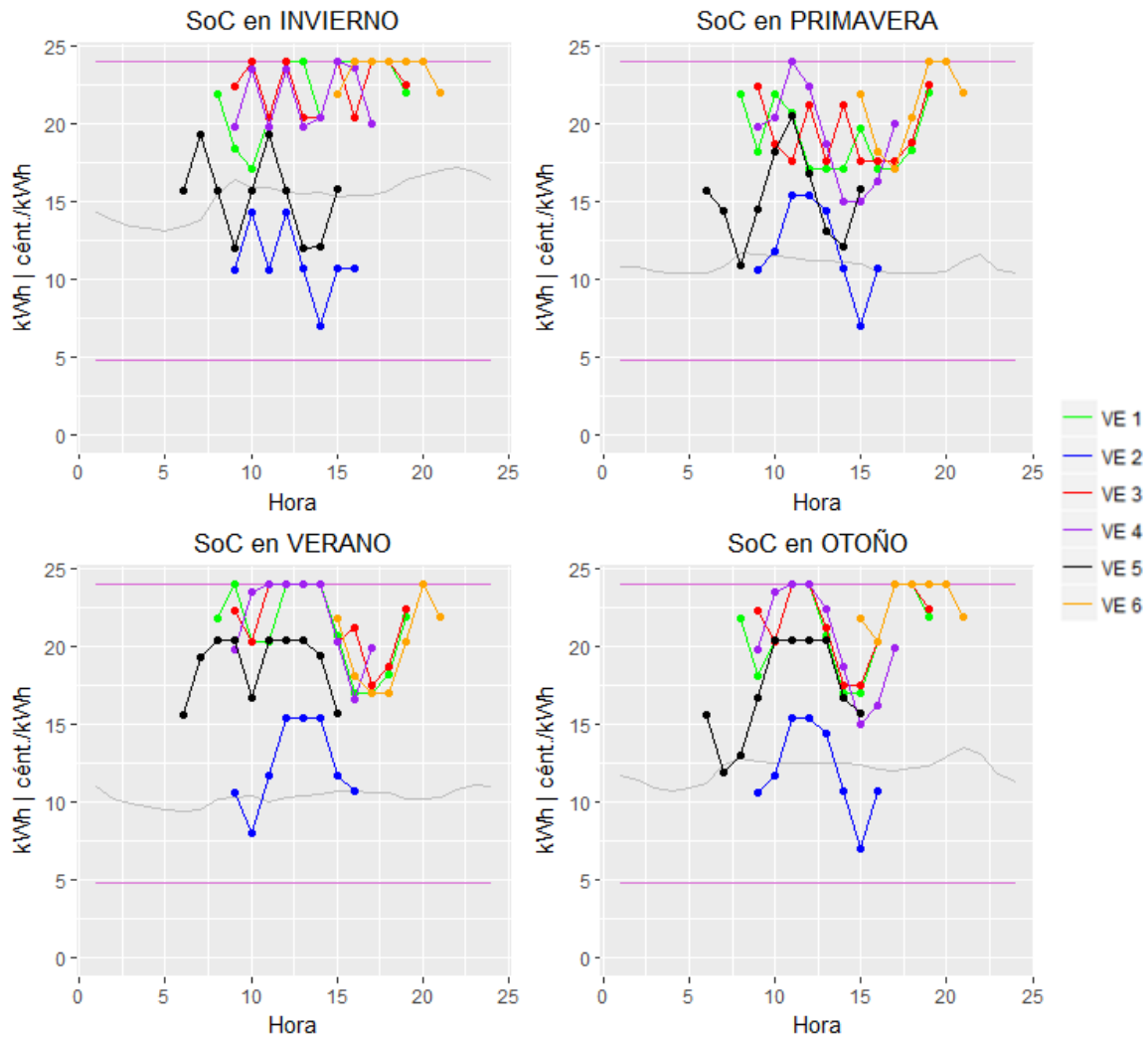


Figura 26: SoC E-VI

En *Figura 26* se muestra el plan de carga y descarga de los seis vehículos de *Tabla 7* para los días de las cuatro estaciones. Este plan de carga/descarga es mucho más dinámico que el de los escenarios IV y V, asemejándose más al del escenario III. A pesar de ello el ahorro total al final del año es mucho más parecido al del escenario V que al del escenario III.

El mayor problema de este escenario es que 141 VE llegan a la Escuela con un SoC superior a 19.2 kWh, viéndose el rango de ± 4.8 kWh limitado superiormente por los 24 kWh de capacidad máxima de la batería. Este es el caso de VE 1, VE 3, VE 4 y VE 6 de *Figura 26*. También habrá dos VE que lleguen a la Escuela con un SoC de menos de 9.6 kWh, viéndose limitado el rango ± 4.8 kWh por el límite inferior de 4.8 kWh de carga mínima.

4.7 COMPARACIÓN DE LOS GASTOS FINALES

Tabla 8: Comparación de los gastos totales/día

	E. sin VE	E-I	E-II	E-III	E-IV	E-V	E-VI
Invierno	167.09 €	178.17 €	174.19 €	163.44 €	175.77 €	164.98 €	166.12 €
Primavera	103.94 €	111.94 €	106.26 €	98.99 €	111.09 €	103.62 €	100.85 €
Verano	294.25 €	301.41 €	297.64 €	290.28 €	299.00 €	291.64 €	292.54 €
Otoño	113.49 €	122.28 €	119.13 €	110.63 €	121.04 €	112.47 €	112.71 €
MEDIA	170.56 €	178.45 €	174.31 €	165.84 €	176.73 €	168.18 €	168.06 €
AHORRO	0.00 €	-7.89 €	-3.75 €	4.73 €	-6.17 €	2.38 €	2.51 €
Invierno	0.00%	-6,63%	-4,25%	2,18%	-5,19%	1,26%	0,58%
Primavera	0.00%	-7,70%	-2,23%	4,76%	-6,88%	0,31%	2,97%
Verano	0.00%	-2,43%	-1,15%	1,35%	-1,61%	0,89%	0,58%
Otoño	0.00%	-7,75%	-4,97%	2,52%	-6,65%	0,90%	0,69%
AHORRO [%]	0.00%	-4.63%	-2.20%	2.77%	-3.62%	1.40%	1.47%

En Tabla 8 se observan los gastos por día de los seis escenarios, en comparación con el escenario sin VE. Como ya se ha comentado, el escenario más rentable para la Escuela es el escenario III (principalmente el día de primavera). Los otros dos escenarios en los que se obtiene un gasto en energía menor que en el escenario sin VE son el escenario V y el escenario VI. Así mismo, el escenario menos rentable para la Escuela será el escenario IV, obteniendo un gasto en energía superior al del escenario sin VE. Esto también pasa en el escenario I y en el escenario II.

Adicionalmente, se muestra también la rentabilidad de cada día y del total con respecto al escenario sin VE. El escenario más rentable para la Escuela es el escenario II, con un ahorro medio de 2.77 %, y alcanzando el máximo en el día de primavera con un ahorro del 4.76 %. Del mismo modo, hay dos escenarios que también son rentables para la Escuela, los escenarios V y VI, en los que se saca un 1.40% y un 1.47% de rentabilidad con respecto al escenario sin VE respectivamente. Con respecto a estos dos escenarios, cabe destacar que, a pesar de sacar más rentabilidad en el escenario VI que en el V, el escenario VI únicamente es mejor que el V para la Escuela el día de primavera, mientras que el V es mejor para el resto de días.

Por otro lado, el peor escenario para la Escuela es el I, con un 4.63 % de gasto extra. Los otros dos escenarios que tampoco son rentables para la Escuela son el II y IV, con un 2.20 % de gasto extra en el primero, y un 3.62 % de gasto extra en el segundo. Cabe destacar que estos dos escenarios son en los que se asegura un SoC mínimo a la salida de 18 kWh.

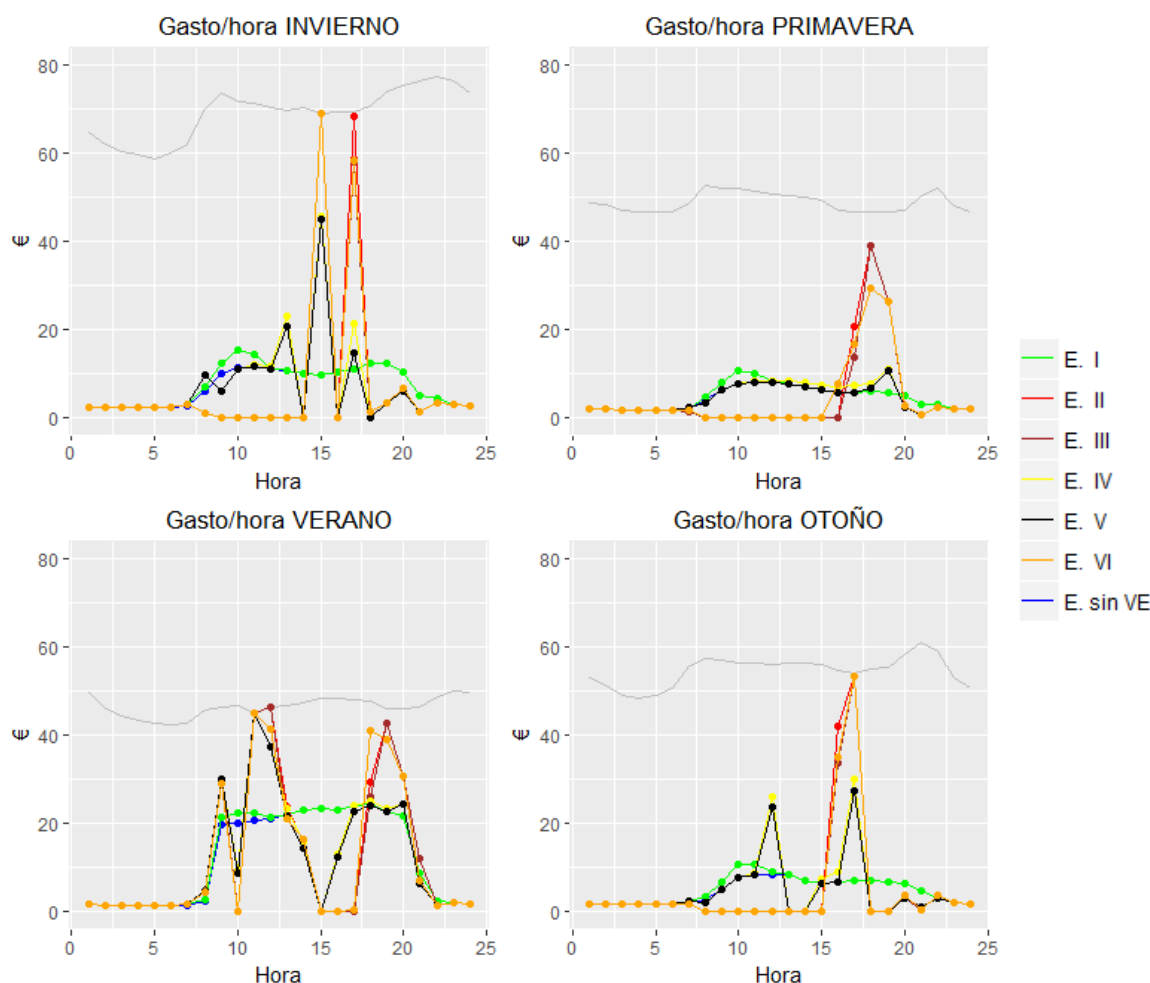


Figura 27: Gasto/hora 7 escenarios

En Figura 27 se muestra el gasto por hora de los distintos escenarios. En gris se representa la potencia máxima alcanzable, es decir, el precio de la energía en una hora multiplicado por los 450 kW contratados. Se observa como el escenario II y el escenario III tienen gastos casi idénticos, siendo los del escenario III algo más bajos. Esta relación de gastos también se repite entre los escenarios IV y V. Por su parte, el escenario VI también tiene unos gastos/hora similares a los del escenario III, pero en primavera y verano, a pesar de la similitud que siguen manteniendo, difieren más de lo que cabría esperar.

También se observa cómo se llega a la potencia máxima suministrable, es decir, 450 kW durante una hora (450 kWh de energía), en los escenarios II, III y VI en invierno, verano y otoño. Los escenarios IV y V llegarán a la potencia máxima suministrable únicamente en verano, debido a que los gastos totales son más altos y tienen un margen de gasto mayor que en el resto de estaciones. Esta potencia máxima contratada se alcanzará en las horas con un precio de la energía más bajo. En primavera no se llega al límite de potencia máxima en ningún escenario debido a que, entre las 15:00 y las 20:00, hay un precio por la energía prácticamente idéntico, y mínimo con respecto al resto de horas laborales. Que se llegue a esta potencia máxima contratada únicamente en unas pocas horas, teniendo un consumo mucho menor en el resto, indica que quizás sería rentable bajar el término de potencia para ahorrar en el gasto total.

Por último, sorprende la forma de las curvas de los escenarios IV y V en primavera. Como ya se ha comentado, su comportamiento se asemeja más al del escenario I que al de los escenarios II y III, con los que guardan más relación.

4.8 OTRAS LIMITACIONES

En este apartado se hará un estudio de las limitaciones que suponen las condiciones particulares de cada VE y cómo afectan al sistema. Primero se estudiará, para los escenarios II y IV, el SoC mínimo partir del cual es rentable la inclusión de un VE en el sistema. A continuación, se hará un estudio de la repercusión que tendría, para el escenario VI, retirar un VE ante de la hora prevista.

Como ya se ha visto en las secciones 4.2 y 4.4, alcanzar un SoC de 18 kWh a la salida puede suponer un problema en el gasto total, en el caso en que el VE llegue con un SoC muy bajo. Como consecuencia sería más rentable un sistema que no incluyese esos VE que llegan con un SoC bajo, que el sistema que cuenta con ellos, puede aplicar los algoritmos de optimización, pero debe asegurarles esos 18 kWh a la salida.

El objetivo de este estudio será determinar a partir de qué SoC inicial es rentable incluir un VE en el sistema, supuestas una hora de entrada y de salida determinadas.

A continuación, se mostrarán estos SoC iniciales en una tabla para el escenario II (*Tabla 9*) y otra para el IV (*Tabla 10*), supuestas una hora de entrada determinada (eje izquierdo) y una hora de salida determinada (eje superior).

Como se observa en *Tabla 9*, en la mayoría de los casos el VE debe llegar con un SoC muy cercano a 18 kWh para que sea rentable incluirlo en el sistema.

