

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Gestión de Almacenamiento de Energía  
en Núcleos Residenciales con Vehículo  
Eléctrico

Autor: Patricia Sierra Franco

Tutor: Manuel Barragán Villarejo

Alejandro Marano Marcolini

**Dpto. Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Gestión de Almacenamiento de Energía en Núcleos Residenciales con Vehículo Eléctrico**

Autor:

Patricia Sierra Franco

Tutor:

Manuel Barragán Villarejo  
Alejandro Marano Marcolini

Profesor Ayudante Doctor  
Profesor Contratado Doctor

Dpto. Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado: Gestión de Almacenamiento de Energía en Núcleos Residenciales  
con Vehículo Eléctrico

Autor: Patricia Sierra Franco

Tutor: Manuel Barragán Villarejo

Alejandro Marano Marcolini

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Resumen

---

La finalidad de este trabajo es realizar un estudio de un posible caso futuro de integración del vehículo eléctrico en la red. En este estudio se evalúa la alimentación eléctrica a un aparcamiento perteneciente a un conjunto de 100 viviendas en el cual todas disponen de un vehículo eléctrico. Dicha integración puede suponer un gran problema para la red, ya que supondría un gran incremento en la potencia consumida, y si esto ocurriese a mayor escala podría provocar consumos en las horas pico para los cuales la red no está preparada a día de hoy, no por la generación (que en el caso de nuestro país se encuentra sobredimensionada) sino por la distribución de dicha energía. Lo que se intenta conseguir en este estudio es considerar una carga más inteligente del vehículo, repartiéndola en las horas de menor consumo, y suplir el enorme aumento de consumo que supone la carga rápida de los vehículos eléctricos gracias al uso de baterías. Esto, además de ayudar a aplanar la curva de consumo, sería la forma más económica de realizarlo para el consumidor.

La curva de demanda diaria española se caracteriza por grandes variaciones de consumo entre las horas valle y punta, por lo que necesitamos de un sistema eléctrico muy sobredimensionado. Lo más óptimo para el sistema sería una curva de demanda plana, ya que ello permitiría tener una generación prácticamente continua y no disponer de tanta generación en exceso sin usar en las horas de menor consumo (que sería el valle nocturno).

Desde el punto de vista del consumidor, este tipo de trabajos de optimización va a ofrecer dos ventajas fundamentales. La primera ventaja es el ahorro económico, permitiendo que el consumidor se beneficie de los bajos precios que existen en la tarifa eléctrica a determinadas horas. La segunda ventaja sería la disminución del término de potencia, que presenta dos facetas. Una de ellas sería el propio ahorro económico que resulta de la propia potencia contratada, y la otra sería que el consumidor podría reutilizar una instalación ya existente, incorporando su vehículo eléctrico, sin la necesidad de realizar una repotenciación de la red.





# Abstract

---

The purpose of this work is to carry out a study of a possible future case of integration of the electric vehicle in the network. In this study, the electric power supply to a car park belonging to a group of 100 houses in which all have an electric vehicle is evaluated. Such integration can be a big problem for the network, since it would suppose a great increase in the power consumed, and if this happened on a larger scale, it could cause consumption in the peak hours for which the network is not ready today, not because of the generation (which in the case of our country is oversized) but the distribution of that energy. What we are trying to achieve in this study is to consider a more intelligent load of the vehicle, by using timers (if possible), distributing it in the hours of least consumption, and supplying the enormous increase in consumption that involves the fast loading of the electric vehicles thanks to the use of batteries. This, in addition to helping to flatten the consumption curve, would be the most economical way to do it for the consumer.

The Spanish daily demand curve is characterized by large variations in consumption between valley and peak hours, which is why we need a very oversized electrical system. The most optimal for the system would be a flat demand curve, since this would allow having a virtually continuous generation and not having so much excess generation unused in the hours of lower consumption (which would be the night valley).

From the point of view of the consumer, this type of optimization work is going to offer two fundamental advantages. The first advantage is the economic savings, allowing the consumer to benefit from the low prices that exist in the electricity rate at certain hours. The second advantage would be the decrease in the power term, which has two facets. One of them would be the own economic saving that results from the contracted power itself, and the other would be that the consumer could reuse an existing installation, incorporating his electric vehicle, without the need to make a repowering of the network.



# Índice

---

<i>Resumen</i>	I
<i>Abstract</i>	III
<i>Notación</i>	VII
<b>1 Introducción y objetivos</b>	<b>1</b>
1.1 Situación actual del vehículo eléctrico	1
1.1.1 Comparativa del vehículo eléctrico con el de combustión interna	1
Desde el punto de vista tecnológico	1
Desde el punto de vista medio ambiental global	2
Desde el punto de vista ambiental local	3
1.1.2 Situación actual del parque de vehículos eléctricos	4
1.2 Escenarios futuros del parque de vehículos eléctricos	6
1.2.1 Sistemas de almacenamiento de energía	9
1.3 Objetivos del trabajo	10
<b>2 Impacto del vehículo eléctrico en núcleos residenciales</b>	<b>12</b>
2.1 Demanda doméstica	12
2.2 Carga lenta del VE	15
2.3 Carga rápida	17
2.4 Curvas agregadas en un núcleo residencial	19
<b>3 Modelo de Optimización</b>	<b>22</b>
<b>4 Resultados</b>	<b>25</b>
4.1 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento	25
4.2 Escenarios estudiados	26
Con temporizador	27
Sin temporizador	39
<b>5 Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>50</b>
<b>Apéndice A Código GAMS</b>	<b>53</b>
<i>Índice de Figuras</i>	55
<i>Índice de Tablas</i>	56
<i>Bibliografía</i>	57



# Notación

---

VE	Vehículo eléctrico
VCI	Vehículo combustión interna
SOC	Estado de carga
TP	Término de potencia



# 1 Introducción y objetivos

---

## 1.1 Situación actual del vehículo eléctrico

Para aclarar los parámetros que tienen incidencia, tanto en la situación actual como futura de los vehículos eléctricos, se realiza a continuación una pequeña comparativa entre ellos y los vehículos de combustión interna a los que aspiran a desplazar.

### 1.1.1 Comparativa del vehículo eléctrico con el de combustión interna

El vehículo de combustión interna ha sido uno de los grandes logros tecnológicos de la humanidad durante el siglo 20, lográndose grandes avances en la fabricación de los motores. Si la capacidad de absorción de las emisiones de dichos VCI no supusiese un problema tan importante para el medio ambiente, seguramente la implantación del vehículo eléctrico se retrasaría bastante, previsiblemente hasta que la tecnología de las baterías estuviese bastante más evolucionada.

A continuación, se hará una breve comparativa, desde diferentes puntos de vista, entre los vehículos eléctricos y los vehículos de combustión interna.