El mejor día para aplicar el algoritmo, supuesto el escenario II, es el de primavera. Sorprende para ese día que, si un VE llega a las 8:00 con 16.3 kWh y se va a las 22:00, sería rentable para el sistema incluirlo en la red de optimización, y asegurarle un SoC a la salida de 18 kWh. Por su parte, el peor día para aplicar el algoritmo de optimización, supuesto el escenario II, es el de verano. A pesar de ello, un VE que entra a las 8:00 y sale a las 22:00 en el día de verano sería rentable para el sistema con un SoC inicial de 17.128 kWh, siendo menor que los SoC requeridos en el escenario IV para cualquier día.

Tabla 9: SoC mínimo de entrada.

H. entrada H. salida	Invierno				Primavera			
	8:00	9:00	11:00	15:00	8:00	9:00	11:00	15:00
11:00	17.879	0	0	0	17.949	0	0	0
12:00	17.818	17.936	0	0	17.857	17.906	0	0
13:00	17.730	17.848	0	0	17.791	17.844	0	0
14:00	17.673	17.844	17.967	0	17.703	17.804	17.963	0
15:00	17.598	17.774	17.906	0	17.620	17.725	17.897	0
16:00	17.541	17.721	17.879	0	17.378	17.488	17.686	0
17:00	17.488	17.668	17.853	0	17.128	17.238	17.444	0
18:00	17.462	17.642	17.800	17.919	16.899	17.005	17.224	17.963
19:00	17.277	17.457	17.594	17.699	16.754	16.864	17.084	17.945
20:00	17.101	17.277	17.413	17.514	16.754	16.860	17.079	17.919
21:00	17.000	17.180	17.317	17.418	16.534	16.640	16.855	17.664
22:00	16.921	17.101	17.238	17.334	16.297	16.403	16.614	17.365

H. entrada H. salida	Verano				Otoño			
	8:00	9:00	11:00	15:00	8:00	9:00	11:00	15:00
11:00	17.853	0	0	0	17.954	0	0	0
12:00	17.840	17.853	0	0	17.941	17.985	0	0
13:00	17.813	17.831	0	0	17.941	17.980	0	0
14:00	17.747	17.778	17.927	0	17.927	17.967	17.976	0
15:00	17.642	17.673	17.818	0	17.901	17.936	17.945	0
16:00	17.594	17.624	17.774	0	17.787	17.831	17.844	0
17:00	17.585	17.615	17.760	0	17.651	17.695	17.717	0
18:00	17.576	17.607	17.752	17.963	17.576	17.624	17.655	17.949
19:00	17.444	17.475	17.620	17.826	17.558	17.607	17.637	17.897
20:00	17.308	17.343	17.488	17.699	17.391	17.440	17.466	17.686
21:00	17.207	17.242	17.387	17.58	17.123	17.167	17.194	17.387
22:00	17.128	17.163	17.308	17.523	17.097	17.141	17.167	17.361

*Se mide en kWh

A continuación, se presenta la Tabla 9 en formato de gráfica.

SoC mínimo a la entrada – Escenario II

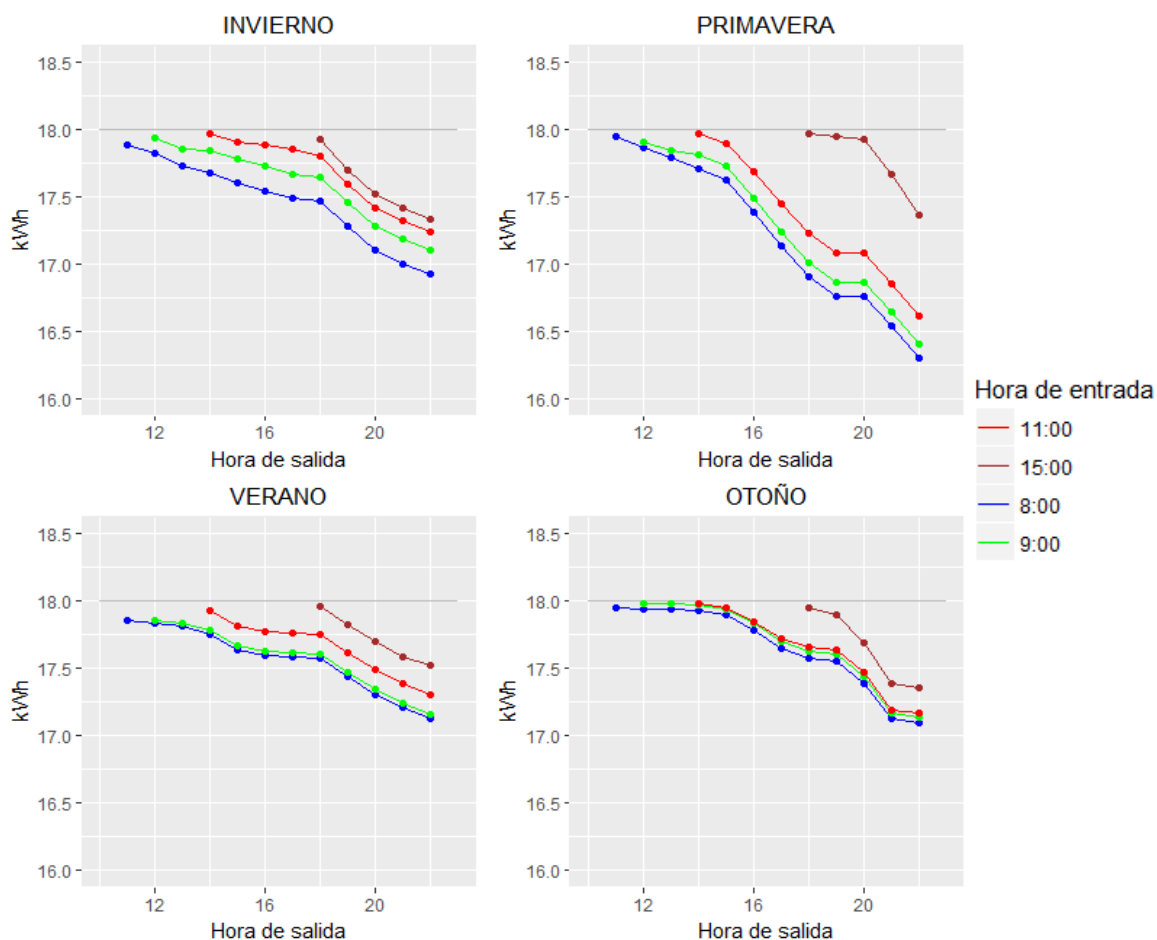


Figura 28: SoC mínimo de entrada.

En *Figura 28* sorprende la pendiente muy pronunciada, y casi idéntica de las últimas horas del día de primavera. Entre las 20:00 y las 22:00 de ese día hay una fuerte subida de precios. Es por ello que se aprovecharán esas horas para suministrar el consumo de la Escuela con la energía extra acumulada en las baterías. Estas mismas características se repiten, de manera algo menos pronunciada, en las últimas horas del día de otoño (ver *Figura 11, 12 y 13*).

Tabla 10: SoC mínimo de entrada.

H. entrada H. salida	Invierno				Primavera			
	8:00	9:00	11:00	15:00	8:00	9:00	11:00	15:00
11:00	18.000	0	0	0	18.000	0	0	0
12:00	18.000	18.000	0	0	18.000	18.000	0	0
13:00	18.000	18.000	0	0	18.000	18.000	0	0
14:00	17.976	17.976	17.976	0	18.000	18.000	18.000	0
15:00	17.971	17.971	17.971	0	18.000	18.000	18.000	0
16:00	17.963	17.963	17.963	0	18.000	18.000	18.000	0
17:00	17.963	17.963	17.963	0	18.000	18.000	18.000	0
18:00	17.884	17.884	17.884	17.919	18.000	18.000	18.000	18.000
19:00	17.659	17.659	17.659	17.699	18.000	18.000	18.000	18.000
20:00	17.479	17.479	17.479	17.514	17.958	17.958	17.958	17.958
21:00	17.378	17.378	17.378	17.418	17.695	17.695	17.695	17.695
22:00	17.299	17.299	17.299	17.334	17.396	17.396	17.396	17.396
H. entrada H. salida	Verano				Otoño			
	8:00	9:00	11:00	15:00	8:00	9:00	11:00	15:00
11:00	17.958	0	0	0	18.000	0	0	0
12:00	17.840	17.879	0	0	18.000	18.000	0	0
13:00	17.813	17.857	0	0	17.985	17.985	0	0
14:00	17.747	17.791	17.927	0	17.971	17.971	17.976	0
15:00	17.642	17.681	17.818	0	17.971	17.971	17.976	0
16:00	17.594	17.637	17.774	0	17.971	17.971	17.971	0
17:00	17.594	17.633	17.769	0	17.971	17.971	17.971	0
18:00	17.589	17.633	17.769	18.000	17.919	17.919	17.923	17.949
19:00	17.576	17.620	17.760	18.000	17.870	17.870	17.870	17.897
20:00	17.576	17.615	17.760	18.000	17.655	17.655	17.659	17.686
21:00	17.563	17.607	17.752	17.989	17.356	17.356	17.361	17.387
22:00	17.369	17.413	17.558	17.804	17.330	17.330	17.334	17.361

*Se mide en kWh

Como se observa en *Tabla 10*, en la mayoría de los casos el VE debe llegar con un SoC muy cercano a 18 kWh para que sea rentable incluirlo en el sistema. Es más, para los VE que se van en las primeras horas representadas en la tabla, el sistema no suele ser rentable (deben llegar con 18 kWh de SoC para que sea rentable que se vayan con 18 kWh de SoC), luego el gasto del sistema sin VE, si se contasen únicamente esas primeras horas, será idéntico que el del escenario IV.

El peor día para realizar el algoritmo de optimización, supuesto el escenario IV, es el de primavera, que invierte papeles con respecto al escenario II. En este día no es rentable incluir un VE en el sistema de optimización si no se va más tarde de las 19:00, aunque de nuevo sorprende el aumento en rentabilidad si se va de la Escuela en las siguientes tres horas.

Los mejores días para aplicar el algoritmo de optimización, supuesto el escenario IV, son el de invierno y el de verano. Por su parte, el día de invierno es el más rentable para los VE que se van a las últimas horas del día, mientras que el de otoño lo será para aquellos que se van entre las 11:00 y las 16:00.

Esta diferencia en rentabilidad en las primeras horas representadas entre el día de verano, que es el único rentable, y el resto de días, se debe a que el PVPC tiene forma creciente en el día de verano, mientras que tiene forma decreciente para el resto de días. Como en este escenario no se permite descargar la batería por debajo del SoC con el que llega, primero habrá que cargar las baterías cuando la energía sea barata, y descargarlas cuando sea más cara (se necesita pendiente creciente). Esto se comprueba en *Figura 22*, en la que se ve como los VE de primavera no varían su SoC hasta las últimas horas del día, mientras que los VE de verano lo hacen a todas las horas del día.

Nótese que el día de otoño es idéntico en ambos escenarios para los VE que entran a las 15:00.

A continuación, se presenta la *Tabla 10* en formato de gráfica en la *Figura 29*.

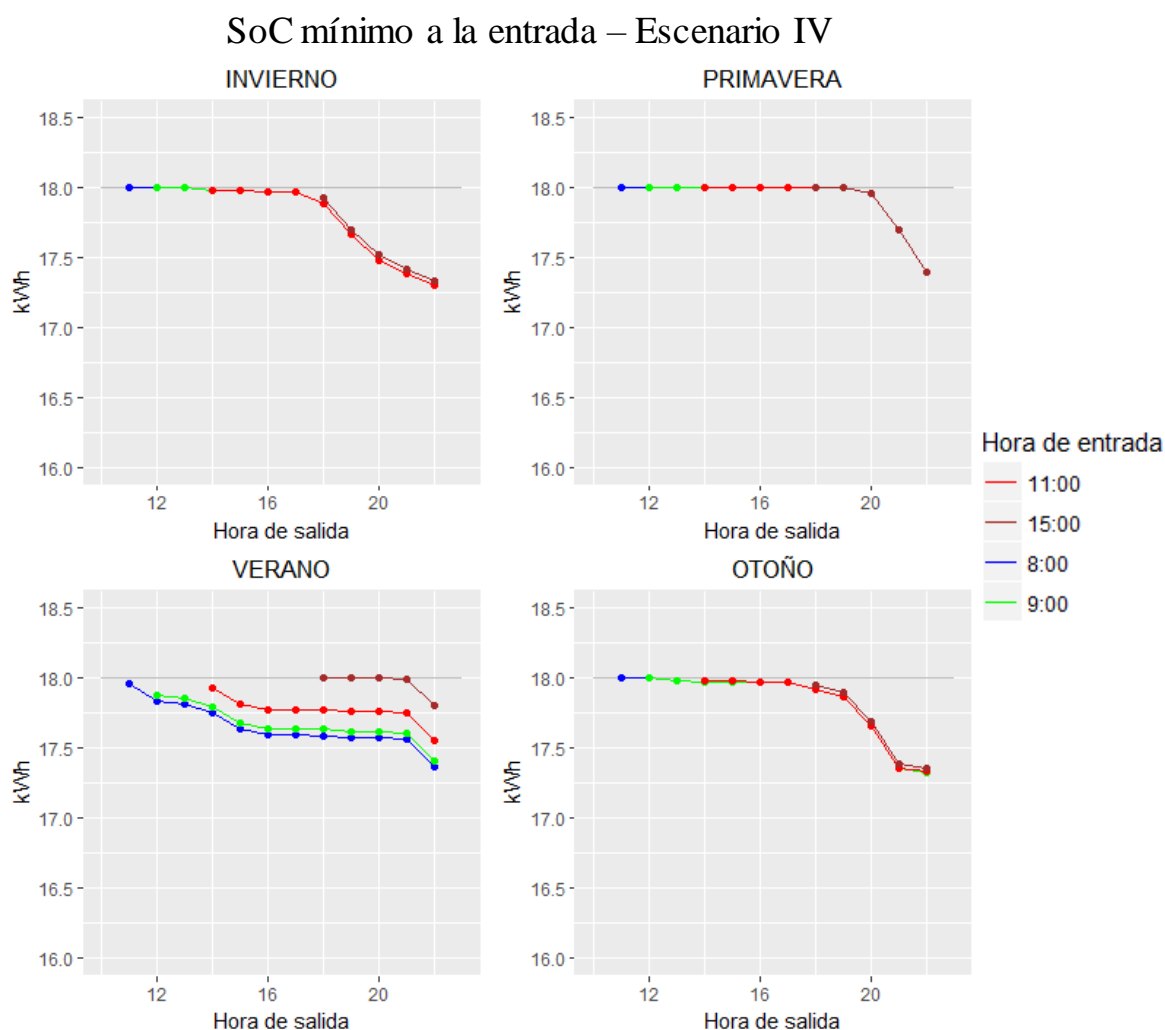


Figura 29: SoC mínimo de entrada.

Este estudio también se puede entender como la cantidad de energía que se ahorraría la Escuela aplicando el algoritmo de optimización con VE que se van con el mismo SoC con el que llegan (escenarios III y V). De esta interpretación se pueden sacar las horas más rentables del día. Por ejemplo, es mucho más rentable para el día de primavera, supuesto el escenario IV, un VE que llega a las 15:00 y se va a las 22:00, que uno que llega a las 9:00 y se va a las 16:00, a pesar de que los dos han estado el mismo número de horas en el parking de la Escuela.

A continuación, se muestra una figura con el dinero que se perdería si un VE se va antes de la hora de salida supuesta. Este estudio se ha hecho para los seis VE representados en *Figura 26*, supuesto el escenario VI.

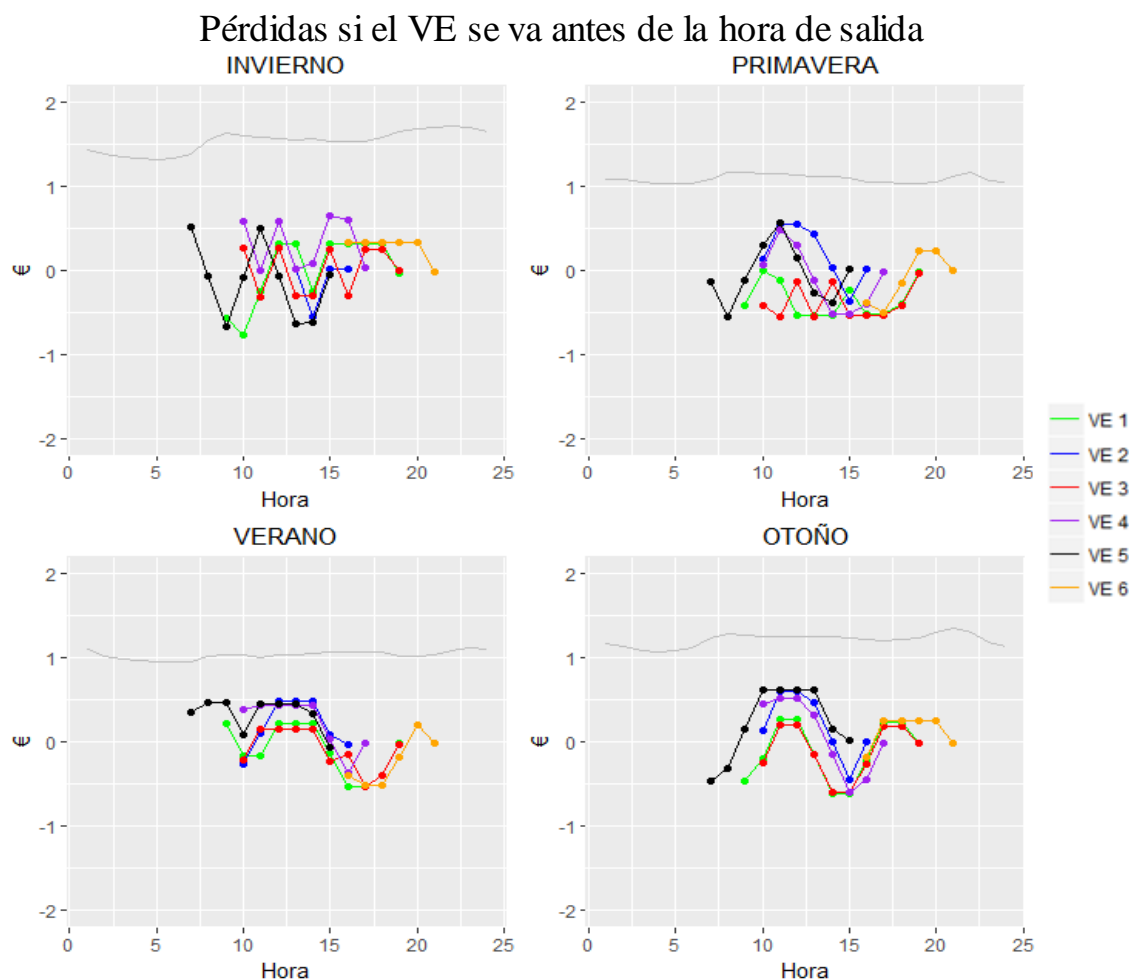


Figura 30: Pérdidas si el VE se va antes de la hora prevista

A continuación, se muestran *Tabla 11*, *12*, *13*, *14* con la información de *Figura 30*. En el eje lateral derecho se representa hora de entrada-hora de salida, y en el eje superior se representa la hora a la que realmente se iría el VE. Nótese que se muestra el dinero perdido por la Escuela, y un valor negativo significa dinero ganado.

Tabla 11: Pérdidas si el VE se va antes de la hora prevista.

		Invierno					
H. entrada H. salida		V1	V2	V3	V4	V5	V6
7:00						0.51 €	
8:00						-0.06 €	
9:00		-0.57 €				-0.67 €	
10:00		-0.78 €	0.58 €	0.27 €	0.58 €	-0.08 €	
11:00		-0.26 €	0.00 €	-0.32 €	0.00 €	0.50 €	
12:00		0.32 €	0.58 €	0.26 €	0.58 €	-0.07 €	
13:00		0.32 €	0.02 €	-0.31 €	0.01 €	-0.64 €	
14:00		-0.26 €	-0.56 €	-0.31 €	0.09 €	-0.63 €	
15:00		0.31 €	0.01 €	0.25 €	0.65 €	-0.06 €	
16:00		0.31 €	0.01 €	-0.31 €	0.59 €		0.33 €
17:00		0.31 €		0.25 €	0.02 €		0.33 €
18:00		0.31 €		0.25 €			0.33 €
19:00		-0.03 €		-0.01 €			0.33 €
20:00							0.33 €
21:00							-0.02 €

Tabla 12: Pérdidas si el VE se va antes de la hora prevista.

		Primavera					
Vehículo H. salida		V1	V2	V3	V4	V5	V6
7:00						-0.13 €	
8:00						-0.55 €	
9:00		-0.42 €				-0.12 €	
10:00		0.00 €	0.13 €	-0.42 €	0.06 €	0.30 €	
11:00		-0.13 €	0.55 €	-0.55 €	0.48 €	0.55 €	
12:00		-0.54 €	0.55 €	-0.14 €	0.29 €	0.14 €	
13:00		-0.54 €	0.43 €	-0.55 €	-0.12 €	-0.27 €	
14:00		-0.54 €	0.02 €	-0.14 €	-0.53 €	-0.38 €	
15:00		-0.25 €	-0.38 €	-0.54 €	-0.53 €	0.02 €	
16:00		-0.53 €	0.01 €	-0.54 €	-0.40 €		-0.38 €
17:00		-0.53 €		-0.54 €	-0.02 €		-0.50 €
18:00		-0.40 €		-0.42 €			-0.16 €
19:00		-0.02 €		-0.04 €			0.22 €
20:00							0.22 €
21:00							-0.01 €

Tabla 13: Pérdidas si el VE se va antes de la hora prevista.

Vehículo H. salida	Verano					
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
7:00					0.35 €	
8:00					0.46 €	
9:00	0.22 €				0.46 €	
10:00	-0.16 €	-0.27 €	-0.21 €	0.38 €	0.08 €	
11:00	-0.16 €	0.10 €	0.16 €	0.43 €	0.45 €	
12:00	0.22 €	0.48 €	0.16 €	0.43 €	0.45 €	
13:00	0.22 €	0.48 €	0.16 €	0.43 €	0.45 €	
14:00	0.22 €	0.48 €	0.16 €	0.43 €	0.34 €	
15:00	-0.13 €	0.09 €	-0.24 €	0.04 €	-0.06 €	
16:00	-0.53 €	-0.02 €	-0.14 €	-0.36 €		-0.40 €
17:00	-0.53 €		-0.53 €	-0.01 €		-0.51 €
18:00	-0.40 €		-0.40 €			-0.51 €
19:00	-0.02 €		-0.03 €			-0.18 €
20:00						0.20 €
21:00						-0.01 €

Tabla 14: Pérdidas si el VE se va antes de la hora prevista.

Vehículo H. salida	Otoño					
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
7:00					-0.46 €	
8:00					-0.31 €	
9:00	-0.47 €				0.15 €	
10:00	-0.19 €	0.14 €	-0.25 €	0.46 €	0.61 €	
11:00	0.27 €	0.60 €	0.21 €	0.52 €	0.61 €	
12:00	0.27 €	0.60 €	0.21 €	0.52 €	0.61 €	
13:00	-0.15 €	0.47 €	-0.14 €	0.32 €	0.61 €	
14:00	-0.61 €	0.01 €	-0.60 €	-0.14 €	0.15 €	
15:00	-0.61 €	-0.45 €	-0.60 €	-0.60 €	0.03 €	
16:00	-0.21 €	0.00 €	-0.26 €	-0.45 €		-0.18 €
17:00	0.24 €		0.18 €	-0.01 €		0.26 €
18:00	0.24 €		0.18 €			0.26 €
19:00	-0.02 €		-0.02 €			0.26 €
20:00						0.26 €
21:00						-0.02 €

Como se observa, dependiendo de la hora en la que se retire el VE, la Escuela puede ganar dinero o perderlo. Esto se debe a que, si se tiene planeado cargar el VE en las horas posteriores a la retirada del mismo, la Escuela estará “ahorrándose” esta energía que iba a utilizar para cargarlo. Del mismo modo pasa si tenía pensado descargar la batería en las horas posteriores a la retirada del VE, caso en el que la Escuela estaría perdiendo ese dinero.

Nótese que también se ha representado el dinero que se gana o pierde en la hora de salida prefijada. En este escenario los VE se iban de la Escuela con 0.1 kWh extra con respecto al SoC con el que llegaron. Se observa como hay VE con los que el sistema, a pesar de tener ganancias al final del día, perderá dinero. De todos modos, la suma de las ganancias finales de todos los VE dará positiva en todas las estaciones.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha hecho un estudio detallado de seis escenarios que se adaptan a la situación concreta de algunos edificios del sector terciario, para los que se puede implementar este tipo de algoritmos de optimización basados en el uso de VE para almacenar energía. El objetivo era ver las ventajas y desventajas de cada uno de los escenarios, y comparar los resultados para días laborales de las cuatro estaciones.

De los seis escenarios, el peor para la Escuela, es el escenario sin optimización alguna (escenario I). La única ventaja de este escenario es la garantía de un SoC mayor o igual al SoC con el que llega el VE a la Escuela en cualquier momento y, en caso de que pase el tiempo suficiente, igual al SoC garantizado de 18 kWh que daría una autonomía de más de 100 km. Este escenario únicamente ha servido como base para la comparación del resto de escenarios y, por lo general, es una mala decisión aplicarlo.

En los escenarios II, III, IV y V se ha querido estudiar cómo afecta el límite inferior de descarga permitido. Se ha observado como el precio de la energía es lo que más afecta a este límite y, mientras que un precio decreciente en el tiempo es bueno para los escenarios en los que se permite descargar la batería del VE por debajo del SoC con el que llega, será necesario un precio con una forma creciente en el tiempo (al menos en el momento inicial) para los escenarios en los que el SoC de llegada sea el límite inferior de descarga máxima.

En los escenarios II y III se ha supuesto la libre disposición de la batería del VE, siendo 4.8 kWh el límite inferior de SoC de la batería. Se ha querido dividir el estudio en un SoC mínimo garantizado a la salida (escenario II) y un SoC igual al SoC con el que el VE llegó a la Escuela (escenario III), para ver cómo afectan esa energía extra que se debe suministrar. Como se esperaba, este tipo de escenarios han resultado ser los más rentables para la Escuela, obteniendo el mayor ahorro de todo el estudio en el escenario III (2.8% de ahorro en el gasto total). Sorprenden los resultados del estudio pues, a pesar de ser el mejor tipo de escenarios, no se ha conseguido ahorrar dinero con respecto al escenario sin VE al garantizar un SoC mínimo a la salida de 18 kWh (escenario II). Este tipo de escenarios no son buenos para un edificio en el que no haya un horario de entrada y de salida muy estricto, ya que si el propietario retirase el VE antes de tiempo podría haberse descargado mucho con respecto al SoC con el que llegó. Al mismo tiempo, al no haber un sistema de retribución al propietario del VE a base de energía “gratuita”, sería necesario un sistema con otro tipo de ventajas (coche de empresa, parking gratuito, etc.), y por lo tanto no son un buen tipo de escenarios para aplicar en la Escuela.

Debido a la limitación de un horario muy estricto, y en contraposición a los escenarios II y III, se ha hecho un estudio de un escenario en el que se retire el VE en el momento en que se retire, nunca tenga un SoC inferior al SoC con el que llegó a la Escuela. Este es el caso de los escenarios IV y V, que a su vez se han dividido en un SoC mínimo garantizado a la salida (escenario IV) y un SoC igual al SoC con el que el VE llegó a la Escuela (escenario V), para ver cómo afecta esa energía extra que se debe suministrar. Como se ha visto en el estudio, el problema de este tipo de escenarios es la necesidad de un precio de la energía con una forma creciente en el tiempo, debido a la obligatoriedad de cargar primero el VE antes que descargarlo. Se ha comprobado que esta condición solo se cumple en algunos momentos del día, para el PVPC, habiendo días en los que el precio de la energía tiene forma decreciente prácticamente todo el tiempo, días en los que prácticamente no hay margen para la optimización. Solo es rentable para la Escuela el escenario V (ahorro de 1.4%), siendo el escenario IV un escenario bastante malo que se aproxima bastante en gasto al escenario sin algoritmos de optimización (gasto de 3.6% del escenario IV frente a 4.6% del escenario VI). Como resultado, este tipo de escenarios son muy conservadores para los propietarios de los VE, mientras que son bastante malos para la Escuela, obteniendo ganancias (en el escenario V) únicamente en el caso en que se cumplan los horarios de entrada y de salida de manera bastante estricta. Este tipo de escenarios no son buenos para aplicar en la Escuela, pero se podrían aplicar en lugares en los que el VE vaya a estar aparcado una gran cantidad de tiempo (varios días), y se tenga un gran margen temporal para

variar el SoC de la batería, como pueden ser los parkings de larga estancia de los aeropuertos o estaciones de ferrocarril.