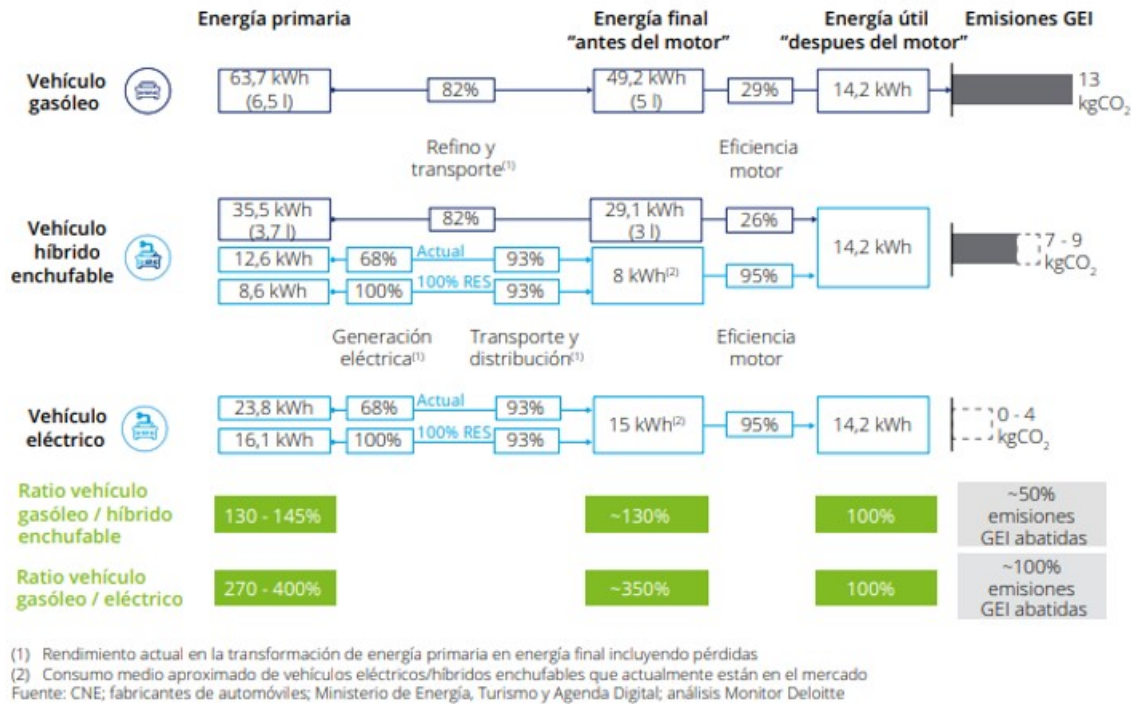
#### Desde el punto de vista tecnológico

El VCI es una máquina compleja, que requiere un mantenimiento importante y que tiene muchas partes sometidas a desgaste. En cuanto al rendimiento, a pesar de los grandes avances producidos, el motor de combustión interna nunca podrá acercarse al rendimiento de un motor eléctrico (>90% frente al aproximadamente 30% del VCI). Otro gran inconveniente que presenta el VCI es que su motor solo puede funcionar bien en un rango de velocidades y con un sentido de giro, precisa un mecanismo en línea con el motor que sea capaz de transformar la relación par/velocidad e invertir el sentido de giro (caja de cambio más embrague). La gran ventaja que posee un VCI es su sistema de almacenamiento de energía. La energía se almacena de forma química y se transforma con la combustión del combustible. La energía específica es muy elevada y con un pequeño depósito de 50L permite recorridos muy elevados (en algunos casos > 800 km). Una vez consumido parte del depósito, se puede realizar su recarga en un período de minutos.

El VE es una máquina menos compleja, que no precisa de partes sometidas a desgaste importantes (embrague y caja de cambios), ya que el motor eléctrico funciona bien en un gran rango de velocidades y permite cambiar el sentido de giro de manera sencilla (cambio de polaridad). Debido a la eliminación de las partes citadas y a lo silencioso que es un motor eléctrico, se reduce la insonorización necesaria y el espacio necesario para la parte motora del vehículo. Si solo hubiera que considerar las ventajas citadas el VE habría desplazado al VCI hace ya mucho tiempo, pero el VE tiene la gran desventaja del suministro de la energía. Se precisa la instalación de grandes baterías, que ocupan un espacio importante y precisan de procesos de recarga mucho más lento

que el VCI. El desarrollo de las baterías es el gran reto tecnológico del momento y tendrá mucha influencia en la generalización del VE.

En la Fig. 1.1 se puede observar una comparativa entre los distintos vehículos mencionados, comparando sus rendimientos y sus emisiones.



**Figura 1.1** Comparativa de alternativas de descarbonización del transporte de pasajeros particular (unidades/100km)[11].

### Desde el punto de vista medio ambiental global

Los gases de efecto invernadero (principalmente el CO<sub>2</sub>) son los causantes del calentamiento del planeta. Es un problema global, ya que perjudica de igual forma una tonelada de CO<sub>2</sub> generada en Sevilla que una generada en Estambul. Este tipo de contaminantes no tiene apenas incidencia en la calidad del aire del entorno en que se generan. Los acuerdos internacionales, como el acuerdo de París, intentan generar mecanismos que reduzcan el aporte de gases de efecto invernadero a la atmósfera. El mecanismo de derechos de emisión de CO<sub>2</sub> permite que un país venda sus derechos sobrantes a otro país, además permite mecanismos de compensación que reduzcan el CO<sub>2</sub> en el aire.

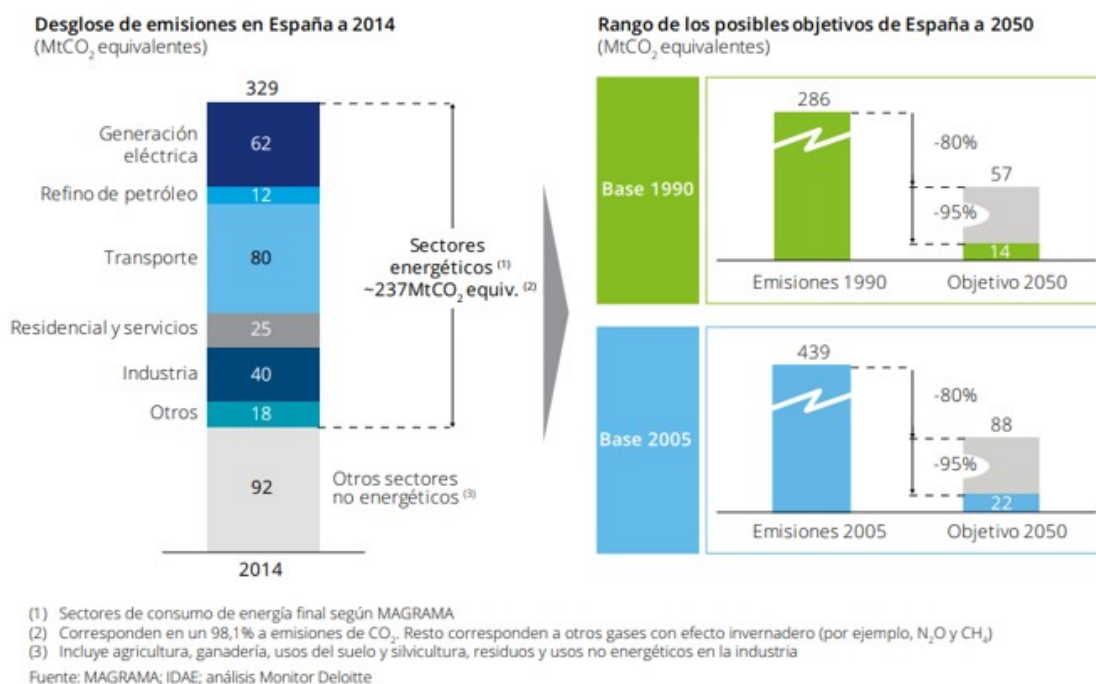
La lucha contra la contaminación atmosférica está generando en la Comunidad Europea nueva normativa para dar cumplimiento a los acuerdos internacionales (acuerdo de París). Se prevé que se favorezca, con reducción de impuestos, a los vehículos de bajas emisiones y se penalice, vía impuestos a los carburantes, a los vehículos de motor de explosión.