Uniendo características de los anteriores escenarios se ha llegado al mejor modelo para aplicar en la Escuela, el escenario VI. El margen en el que se puede variar el SoC de la batería de ± 4.8 kWh con respecto al SoC con el que el VE llega a la Escuela es bueno tanto para el propietario del VE como para la Escuela. Es bueno para el propietario pues, si debe retirar el VE antes de tiempo, la batería nunca se habrá descargado por debajo de ese límite establecido que, como se ha comprobado, es un margen más que suficiente para que la mayoría de VE puedan hacer el viaje de vuelta. El límite superior es bueno para la Escuela pues nunca perderá mucha energía en el caso en que se retire el VE antes de tiempo. Además, la posibilidad de descargar la batería por debajo del SoC con el que llega el VE a la Escuela, permite aplicar los algoritmos de optimización tanto si la curva del precio de la energía en el tiempo tiene forma creciente al principio, como si tiene forma decreciente. Como resultado, este escenario supone un beneficio tanto para el propietario del VE, que obtiene 0.1 kWh de carga de la batería extra cuando retira el VE, como para la Escuela, que obtiene un ahorro de 1.5% con respecto al gasto energético en el escenario sin VE. Es por ello que este escenario es el que mejor se adaptaría a la Escuela, un edificio del sector terciario con horarios dinámicos, y una gran afluencia de vehículos.

Adicionalmente, y como consecuencia de los escenarios en los que se garantizaba un SoC mínimo a la salida, se ha estudiado el SoC mínimo inicial con el que es rentable aplicar el algoritmo de carga/descarga de dichos escenarios (escenarios II y IV). Esta parte del estudio ha permitido mostrar, en términos energéticos, cuánto aporta un VE al sistema y que en los horarios en los que se saca más partido a los VE suelen ser los que incluyen las últimas horas de la tarde, momento en el que el precio de la energía suele incrementarse de manera pronunciada.

Finalmente, al depender el estudio de unos horarios de entrada y salida estables, que por lo general se suelen dar en este tipo de edificios del sector terciario, se ha querido estudiar las consecuencias de que un VE sea retirado antes de tiempo. Se ha observado como hay ciertos casos en los que es beneficioso para la Escuela que se retire el VE antes de tiempo, y casos en los que no (cuando se retira con un SoC mucho mayor al SoC con el que ha llegado). También se ha comprobado cómo, a pesar del ahorro en el escenario VI con respecto al escenario sin VE, no todos los vehículos son rentables para el sistema, registrando pérdidas en algunos casos.

Hay numerosas variantes de este tipo de arquitecturas, y se pueden aplicar para ahorrar en el gasto energético, servir como apoyo a la producción fotovoltaica, servir como servicio complementario para los usuarios e, incluso, se podrían utilizar para bajar el término de potencia y abastecerse de la energía almacenada en los VE en los momentos en los que se sobrepase el mismo. Como conclusión, el escenario perfecto será aquel que adapta los mecanismos de optimización a la situación concreta de cada edificio del sector terciario.

5.2 LÍNEAS FUTURAS

Uno de los principales objetivos de este trabajo es servir como base a partir de la cual realizar el modelado de un sistema inteligente de gestión de la energía almacenada en los VE aparcados en un edificio del sector terciario. Con los datos expuestos se podrá modelar dicho sistema y adaptarlo en función del mejor escenario para la situación concreta del edificio de estudio.

Adicionalmente, algunos de los escenarios que se han estudiado se podrán aplicar a sistemas de gestión de otros lugares, como hogares particulares o puestos de carga fijos, y diseñar el sistema inteligente optimizado para esa situación concreta.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] Datos energéticos Europa

<http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.aspx>

[2] Baterías del sector solar

SonnenBatterie <https://sonnenbatterie.de/en-us/start>

LG Resu <https://www.bornay.com/es/productos/baterias/lg-chem-resu>

SolarWatt MyReserve <https://www.solarwatt.de/komponenten/stromspeicher/myreserve-500>

Victron Tower <https://www.victronenergy.com.es/accessories/li-ion-battery-tower>

Tesvolt <http://www.tesvolt.com/lithium-batteries.html>

[3] Baterías del sector del automóvil

Powerball de Tesla https://www.tesla.com/en_EU/powerwall?redirect=no

Nissan Xstorage <https://www.nissan.es/experiencia-nissan/vehiculo-electrico-liderazgo/xstorage-de-nissan.html>

Mercedes-Benz <https://www.accumotive.de/en/news/daimler-delivers/>

[4] Compensación del precio del VE y de las baterías.

<http://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/electrifying-insights-how-automakers-can-drive-electrified-vehicle-sales-and-profitability>

[5] Ventas vehículos eléctricos en España 2015-2017

<http://movilidadelectrica.com/ventas-vehiculos-electricos-enero-2017/>

[6] Autonomía de vehículos eléctricos

<http://www.autobild.es/reportajes/los-diez-coches-electricos-con-mas-autonomia-mercado-222905>

[7] Tasa de ocupación de un VE

<http://usa.streetsblog.org/2016/03/10/its-true-the-typical-car-is-parked-95-percent-of-the-time/>

[8] Datos de consumo y producción de la Escuela

<http://monitoring.robolabo.etsit.upm.es/etsit/monitoring.php>

[9] Datos de los coches eléctricos más vendidos de España:

www.motor.es

<https://www.motor.es/noticias/coches-electricos-mas-vendidos-2016-espana-201732974.html>

[10] Nivel de confianza y margen de error de la muestra

<http://www.mey.cl/html/samplesize.html>

[11] Datos de consumo de los distintos modelos de coche:

www.spritmonitor.com

[12] Datos históricos de tiempo en Madrid

<http://www.meteoclimatic.net/mapinfo/ESMAD?d=20161018>

[13] Datos de la capacidad de los distintos modelos de VE

www.electromaps.com

[14] Recarga rápida del Nissan Leaf

<https://www.conducetuciudad.com/es/vehiculos/coches-electricos/recarga-nissan-leaf>

[15] Datos precio energía

https://www.esios.ree.es/es/analisis/1013?vis=1&start_date=01-01-2016T00%3A00&end_date=31-05-2017T23%3A50&compare_start_date=31-12-2015T00%3A00&groupby=hour

7 ANEXOS

7.1 ANEXO I – ANÁLISIS DE LA ENCUESTA

En este anexo se hará un análisis de las respuestas de la última parte de la encuesta, en la que los encuestados respondían preguntas sobre su conocimiento de este tipo de tecnologías. Adicionalmente, se mostrará un análisis conjunto de toda la encuesta y de la movilidad, en función de las características de los encuestados.

Las respuestas que dieron a las preguntas de la tercera parte son las siguientes.

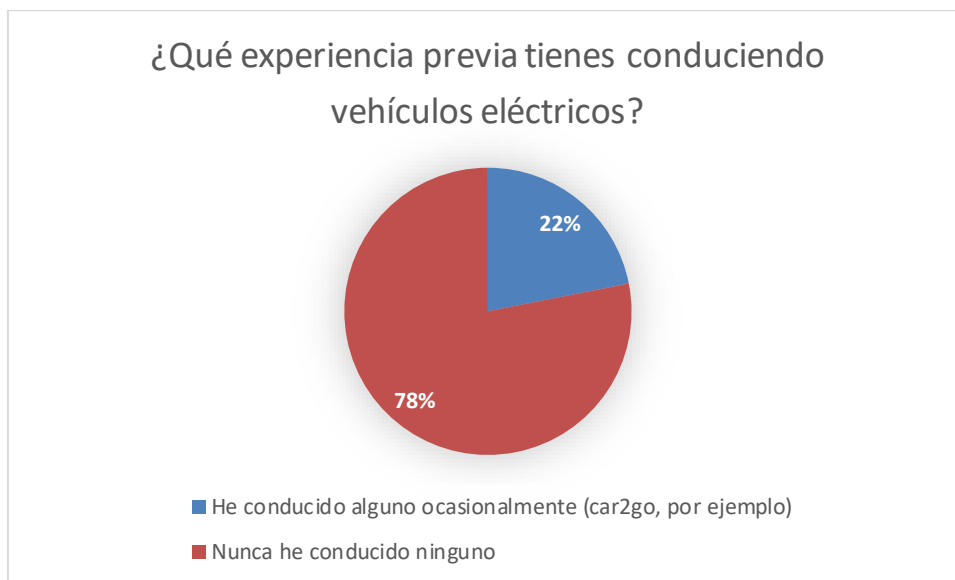


Figura-anexo 1

Un 22% de los encuestados habían tenido experiencia previa con VE en el momento en que respondieron a la encuesta. Teniendo en cuenta los datos de ventas de VE en España [9] sorprende esta cifra.

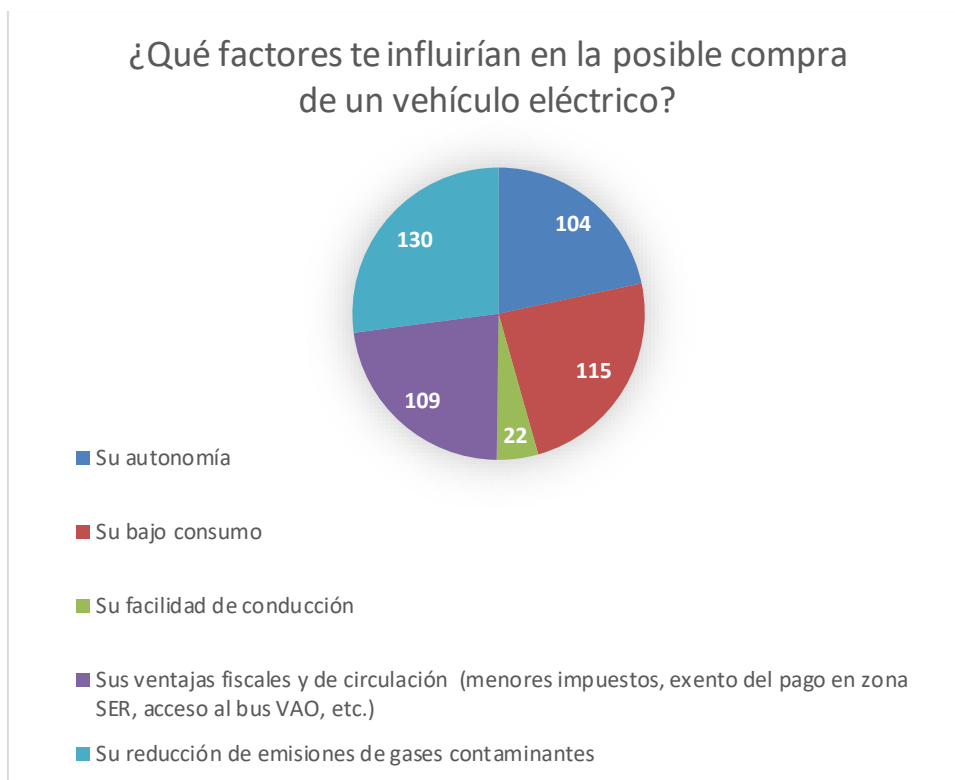


Figura-anexo 2

En esta pregunta se permitía contestar más de una respuesta. Casi se da la misma importancia al bajo consumo, a las ventajas fiscales y a la autonomía, que será un inconveniente a la hora de cambiar a VE. Para la mayor parte de los encuestados, el factor más importante es la reducción de gases contaminantes.

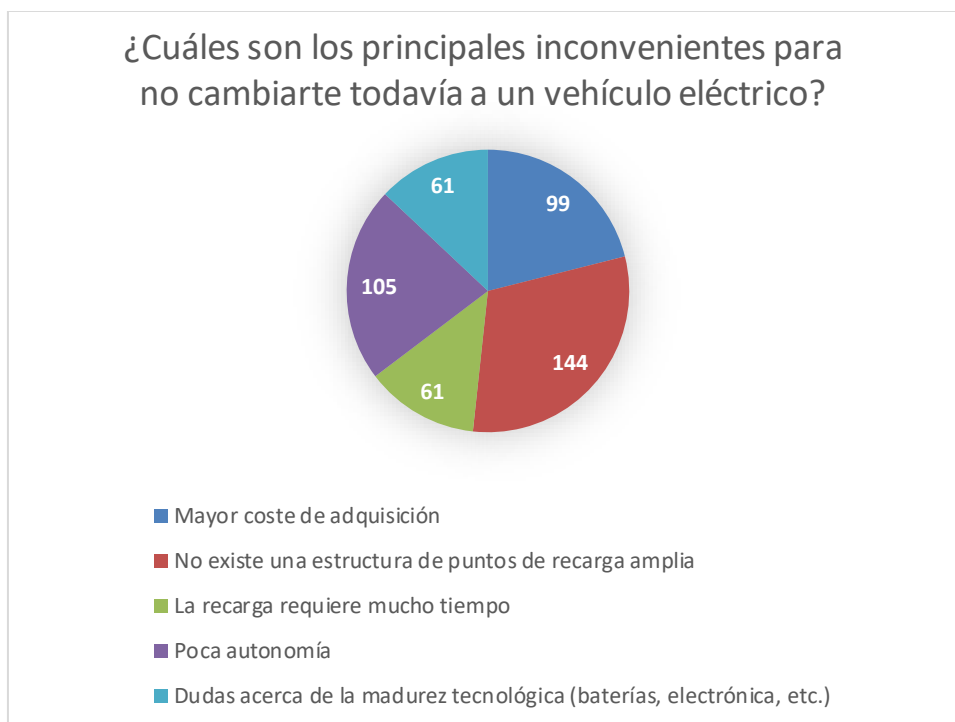


Figura-anexo 3

Al igual que en la anterior pregunta, los encuestados podían responder más de una respuesta. En torno a un tercio de los encuestados ven como inconveniente la madurez tecnológica y el tiempo de recarga, que, a pesar de los cargadores a altas potencias, sigue siendo excesivo. El mayor coste de

adquisición y la autonomía son un problema para tres quintos de los encuestados. A pesar de que la autonomía de los VE no permite recorrer largas distancias, como se ha visto, suele ser suficiente para los desplazamientos diarios, y en algunos escenarios se garantizaba un SoC a la salida de 18 kWh que permite recorrer más de 100 km para hacer el viaje de vuelta. Por último, el mayor inconveniente para los encuestados es la falta de una estructura de puntos de recarga amplia.

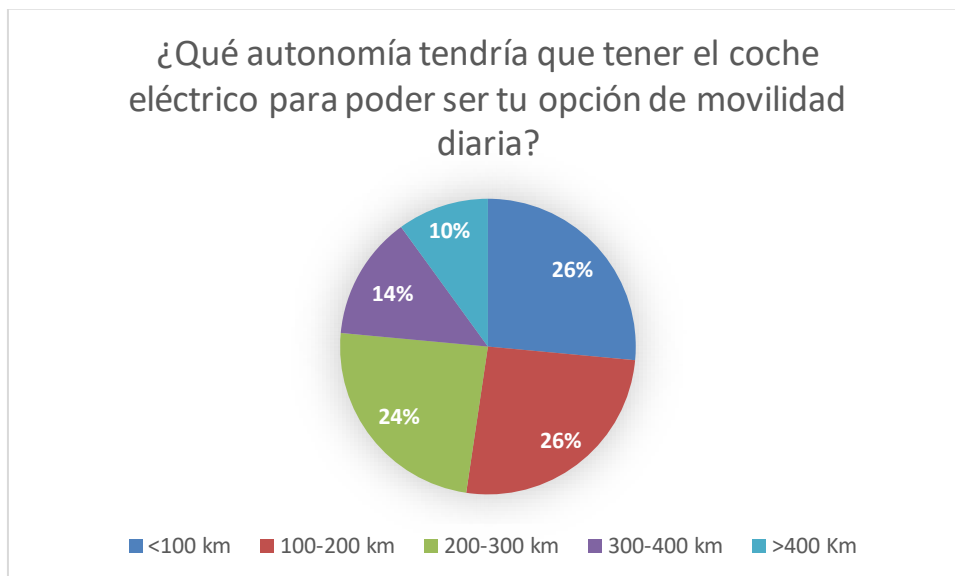


Figura-anexo 4

Para un 26% de los encuestados, el VE podría tener una autonomía de menos de 100 km. Para un 26% debería tener entre 100-200 km, lo que permitiría cubrir los desplazamientos diarios de la mayor parte de los encuestados. Para un 24% debería tener entre 200-300 km de autonomía, para un 14% debería tener entre 300-400 km de autonomía, y un 10% de los encuestados exigiría más de 400 km de autonomía.

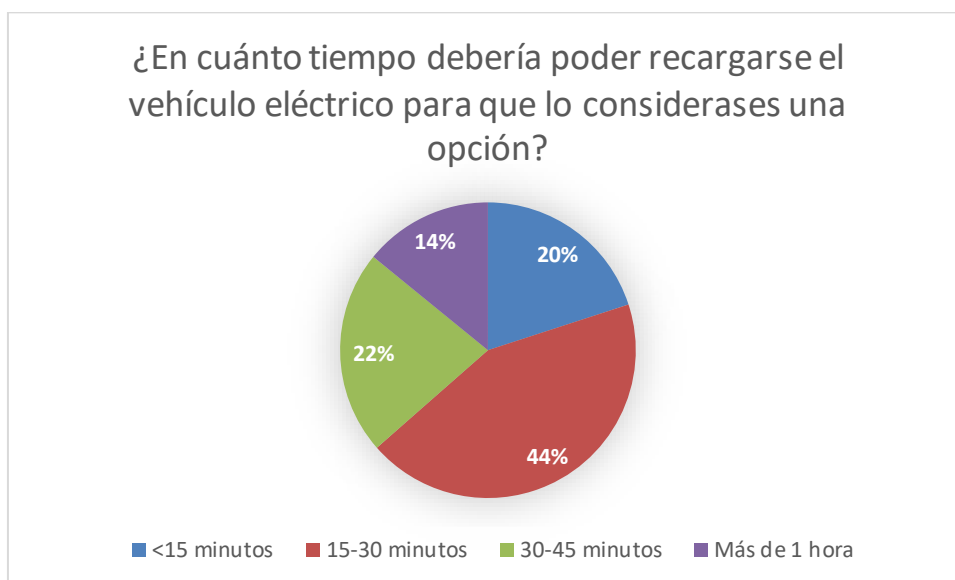


Figura-anexo 5

En *Figura-anexo 3* se puede ver como el tiempo de recarga era un inconveniente para algo más de un tercio de los encuestados. Un 14% de los encuestados ve favorable un tiempo de recarga superior a 1 hora y un 22% ve favorable un tiempo de recarga de entre 30 y 45 minutos. Un 44% vería favorable un tiempo de entre 15 y 30 minutos, y un 20% exigiría un tiempo de recarga menor de 15 minutos. Estos valores están lejos del tiempo de recarga de una toma común, pero están surgiendo cargadores de alta velocidad que empiezan a estrechar los periodos de recarga [14], al menos hasta recargar un 80% de la capacidad de la batería.

Las respuestas a las dos preguntas anteriores se pueden deber a que, a la hora de hacer un viaje largo, es poco deseado una autonomía baja, unido a un tiempo de recarga alto. Actualmente los VE permiten cubrir la movilidad diaria de la mayoría de las personas, pero, en comparación a los vehículos de combustión interna, no permiten cubrir largas distancias.

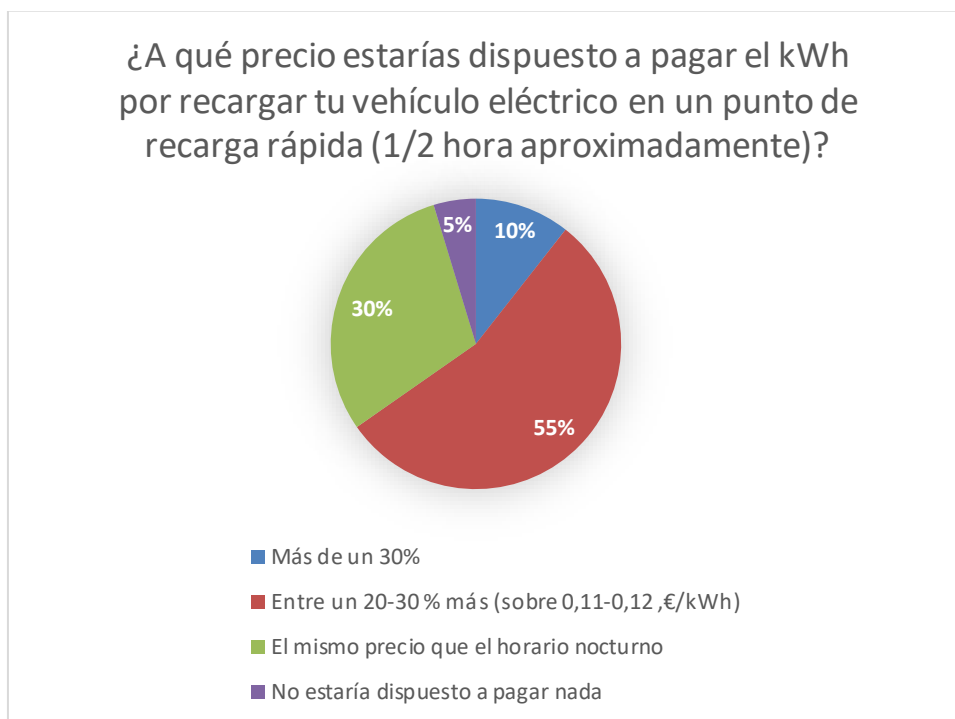


Figura-anexo 6

Únicamente un 5% de los encuestados no estaría dispuesto a pagar nada por el kWh de un punto de recarga rápida. Un 30% pagaría el mismo precio que en horario nocturno, un 55% pagaría entre un 20% y un 30% más, y un 10 % pagaría más de un 30% con respecto al horario nocturno. Nótese que, a pesar de la reticencia de algunos encuestados a pagar más por el kWh, el precio por km recorrido suele ser mucho menor en un VE que en un vehículo de combustión interna.

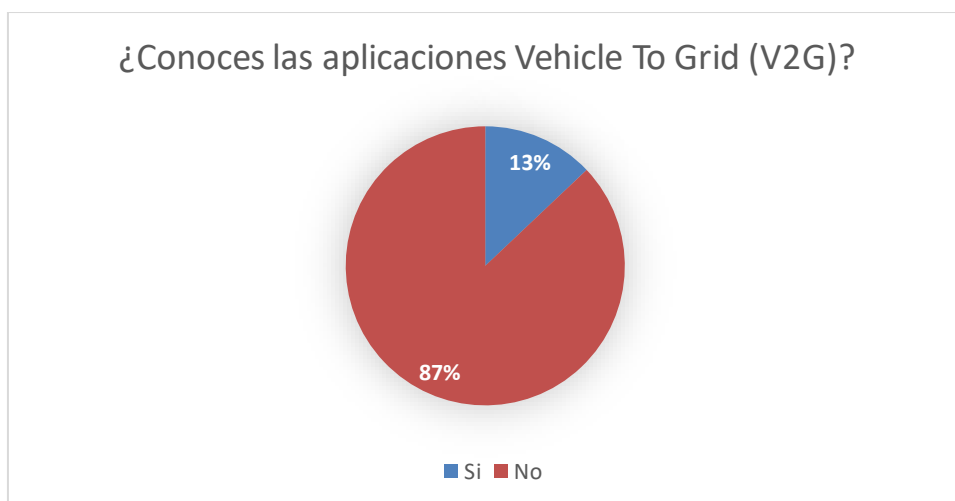


Figura-anexo 7

Únicamente un 13% de los encuestados conoce las aplicaciones Vehicle To Grid (V2G).

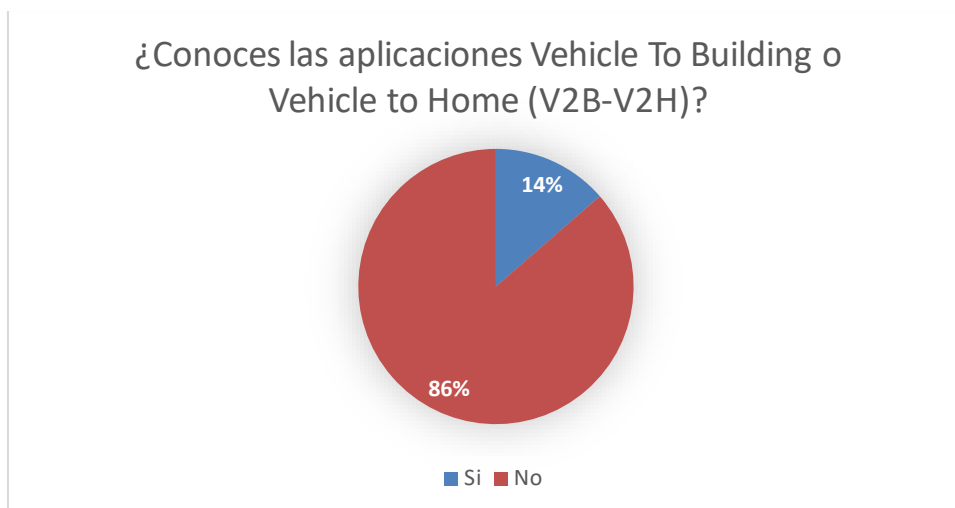


Figura-anexo 8

Únicamente un 14% de los encuestados conoce las aplicaciones Vehicle To Building o Vehicle To Home (V2B y V2H). Es una proporción muy parecida a aquellos que conocen las aplicaciones V2G (ver Figura-anexo 7).

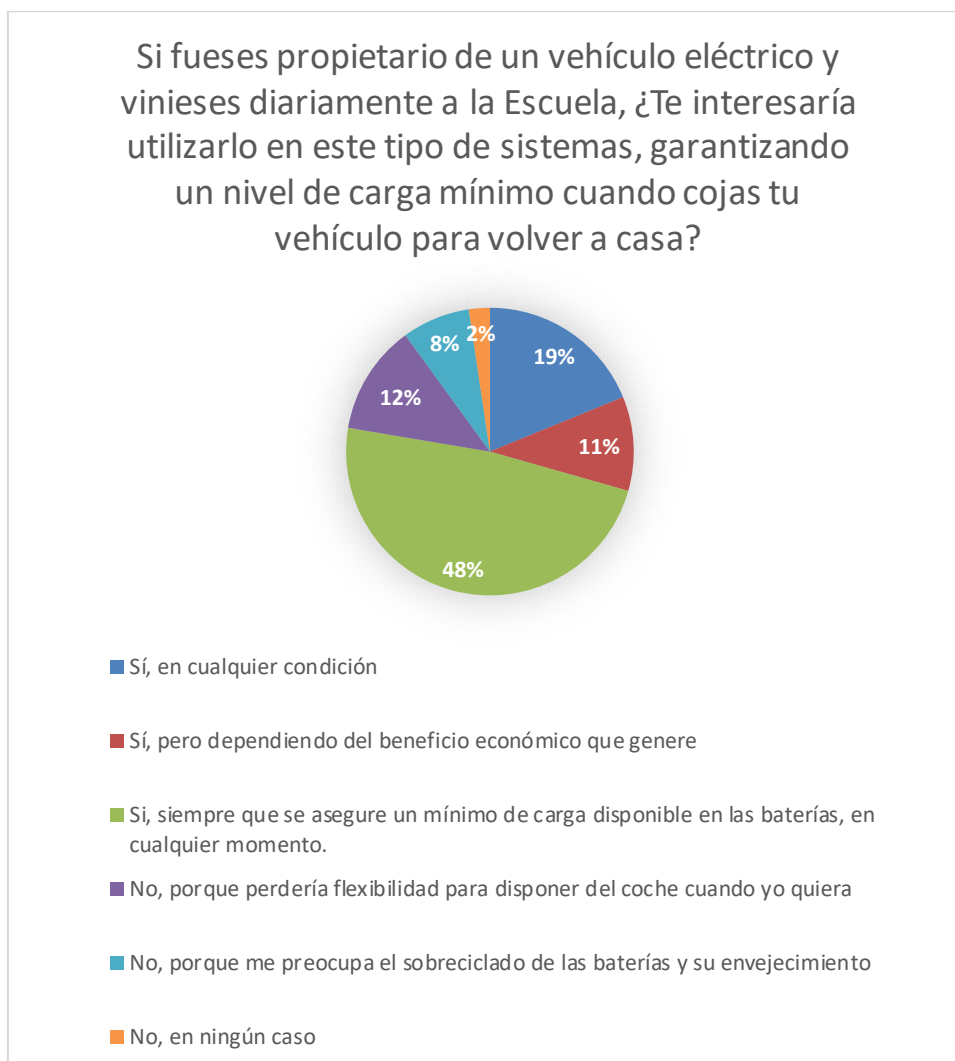


Figura-anexo 9

Después de las anteriores preguntas se explicaba brevemente en la encuesta las arquitecturas V2B, V2H y V2B. Un 19% de los encuestados utilizaría los sistemas V2G (V2B y V2H) en cualquier

condición. Esto se adaptaría a los escenarios III y V. Un 11% los utilizaría si obtienen un cierto beneficio económico, lo que se adaptaría al escenario VI. Un 48% los utilizaría en caso de que se asegurase un mínimo de carga en cualquier momento, a lo que se adaptan los escenarios IV, V y VI, y en menor medida, los escenarios II y III con los 4.8 kWh de SoC mínimos. Un 12 % de los encuestados ha respondido que no los utilizaría debido a la pérdida de flexibilidad. Los escenarios IV y V contemplan esta pérdida de flexibilidad no descargando nunca por debajo del SoC con el que llegaron los VE a la Escuela. Un 8% de los encuestados ha respondido negativamente a la pregunta debido al sobreciclado de las baterías y un 2% de los encuestados ha respondido que en ningún caso utilizaría este tipo de aplicaciones. Nótese que los escenarios propuestos contemplan a un 90% de los encuestados.