Para cumplir con los objetivos de dicho acuerdo, los gobiernos apuestan por instaurar formas de transporte no contaminante encabezadas por la movilidad eléctrica y por **prohibir la venta de vehículos con motor de combustión en un futuro** más bien difuso. Francia y Reino Unido plantean aplicar el veto definitivo en 2040, mientras que Holanda y Noruega adelantan su previsión a 2025. En España, únicamente se fijan cifras a nivel local. A partir del 2025, solo podrán acceder al centro de Madrid los coches eléctricos e híbridos. Según datos del MAPAMA el sector del



transporte genera aproximadamente el 25% de la emisión de CO<sub>2</sub> del país. La generalización del uso del VE podría reducir drásticamente esta fuente de emisión, sobre todo si la carga de los vehículos se hace con fuentes renovables. El aumento del porcentaje de generación de renovables es un objetivo claro de las administraciones públicas. Además, el porcentaje de generación térmica que podemos considerar, en cuanto a generación de CO<sub>2</sub>, similares a los VCI (básicamente el carbón) irá disminuyendo progresivamente a favor de ciclos combinados de gas natural que pueden alcanzar rendimientos > 55%.

En la Fig. 1.2 se pueden observar unas estimaciones de los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.



**Figura 1.2** Objetivos de reducción de emisiones GEI en España en 2050 en función de la transposición de los objetivos europeos[11].

Se puede observar la gran cantidad de dichas emisiones que corresponde al sector transporte. Por ello, está demostrado que la generalización del VE será un gran aliado en la problemática de los Gases de Efecto Invernadero, colaborando en la disminución de dichas emisiones.

### Desde el punto de vista ambiental local

El problema de la emisión de Gases de Efecto Invernadero no afecta a la calidad de aire que respiramos actualmente. El problema de la contaminación que sufren muchas ciudades, al día de hoy, son causados por contaminante locales. En todos los estudios medioambientales realizados (ver, por ejemplo, la Estrategia Andaluza de la Calidad del Aire [7]) se destaca que entre los grandes problemas actuales están la contaminación por partículas, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y Ozono (contaminante secundario, condicionado por NO<sub>x</sub>). Quitando al SO<sub>2</sub>, generado principalmente por sistemas de calefacción e industria, el resto de los contaminantes están asociados al tráfico.

Muchas ciudades se verán abocadas a poner limitaciones de acceso a los vehículos de motor de explosión (sobre todo diesel), lo cual redundará en aumentar el atractivo para la compra de VE. No será muy atractiva la inversión en un vehículo, que puede no estar disponible en situaciones de

contaminación locales. Los vehículos hídricos enchufables destacan actualmente como una buena alternativa, ya que permiten recorrido medios en ciudad con el modo eléctrico y gran autonomía con el modo térmico. Pero el tipo de vehículo citado mantiene la complejidad de los VCI, por lo que serán desplazados a medio plazo por VE puros, tan pronto se mejoren significativamente los sistemas de baterías.

Los últimos datos de la Agencia Europea del Medio Ambiente revelan que los gases y partículas nocivas están detrás de casi 30.000 muertes prematuras en España. Uno de los principales culpables es el transporte: genera una cuarta parte de la polución atmosférica, unas emisiones que la Comisión Europea quiere reducir en un 40% para el 2030.

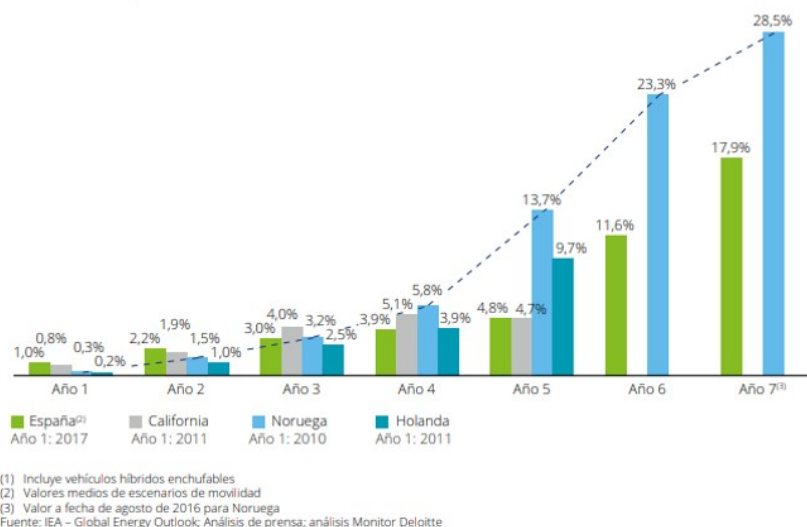
### 1.1.2 Situación actual del parque de vehículos eléctricos

Según datos obtenidos de Real Automóvil Club, al coche eléctrico todavía le queda recorrido para convertirse en una alternativa real y alcanzar cifras de ventas más cercanas a las que protagonizan los vehículos tradicionales, es decir, los propulsados por mecánicas diesel o gasolina. Aun así, poco a poco empieza a despegar, y ya en Europa hablamos de unas ventas de 135.369 turismos eléctricos frente a los 90.996 matriculados en 2016, lo que representa un crecimiento del 48.8%, según datos publicados por la Asociación Europea de Fabricantes de Vehículos (ACEM)[12].

España es uno de los países europeos con menor representación de vehículos eléctricos en cuanto a ventas se refiere (0,32% de cuota respecto al mercado de turismos), muy por debajo de la media europea, que está en 1,7%, según datos del Observatorio Europeo de Energías Alternativas. Noruega se posiciona, con diferencia, como el país europeo donde hay más porcentaje de eléctricos sobre el total del mercado. Su cuota de mercado, es del 20,82%. Le sigue Islandia (4,01%), Países Bajos (1,92%), Austria (1,54%), Suecia (1,11%), Portugal (0,81%), Reino Unido (0,54%), Bélgica (0,49%) y Finlandia (0,42%).

Centrándose en las matriculaciones de 2017, Noruega vuelve a ocupar el primer puesto de la lista con 33.025 unidades. Por detrás le siguen Alemania, con 25.056 unidades, Francia (24.910), Reino Unido (13.597), Países Bajos (9.897), Austria (5.433), Suiza (4.773), Suecia (4.217) y España (3.920) [12].

En la Fig. 1.3 se puede observar la evolución de la penetración del VE (incluyendo híbridos enchufables) desde que comenzó su comercialización. Se ve que existe un enorme crecimiento de la presencia del mismo.



**Figura 1.3** Comparativa internacional de penetración del vehículo eléctrico durante los primeros años del despliegue (% anual de ventas)[11].

Debido a las políticas restrictivas de contaminación que se están imponiendo tanto para fabricantes como para los propios conductores, más marcas de coches ven la necesidad de electrificar sus gamas con nuevos modelos 100% eléctricos. La oferta de modelos, aunque todavía escasa, empieza a ser más interesante.

El Renault Zoe, con una cuota del 22,7%, consigue el primer puesto de los eléctricos más vendidos en Europa. Muy buena aceptación también tiene el Nissan Leaf, con una cuota del 12,9%, seguido del Tesla Model S (11,5%), BMW i3 (10,8%) y del Volkswagen e-Golf (9,6%). El Nissan Leaf es el vehículo eléctrico más vendido en el mundo, habiendo superado ya el número 300000. Debido a lo anterior, se ha seleccionado como vehículo base para este estudio.

Uno de los hándicaps que tienen los VE es la autonomía, un tema que preocupa mucho al consumidor. En este sentido, se observa una evolución en el desarrollo de las baterías y así, por ejemplo, el Renault Zoe ya homologa 400km de autonomía, el Nissan Leaf 378km, el BMW i3 y el VW e-Golf 300km mientras que el Tesla Model S supera los 500km.

El otro inconveniente para una verdadera explosión de los vehículos eléctricos es la red de cargadores. Europa se está dando cuenta del potencial de estos modelos y quiere ofrecer una infraestructura más acorde con lo que demanda la sociedad. En la actualidad encontramos más de 4.200 cargadores rápidos repartidos por Europa, de los cuales 1.250 se instalaron en 2017. Alemania lidera esta expansión con 955 cargadores en sus carreteras, le sigue Francia con 872, Italia con 476, Irlanda con 443 y Noruega con 384. En España sólo hay 82 cargadores rápidos.

La ley de los Presupuestos Generales del Estado que fue publicado a principios de julio de 2018 en el BOE, incluye entre sus partidas 50 millones de euros para el Plan VEA 2018, en concepto de ayudas para la movilidad alternativa. Aunque desde algunos sectores lo consideran una cantidad insuficiente, es de esperar que se mejore en los próximos presupuestos, cuya realización se tiene que iniciar próximamente por el nuevo gobierno.

La Comisión Europea está trabajando para que las instituciones nacionales implanten sistemas de cableado en las plazas públicas de aparcamiento con el fin de instalar estaciones de recarga en ellas en los próximos años. En España, el Plan MOVALT 2017[10] prevé ayudas económicas a los compradores de coches eléctricos o combustibles alternativos a la gasolina o el diesel. Incluso los híbridos tradicionales quedarán fuera de estas ayudas. Las matriculaciones de automóviles movidos por energías alternativas a la gasolina y el diesel se han incrementado en un 51,4% en el tercer trimestre del año en Europa, en comparación al mismo periodo de 2016. Incluso, habría que destacar que España ha sido el país que más ha crecido entre julio, agosto y septiembre en todo el continente, con un 90,7% más de matriculaciones. Evidentemente cuando se parte de una situación de retraso, en relación a los socios de la UE, los crecimientos deben ser más elevados.

Actualmente el sistema de almacenamiento de los VE se basa en baterías Ion-litio: (LiCoO<sub>2</sub>, electrolito líquido). Baterías de reciente creación formada por un electrolito de sal de litio y electrodos de litio, cobalto y oxido. El uso de nuevos materiales como el litio ha permitido conseguir altas energías específicas, alta eficiencia, la eliminación del efecto memoria, ausencia de mantenimiento y facilidad a la hora de reciclar los desechos de Ion-litio. Disponen del doble de densidad energética que las baterías níquel-cadmio con un tamaño del orden de un tercio más pequeñas. Pero también tienen desventajas, el principal es su alto coste de producción, aunque poco a poco este se va reduciendo, son frágiles, pueden explotar por el sobrecalentamiento y deben ser almacenadas con mucho cuidado, tanto por necesitar un ambiente frío como porque debe estar parcialmente cargada. Aun así, las baterías de Ion-litio representan a día de hoy la mejor elección para montar en un VE. Al no ser una tecnología totalmente madura, y encontrarse en continuo desarrollo, los avances las hacen tener un gran margen de mejora.

Este acumulador de energía almacena la electricidad mediante elementos electroquímicos, un proceso con pérdidas mínimas que permite un rendimiento próximo al 100%. Las baterías, dispuestas a entregar esta energía en cualquier momento, soportan un número finito de ciclos de carga y descarga completos, llamado ciclo de vida.

La explicación química del funcionamiento de los diferentes tipos de batería para VE es que esta aprovecha la energía que se desprende de reacciones de oxidación-reducción para producir una corriente eléctrica. Esto sería fundamentalmente el proceso de descarga, siendo a la inversa, mediante el uso de una corriente eléctrica para producir un cambio químico, el proceso de carga.

Los sistemas de carga utilizados en la UE son de carga directa. No se han implantado sistemas de carga por intercambio de baterías para coches. Estos sistemas pueden tener uso para flotas de autobuses, de un único propietario. Para los coches particulares necesitaría una estandarización de las baterías y seguramente disponer de baterías de alquiler ya que muchos usuarios rechazarían el cambio de una batería nueva por otra de la que desconocen su estado. La reducción de los tiempos de cargas juega a favor de mantener la carga directa de la batería.

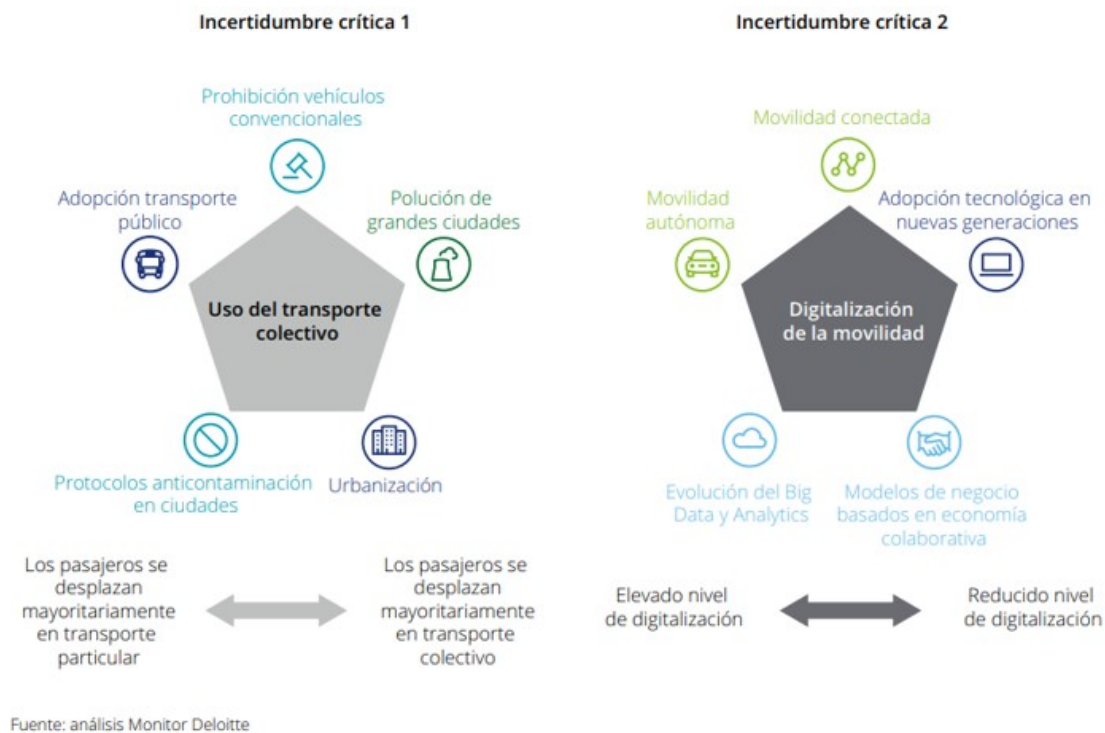
## 1.2 Escenarios futuros del parque de vehículos eléctricos