A continuación, se hará un análisis de la movilidad en función de las características y condiciones de los encuestados.

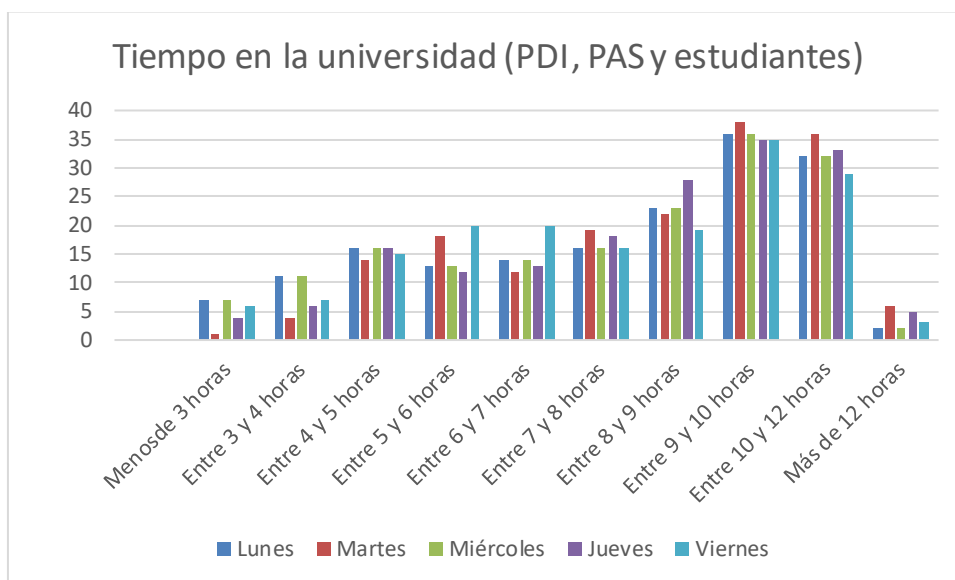


Figura-anexo 10

En Figura-anexo 10 se puede observar el tiempo de estancia en la universidad total (PDI + PAS + Estudiante) por número de personas. Se observa como el lunes hay más gente que está menos de 5 horas que el resto de días de la semana, principalmente debido a que es el día en que se realizan las pruebas de evaluación intermedia. En Figura 8 se puede observar la media por día.

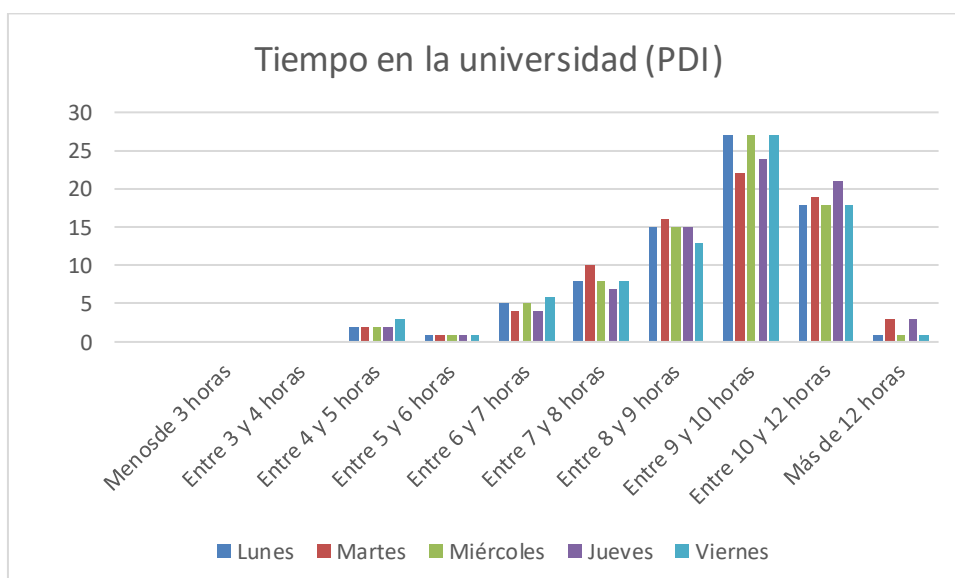


Figura-anexo 11

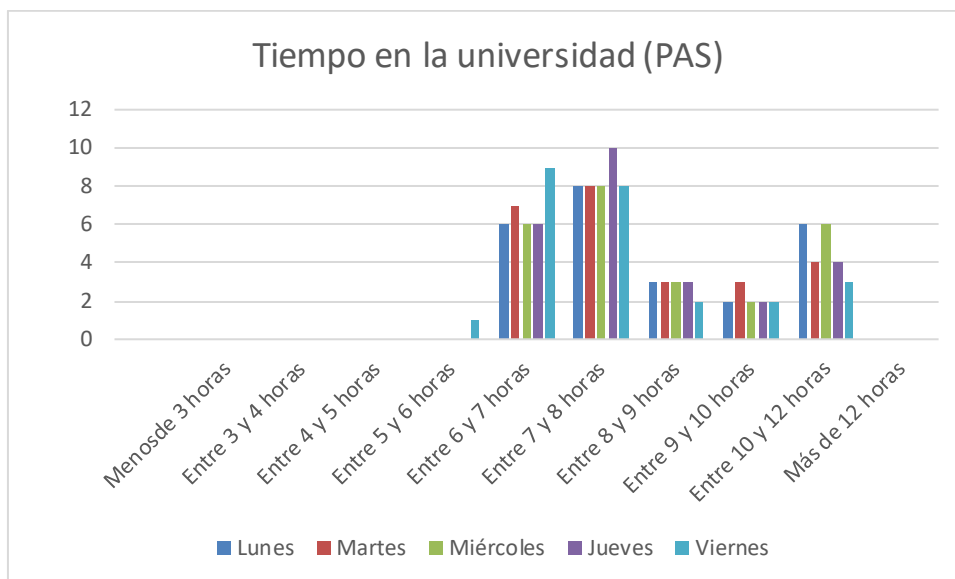


Figura-anexo 12

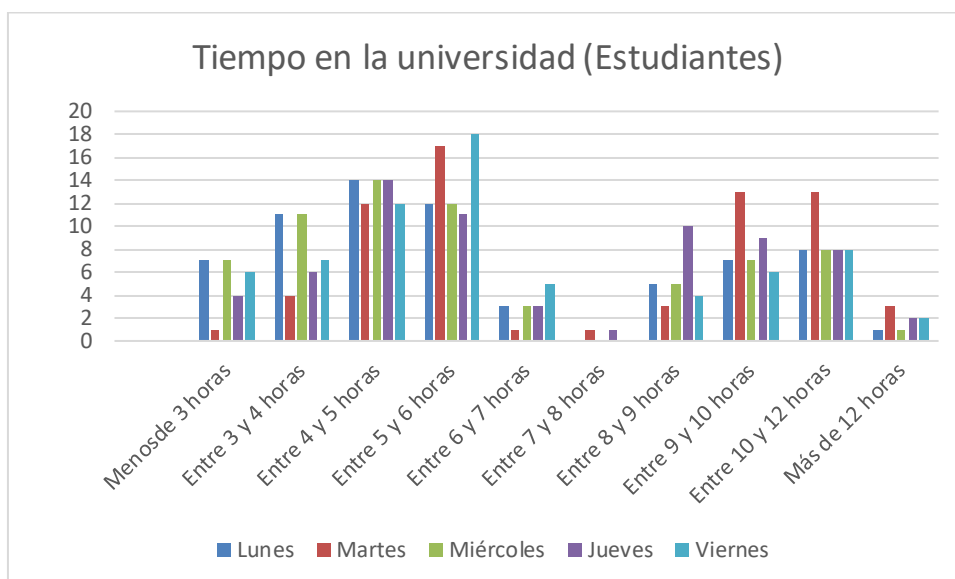


Figura-anexo 13

En Figura-anexo 11, 12, 13 se muestran los tiempos de estancia en la universidad de cada uno de los tres grupos. Como era de esperar los que tienen un horario más estable son el grupo PAS. El grupo PDI tiene un horario algo menos estable a lo largo de la semana que PAS, pero permanecen en la universidad más tiempo que los estudiantes. Por su parte, los estudiantes son el grupo que pasa menos tiempo en la universidad, y hay más dispersión de valores. Se pueden distinguir dos grupos de estudiantes, los que solo están por la mañana o por la tarde, y los que están todo el día, aunque la mayoría de estudiantes pertenecen a ambos grupos, variando en función del día de la semana (depende de las clases y laboratorios).

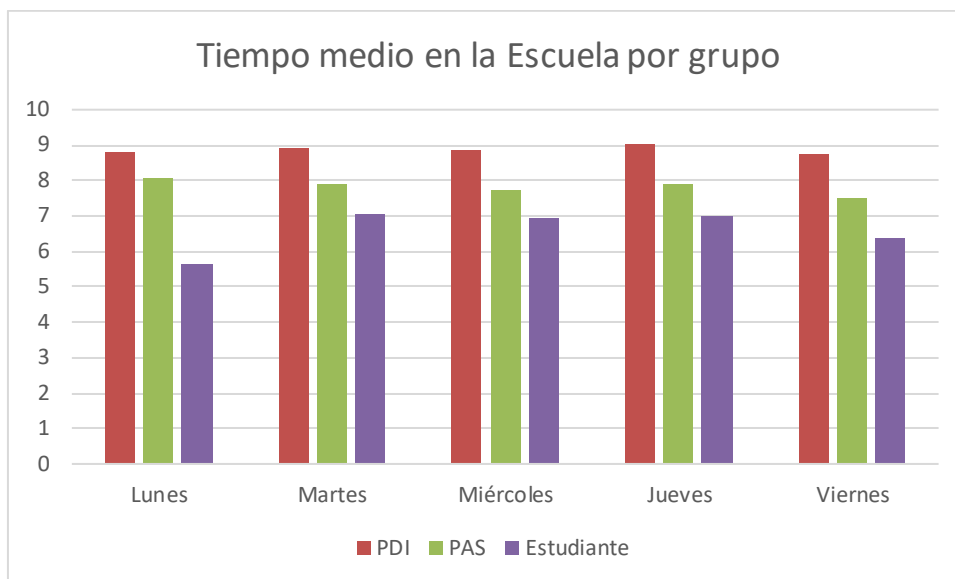


Figura-anexo 14

En *Figura-anexo 14* se muestra el tiempo medio de permanencia en la Escuela por día. Por lo general es bastante estable, habiendo un pequeño descenso el viernes. El grupo de estudiantes permanece en torno a una hora y media menos el lunes. Esto se debe a que es el día de evaluación.

A continuación, se dividirán por grupos algunas de las preguntas de la tercera parte de la encuesta.

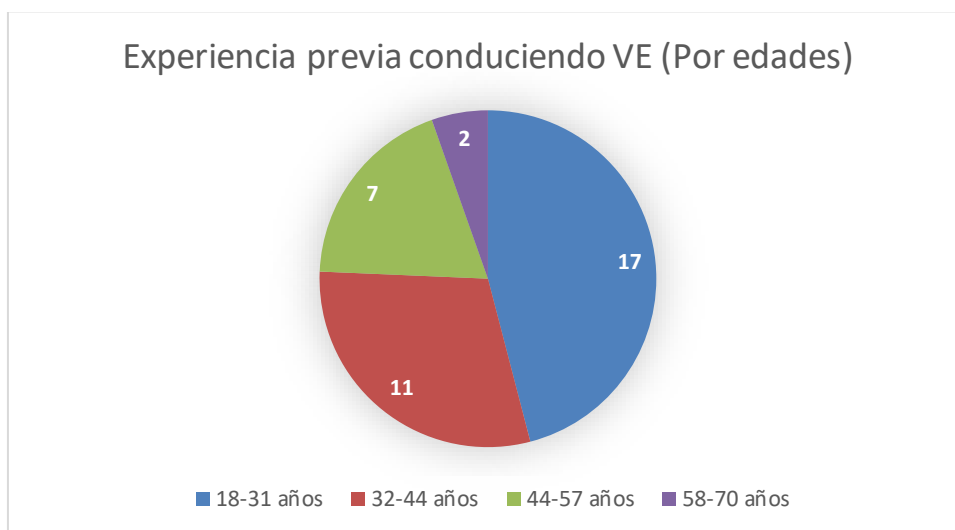


Figura-anexo 15

En *Figura-anexo 15* sorprende que hay el doble de personas con edades comprendidas entre 18-31 años, que entre 32-44. La mayor experiencia previa conduciendo VE de los más jóvenes se puede deber a alternativas como Car2Go y Emov.