El desarrollo futuro del parque automovilístico de vehículo eléctrico depende de una serie de factores que ayudarán a su despliegue. A continuación, se harán unos pequeños comentarios en relación a los factores principales.

- **Factor ambiental:** en el área económica de la Comunidad Europea están fijadas las estrategias a medio y largo plazo. En el medio plazo incluso están fijados claramente los objetivos numéricos. Recientemente se puede citar, a nivel nacional, legislación como Plan Nacional de Calidad del Aire 2017-2019, de Diciembre de 2017. Incluso a nivel autonómico en Andalucía, se pretende ir más allá de las obligaciones fijadas a niveles de CE o nacional y se está manejado en la futura legislación las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, con límites de inmisión mucho más restrictivos). Actualmente se puede ver, el borrador de la Estrategia Andaluza de Calidad del Aire [7], que está previsto que salga a exposición pública en breve plazo. Difícilmente en nuestro entorno se van a producir cambios en la legislación que permitan un aumento de las emisiones, ya que no serían entendidas por la sociedad. Por lo anterior se puede prever que los cambios en este factor facilitarían la implantación del VE.
- **Factor económico:** los objetivos relacionados con el VE, siempre suponen un desembolso o una reducción de ingresos para las administraciones públicas. La influencia de la situación económica es relevante, como hemos constatado en la última crisis económica. Cuando los recursos públicos escasean, como primera medida se suelen recortar las partidas presupuestarias consideradas no esenciales. Aunque la implantación del VE y la lucha contra la contaminación se considera importante, siempre se cae en la tentación de pensar que se puede retrasar un poco su aplicación y concentrar recursos en necesidades más inmediatas. Dado que los ciclos económicos se suelen alternar históricamente, podemos considerar que la influencia será neutra, al compensarse los periodos de crisis y los de desarrollo económico.
- **Factor tecnológico:** normalmente los estudios se basan en las tecnologías de fabricación de baterías maduras o con una previsión conocida de desarrollo. No consideran la posibilidad de que aparezcan nuevas tecnologías que aceleren la implantación del VE. No se pueden hacer previsiones con consideraciones muy optimistas, no soportadas por datos contrastados, pero dado el interés científico y económico concentrado en el desarrollo de nuevos sistemas de baterías es de esperar que como mínimo se alcancen los objetivos previstos.

Por lo considerado anteriormente, se puede considerar que los plazos que prevén los estudios en relación a la implantación del VE se cumplirán o posiblemente se aceleren. Es por tanto necesario prepararse para los retos que plantea el VE a la red de suministro y si es posible, considerar una reserva que permita responder en caso de una aceleración del proceso. Se utilizarán los resultados de un estudio realizado por la consultora Deloitte en el año 2017, al ser un estudio reciente y una

fuente fiable. El estudio considera diferentes escenarios y valora la implantación del VE entre el 21 % al 25 % para el año 2030 [11]. Dicho estudio resulta muy interesante al estudiar diversos parámetros que podrían afectar al parque de VE, como son el nivel de digitalización y el uso del transporte colectivo. En la Fig 1.4 se puede observar qué factores favorecerían la presencia de los parámetros mencionados.

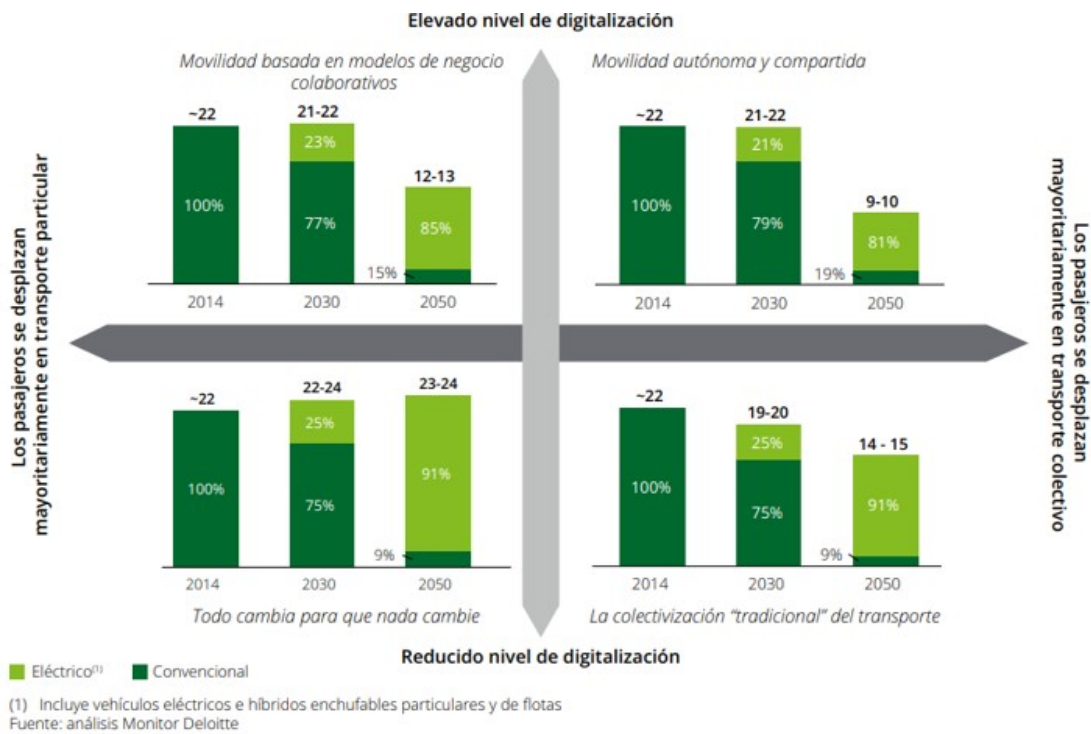


**Figura 1.4** Incertidumbres críticas para el desarrollo futuro de la movilidad de pasajeros [11].

Dichos parámetros afectarán enormemente el volumen de VE que estarán en circulación, presentándose varios escenarios futuros. En los 4 escenarios presentados se alcanza un valor parecido de presencia del VE para el 2030, que ronda el 23 %, como ya se ha comentado previamente. También se dan predicciones para el 2050, en las cuales se puede ver una enorme presencia del VE, más afectado el porcentaje por el nivel de digitalización y de uso del transporte colectivo. Todo esto se presenta en la Fig. 1.5, en la cual se puede observar el parque de VE en función del escenario de movilidad, para 2030 y 2050.

Escenarios estudiados en la Fig. 1.5:

- Todo cambia para que nada cambie. Este es un escenario en el que se ha incrementado la eficiencia de los motores de combustión interna, los sistemas de control de tráfico son mucho más inteligentes que los actuales y se ha avanzado en las políticas de fomento del transporte público. La naturaleza de la movilidad actual se mantiene, ya que los nuevos modelos de negocio colaborativos y el transporte público no han sido capaces de modificar los hábitos de movilidad, ni la importancia del status, ni la flexibilidad/independencia que aporta el coche particular.
- Movilidad basada en modelos de negocio colaborativos. Este es un escenario donde la introducción masiva de la digitalización en el transporte facilita el desarrollo de modelos basados en economía colaborativa, lo que conlleva una mayor utilización de los vehículos



**Figura 1.5** Parque de turismo en función del escenario de movilidad en el futuro (millones de vehículos) [11].

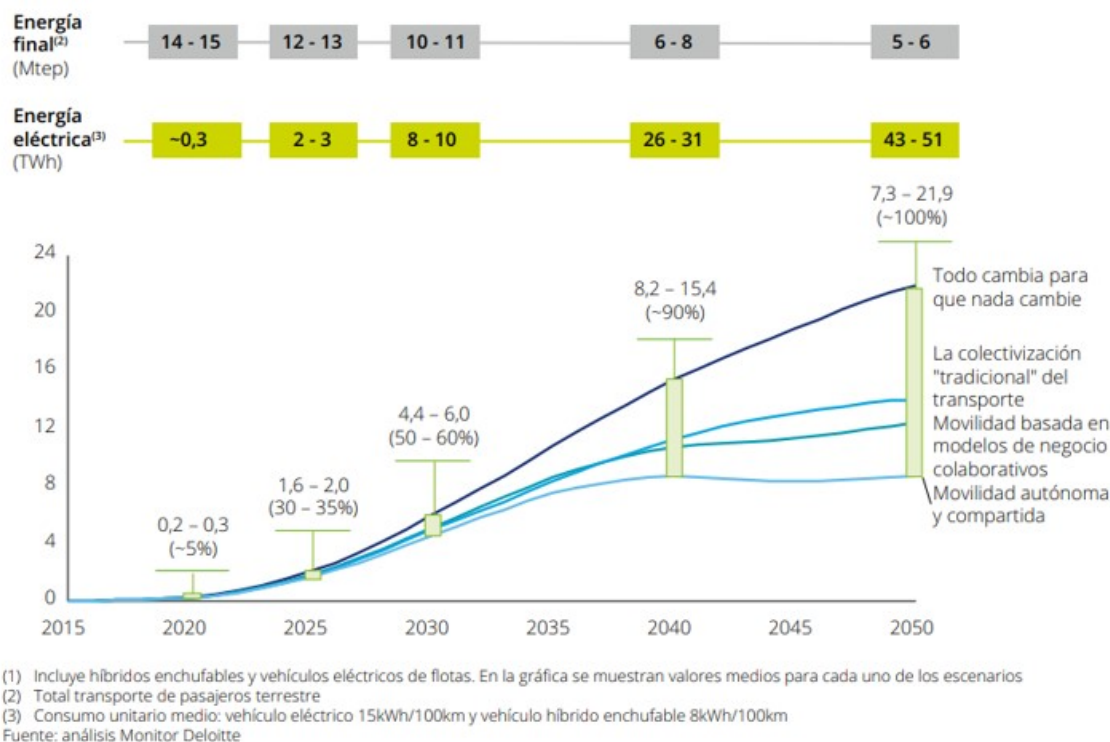
y una reducción del parque de vehículos necesario. Aun así, la flexibilidad que aporta la propiedad privada del vehículo sigue siendo relevante en los hábitos de movilidad.

- **Movilidad autónoma y compartida.** Este es un escenario donde se produce un desarrollo tecnológico que permite la plena introducción de los sistemas de conducción autónoma, lo cual facilita la penetración de flotas de vehículos autónomos, que son usados de modo compartido. La utilización de los vehículos se incrementa significativamente, lo que permite reducir el número de coches.
- **La colectivización “tradicional” del transporte.** Este es un escenario donde existe una mayor concentración de la población en las ciudades y se establecen políticas decididas de impulso al transporte público “tradicional” (principalmente, autobús o ferrocarril) como, por ejemplo, el establecimiento de restricciones a la circulación de vehículos particulares en ciudades. Estas políticas se acompañan de elevados recursos en vehículos e infraestructuras de transporte público, lo que consigue hacerlo mucho más atractivo con respecto al privado e individual en términos de tiempo de trayecto, comodidad y precio.

Garantizar el cumplimiento de los objetivos de descarbonización requeriría una elevada penetración de vehículos eléctricos e híbridos enchufables: el 10% del parque total en 2025, el 25% en 2030 y más del 90% en 2050. Para conseguir estos niveles de penetración sería necesario un nivel de ventas de vehículos eléctricos e híbridos enchufables del 30-35% en 2025, del 50-60% en 2030 y que no se comercializase prácticamente ningún vehículo con motor de combustión interna a partir del año 2040. Estos niveles de penetración se traducirían en un parque de coches eléctricos de entre 1,6 y 2 millones de vehículos en 2025, de entre 4,4 y 6 millones en 2030 y de entre 7,3 y 21,9 millones en 2050. Estos escenarios implican un número total de vehículos eléctricos diferente en cada uno de ellos.



En la Fig. 1.6 se puede observar la evolución del parque de VE, según los diferentes escenarios previamente mencionados.



**Figura 1.6** Evolución del parque de vehículos eléctricos en España (millones de vehículos; entre paréntesis % de ventas de VE sobre el total) [11].

### 1.2.1 Sistemas de almacenamiento de energía

Como escenarios futuros también cabe destacar la gran cantidad de estudios que se están llevando a cabo actualmente en el desarrollo de nuevas tecnologías de baterías, capaces de dotar a los VE de una mayor autonomía y de una mayor seguridad de funcionamiento.

- Batería de Aluminio-aire: consideradas “pilas de combustible” por la necesidad de sustituir los electrodos de metal gastados por unos nuevos. Con una capacidad de almacenamiento de hasta diez veces más que las de tipo Ion-litio y una densidad energética fuera del alcance del resto, este tipo de batería no ha tenido una buena aceptación comercial debido a sus problemas de recarga y de fiabilidad. Se encuentran en fase experimental.
- Batería Zinc-Aire: desarrolladas por una compañía suiza, y en fase experimental, pero más avanzada que las de Aluminio-Aire, estas baterías necesitan obtener el oxígeno de la atmósfera para generar una corriente. Tiene un alto potencial energético, fiabilidad y son capaces de almacenar el triple de energía que las de Ion-litio en el mismo volumen y con la mitad del coste. Según algunos expertos, el zinc se posiciona como el combustible eléctrico del futuro.