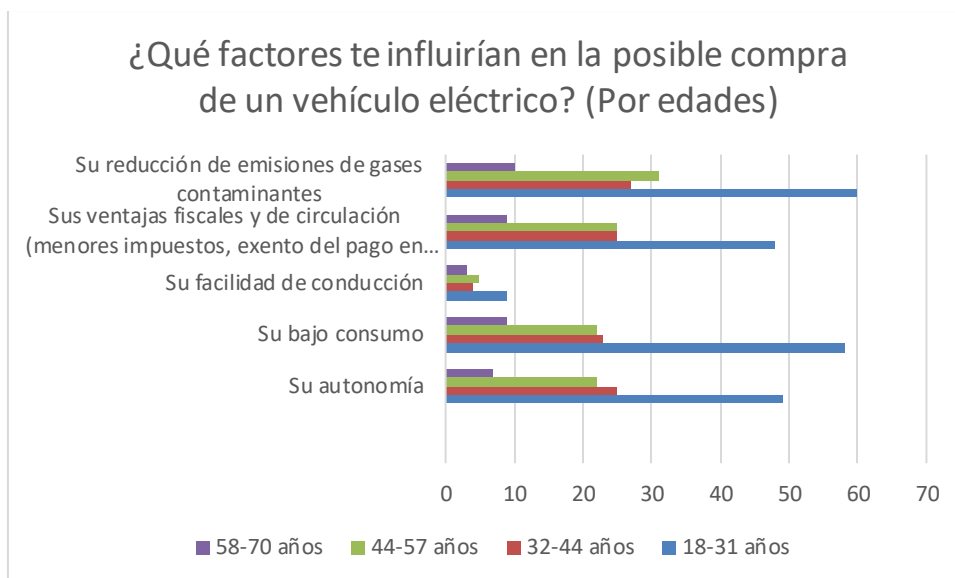


Figura-anexo 16

En *Figura-anexo 16* se muestran las respuestas a la pregunta “¿Qué factores te influirían en la posible compra de un vehículo eléctrico?” por grupos. No hay grandes diferencias entre edades.

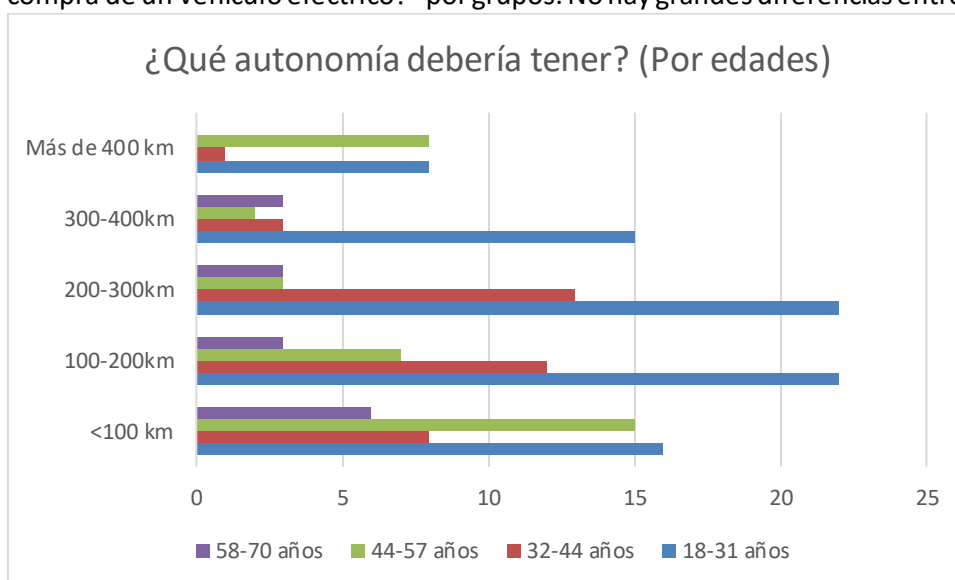


Figura-anexo 17

En *Figura-anexo 17* se muestra la autonomía que los encuestados creen que debería tener el VE, dividido por edades. Por lo general los más jóvenes desean unas autonomías mayores.

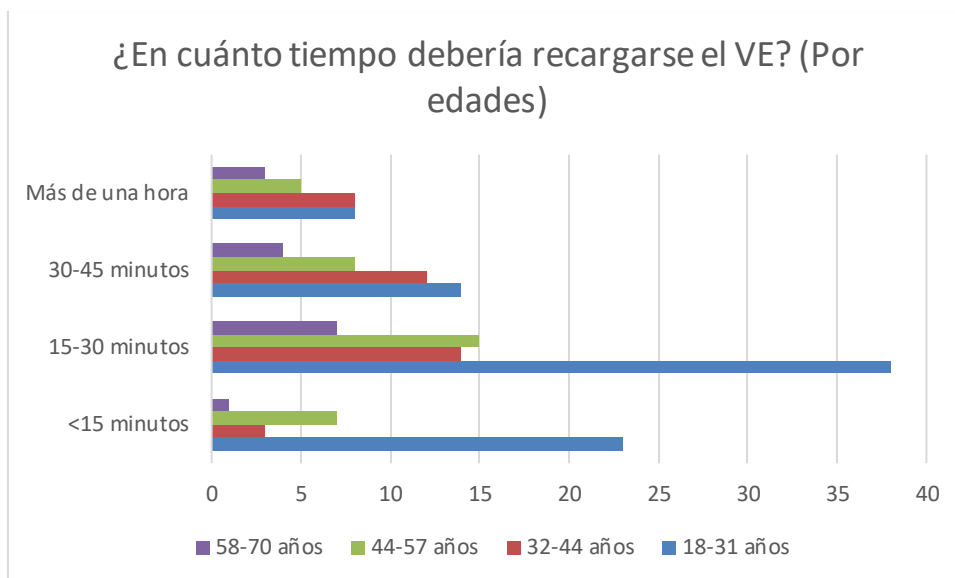


Figura-anexo 18

En *Figura-anexo 18* se muestran las respuestas a la pregunta “¿En cuánto tiempo debería recargarse el VE?”, segmentado por edades. Por lo general los más jóvenes son los que más desean una carga rápida.

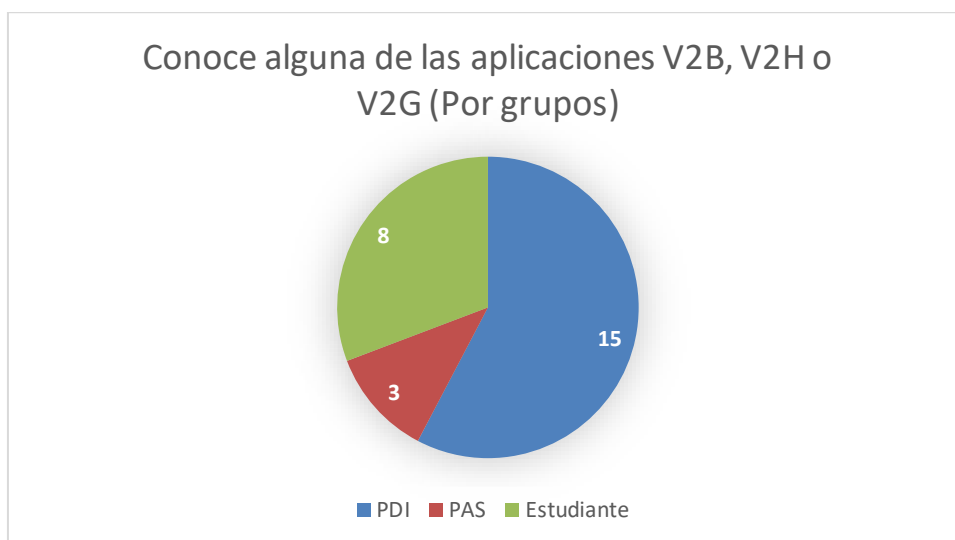


Figura-anexo 19

En *Figura-anexo 15* se muestra el número de personas que conocen alguna de las aplicaciones V2B, V2H o V2G.

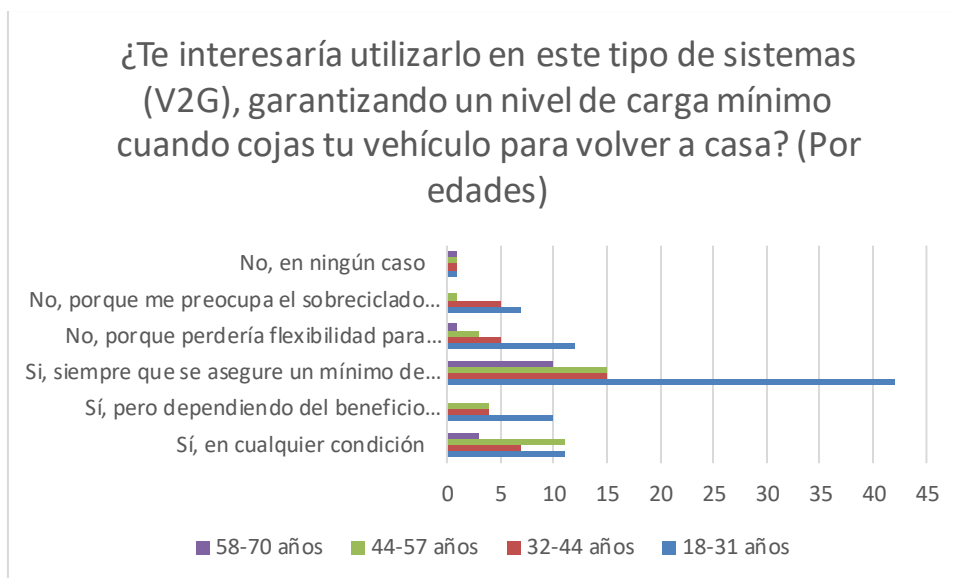
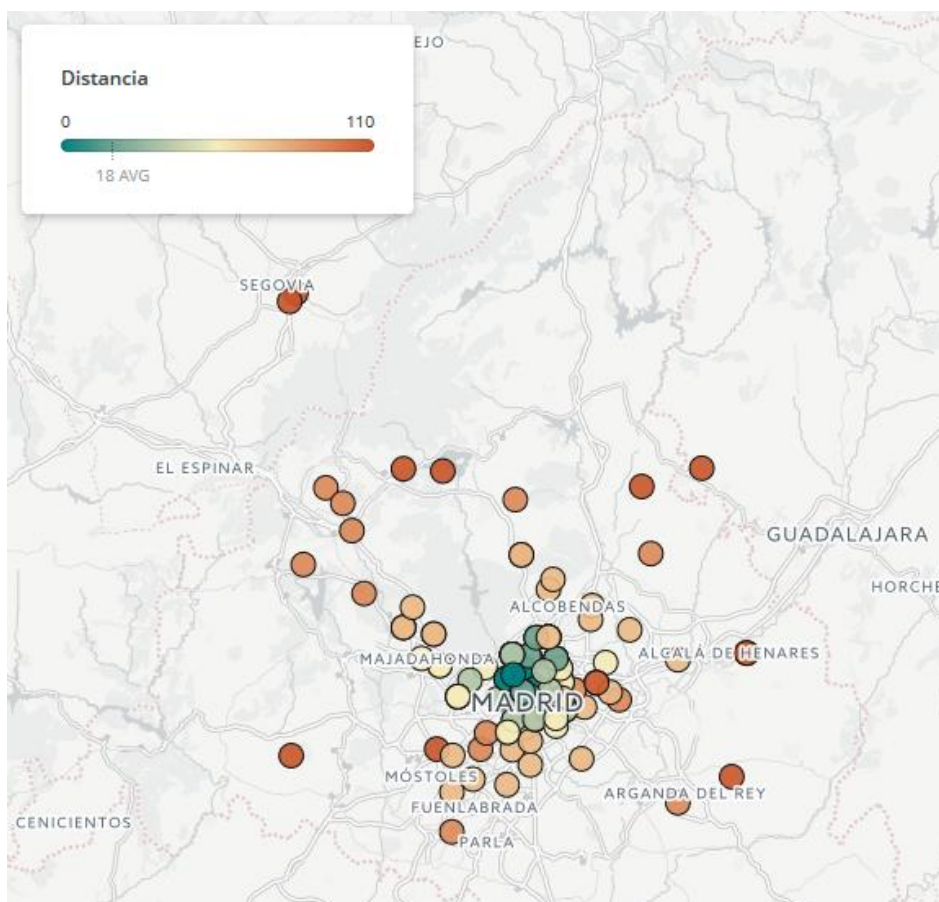


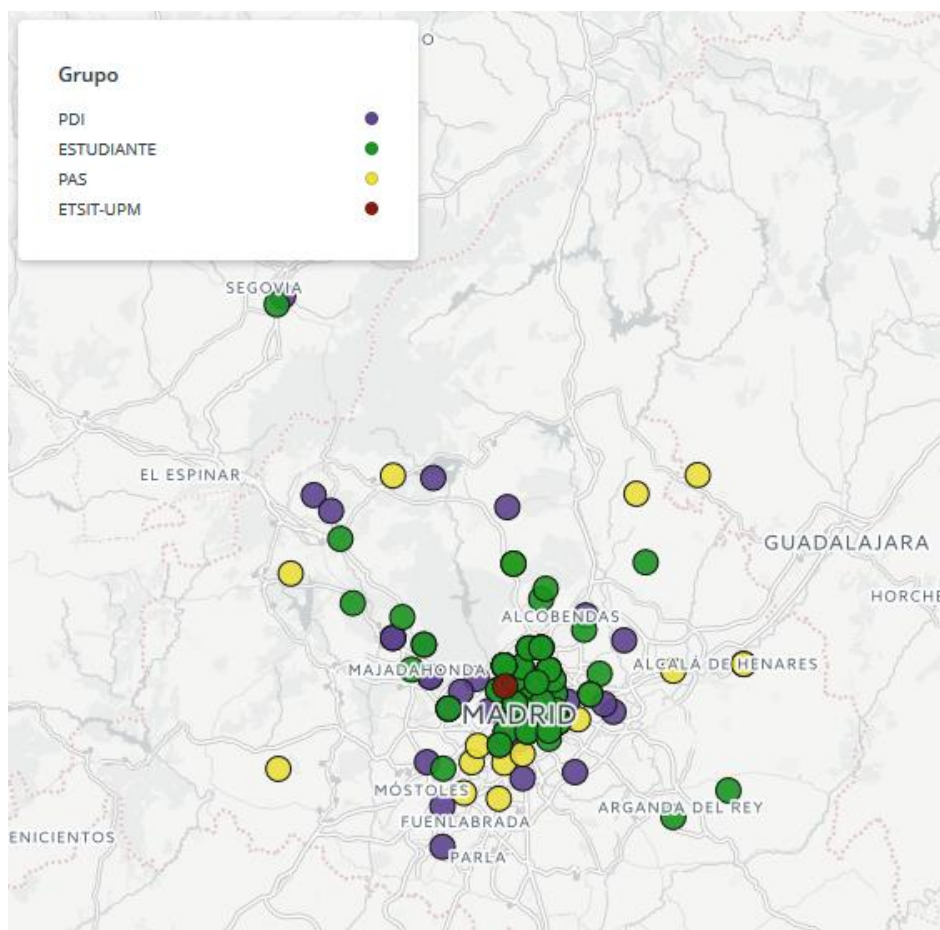
Figura-anexo 20

En Figura-anexo 20 se muestran las respuestas a la pregunta “¿Te interesaría utilizarlo en este tipo de sistemas(V2G), garantizando un nivel de carga mínimo cuando cojas tu vehículo para volver a casa?”, segmentado por edades. La disponibilidad a usarlos es mayor en el grupo de 58-70 años.