Otra importante evolución de las baterías de litio sería pasar de los iones de litio al litio metal, protegido contra la corrosión.

Una nueva tecnología en la que se está trabajando actualmente pero también requiere de mucho trabajo y paciencia antes de poder ser vista en el mercado del VE son las baterías de ión litio en estado sólido, las cuales prometen ser el futuro de la carga rápida. Dichas baterías serán de menor

tamaño, de mayor capacidad y más baratas que las baterías líquidas actuales, además de inflamables y, en teoría, de mayor vida útil.

### **1.3 Objetivos del trabajo**

El objetivo de este trabajo es analizar un escenario de un aparcamiento de 100 vehículos eléctricos. Se analiza desde el punto de vista actual y considerando su rentabilidad actual y en un plazo de 7 años. La generalización del VE no generará grandes problemas al sistema de generación eléctrica, muy sobredimensionado. Sin embargo, conllevará una incidencia importante en la red de distribución, con bastante menos margen para absorber las nuevas necesidades de consumo. En su mayoría el problema se producirá por la elevación de los picos de consumo. Se analiza en el trabajo los medios para desplazar los consumos a periodos en los que causen menos problemas. Se utilizan dos herramientas para el desplazamiento temporal de los consumos, una de ellas es el uso de temporización para la carga de los vehículos lentos, la otra es el uso de un sistema de baterías que pueda absorber energía cuando esta es excedente y devolverla en los momentos más adecuados (pudiendo coincidir con la carga rápida de algunos vehículos).

Se persiguen dos **objetivos**:

- El primero es reducir la demanda máxima de la red, lo cual permitiría en algunos casos que la red existente fuera suficiente y no hubiera que acometer ampliaciones para reforzar la red de distribución.

- El segundo objetivo es económico y se obtiene la reducción de los costes por los dos términos en se divide la factura eléctrica. Se puede reducir la cuota de potencia, por lo indicado en el párrafo anterior y el coste de la energía, al consumir en horas con un menor coste. Entre los muchos escenarios que podrían estudiarse, se han seleccionado los más representativos para dar una visión global del problema y sus soluciones. Con la metodología utilizada en este trabajo es relativamente fácil considerar algún otro escenario particular que aparezca en un futuro.





## 2 Impacto del vehículo eléctrico en núcleos residenciales

---

El sector residencial es un sector clave en el contexto energético actual, tanto nacional como comunitario, debido a la importancia que reviste sus necesidades energéticas, que, en España, y en términos de energía final, significan el 17% del consumo final total y el 25% de la demanda de energía eléctrica. Diversos factores explican la representatividad y la tendencia al alza de sus consumos energéticos, tales como el incremento del número de hogares, el mayor confort requerido por los mismos y, consecuentemente, el aumento de equipamiento. Todo ello, propiciado por los incrementos de la capacidad de poder adquisitivo y una mejora del nivel de vida, hacen prever unas tendencias futuras al alza en cuanto a la representatividad del sector residencial en la demanda energética.

Para llevar a cabo este estudio se han tenido en cuenta las demandas que ya estarían presentes en los núcleos residenciales, como sería la clásica demanda doméstica, y se ha realizado un estudio de la influencia que tendría en la demanda de energía la carga de los vehículos eléctricos. Para dicho estudio se ha tenido en cuenta la posibilidad de usar dos tipos diferentes de carga, la carga lenta y la carga rápida, que se comentarán a continuación.

### 2.1 Demanda doméstica

Este tipo de demanda consiste en todos los consumos presentes en las viviendas, siendo el consumo de electricidad medio por hogar 3.487kW. Como ya se ha comentado previamente, este consumo supone el 25% de la demanda de energía eléctrica, por lo que tiene un enorme peso en la red.

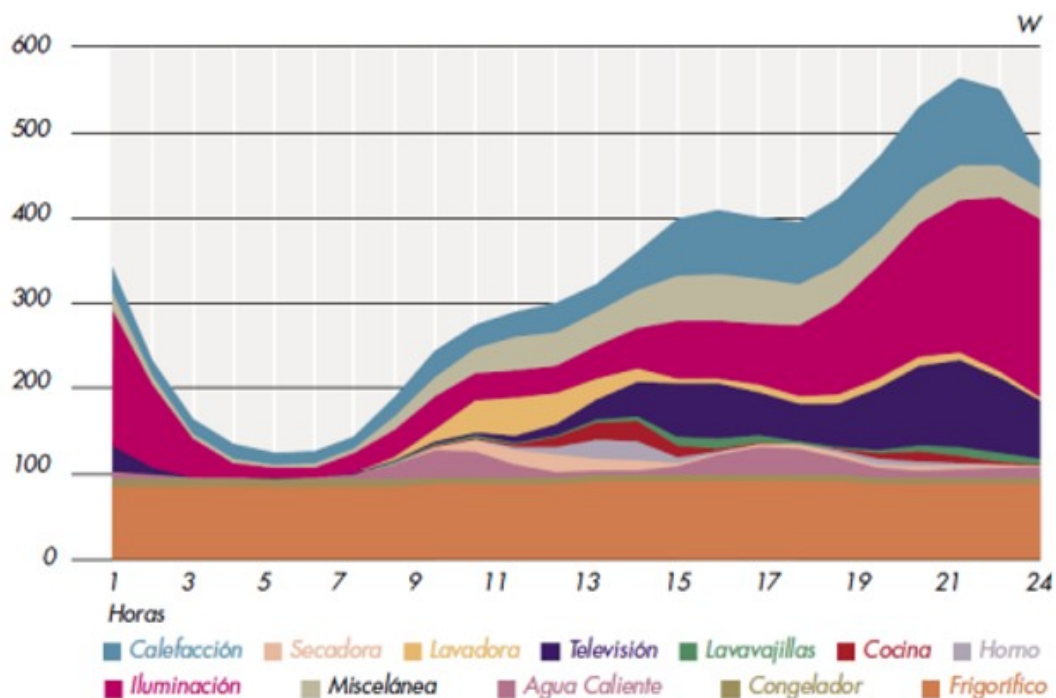
La estructura del consumo total según servicios, obtenido del IDAE [4], sería el siguiente:

<b>Calefacción:</b>	<b>47,0%</b>
<b>ACS:</b>	<b>18,9%</b>
<b>Cocina:</b>	<b>7,4%</b>
<b>Refrigeración:</b>	<b>0,8%</b>
<b>Iluminación:</b>	<b>4,1%</b>
<b>Electrodomésticos:</b>	<b>19,4%</b>
<b>Standby:</b>	<b>2,3%</b>

A continuación, se puede ver una idea del consumo medio de iluminación y electrodomésticos:

<b>Iluminación:</b>	<b>410 kWh/hogar</b>
<b>Frigorífico:</b>	<b>655 kWh/eq.</b>
<b>Lavadora:</b>	<b>254 kWh/eq.</b>
<b>Lavavajillas:</b>	<b>245 kWh/eq.</b>
<b>TV:</b>	<b>119 kWh/eq.</b>
<b>Ordenador:</b>	<b>145 kWh/eq.</b>

Para la obtención de las curvas de demanda doméstica el modo de proceder ha sido la obtención de la forma de la curva del estudio previo realizado por el proyecto INDEL[1], de Red Eléctrica de España, y representar la demanda mediante el uso de un factor de escala. Se opta por elegir la curva de carga en un día laborable de invierno, ya que en invierno se presentan unos picos de consumo más marcados que en el caso del resto de las estaciones. En invierno el pico de consumo se presenta alrededor de las 21 de la noche. A continuación se puede observar la curva mencionada, Fig. 2.1.