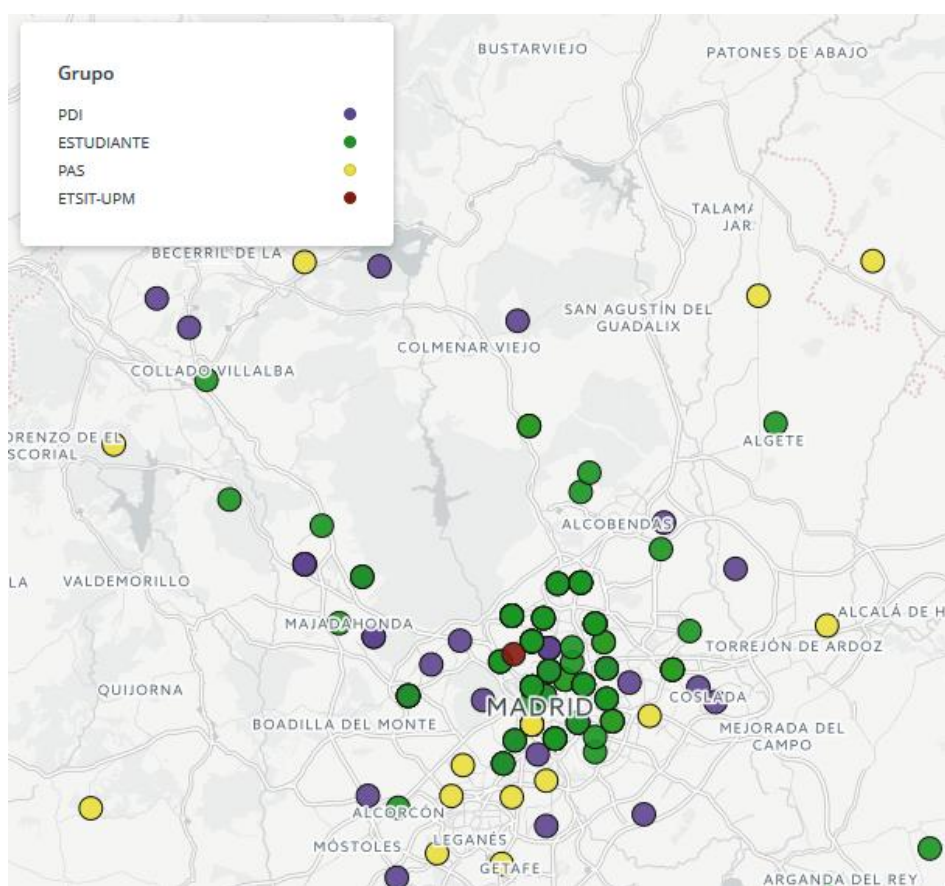
A continuación, se incluyen mapas con información de la distancia recorrida, del grupo, del sexo y de las edades de los encuestados.



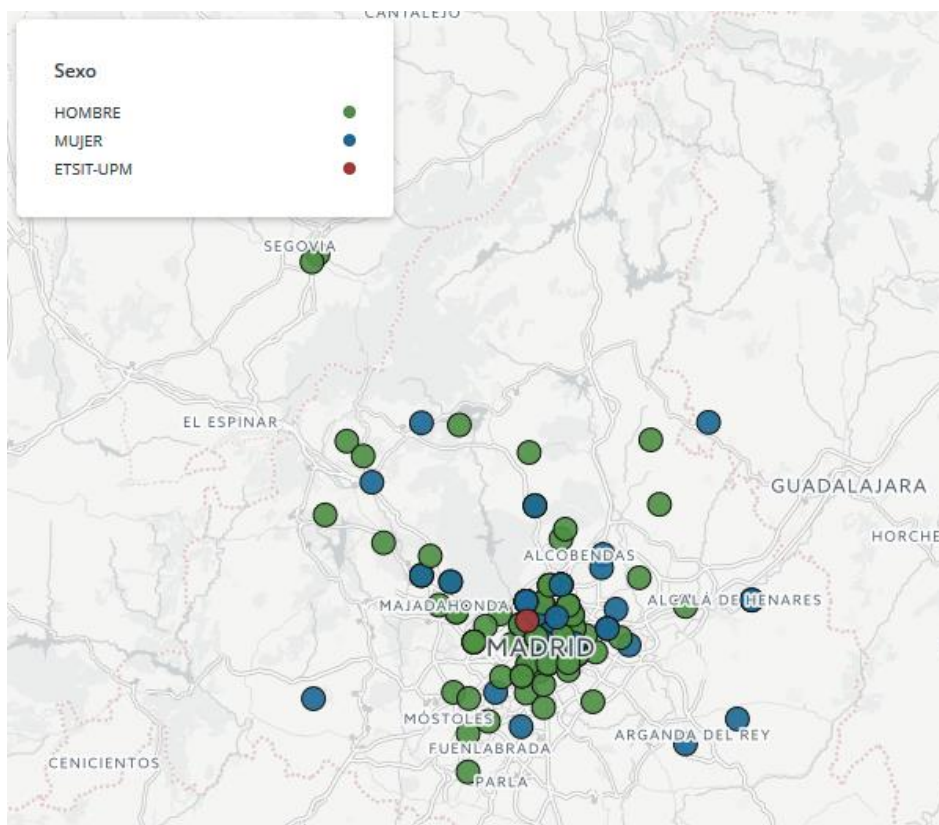
Mapa-anexo 1



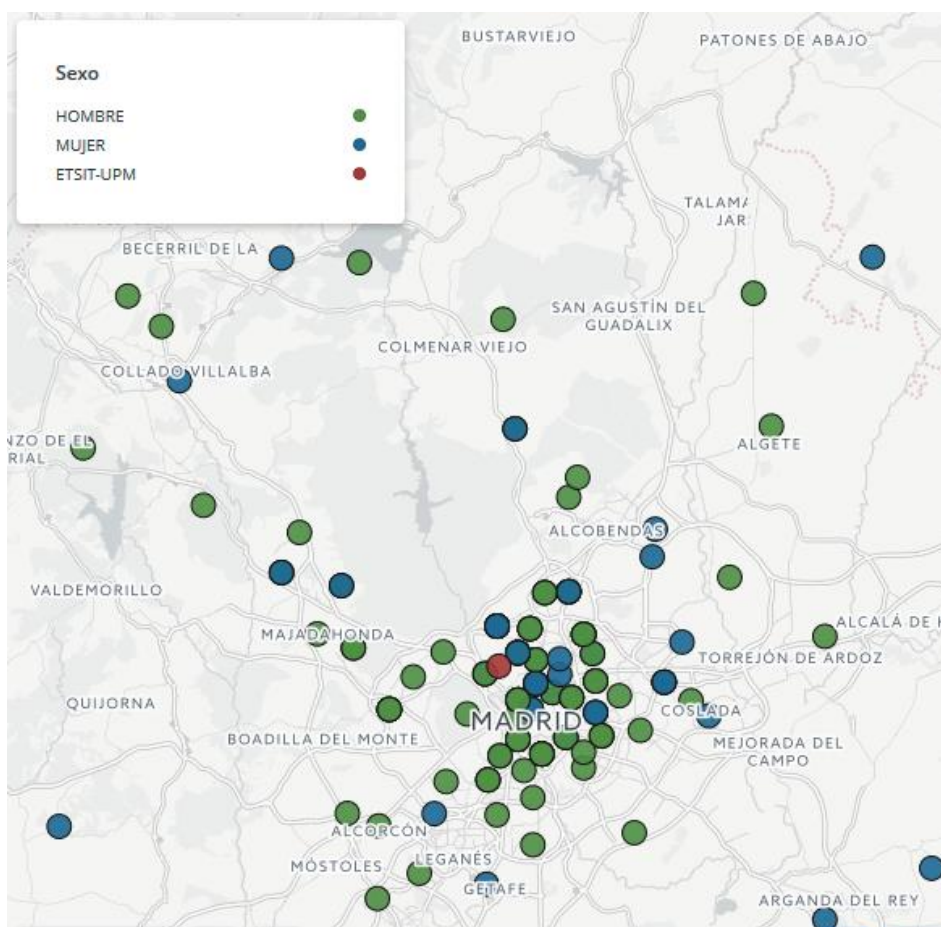
Mapa-anexo 2



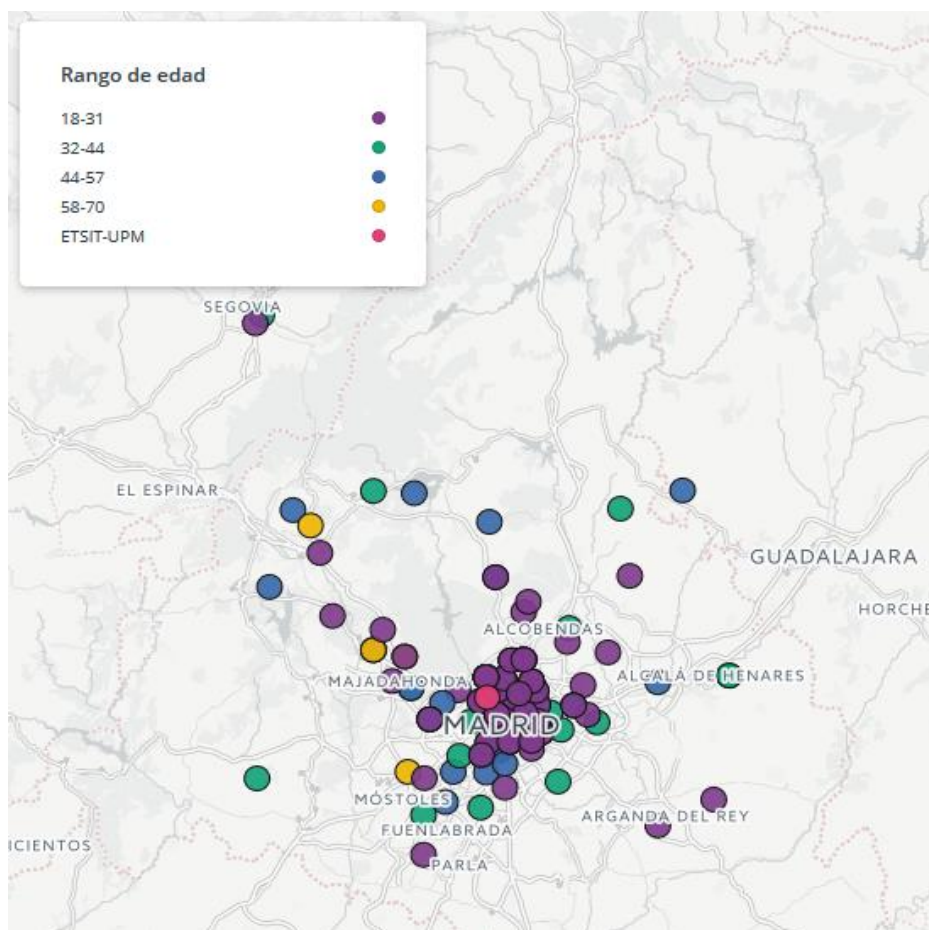
Mapa-anexo 3



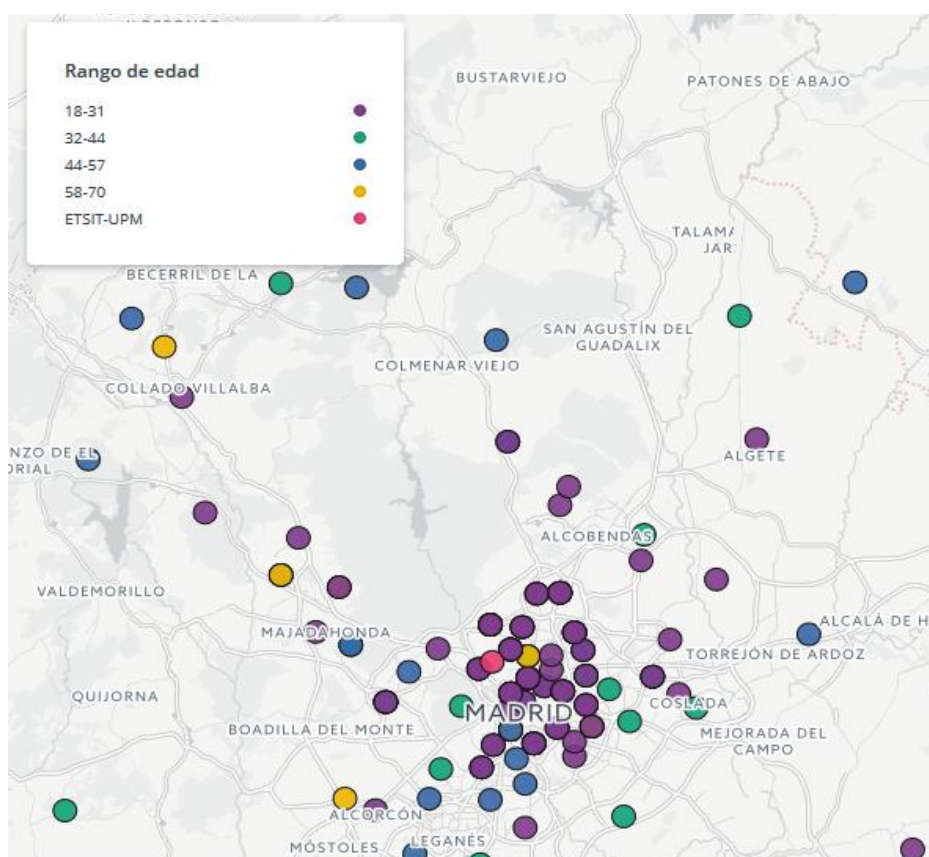
Mapa-anexo 4



Mapa-anexo 5



Mapa-anexo 6



Mapa-anexo 7