**Figura 2.1** Curva de carga del hogar medio en un día laborable de invierno[1].

El mencionado factor de escala servirá para, teniendo el dato del consumo de energía medio por hogar anual, poder obtener el consumo de energía medio diario, y así poder representar la curva de consumo. Lo que se hará además será escalar la curva para que el pico de consumo sea el pico clásico en una vivienda media, como podría ser 5 kW (se elige una potencia contratada por vivienda de 5.5kW).

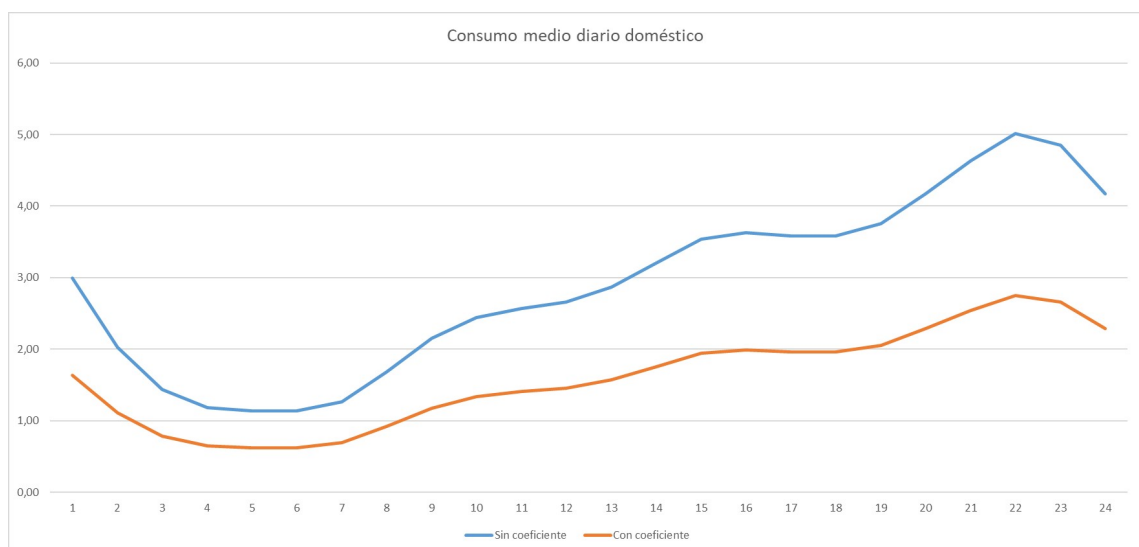
Para finalizar con la representación de la demanda doméstica se ha tenido en cuenta que, al ser un núcleo residencial de 100 domicilios no sería realista considerar que la curva de consumo obtenida tenga lugar a la misma vez en todos los domicilios. Para plantear un escenario más realista se aplica un factor de simultaneidad. Dicho factor se obtiene de la Guía de BT-10 [2], apartado 3, y se puede observar en la Fig. 2.2.

Nº Viviendas (n)	Coefficiente de Simultaneidad
1	1
2	2
3	3
4	3,8
5	4,6
6	5,4
7	6,2
8	7
9	7,8
10	8,5
11	9,2
12	9,9
13	10,6
14	11,3
15	11,9
16	12,5
17	13,1
18	13,7
19	14,3
20	14,8
21	15,3
n>21	15,3+(n-21).0,5

**Figura 2.2** Coeficiente de simultaneidad, según el número de viviendas[2].

En este caso se obtiene un coeficiente de simultaneidad de 0.548, lo cual disminuye destacablemente el consumo mencionado previamente.

A continuación, se puede ver la curva obtenida (Fig. 2.3), de consumo medio diario doméstico, para una vivienda. La curva que se usará en el trabajo será la de consumo total del edificio (Fig. 2.4), afectada por el coeficiente (curva naranja).



**Figura 2.3** Consumo medio diario doméstico.

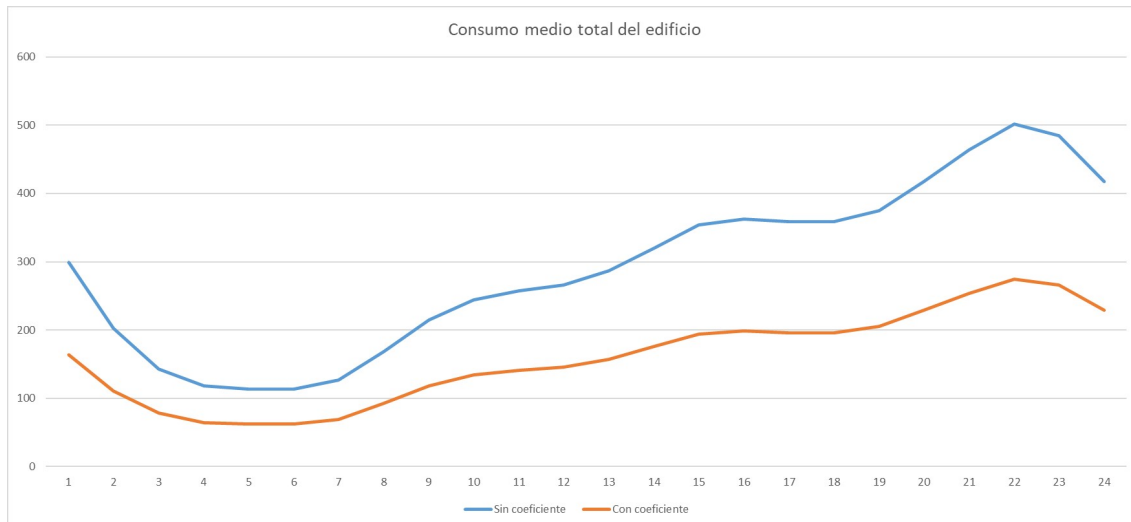


Figura 2.4 Consumo medio total del edificio.

## 2.2 Carga lenta del VE

Este tipo de carga será la más usual ya que el vehículo se enchufará a la vuelta al domicilio. La carga lenta, que precisa de una potencia de entre 2,3 y 7,3 kW, está pensada para estacionamientos de larga duración en los que el vehículo podría tardar en cargar entre 4 y 12 horas. En este caso se realizará una carga lenta en el propio domicilio, situando los puntos de carga en los propios aparcamientos de los VE. Dicha carga se plantea para ser realizada durante las horas nocturnas, que será cuando el VE no será utilizado.

Para poder analizar el impacto de los VE en la red es necesario un modelo de la curva de carga. La Fig. 2.5 representa la curva de carga de una batería ión-litio:

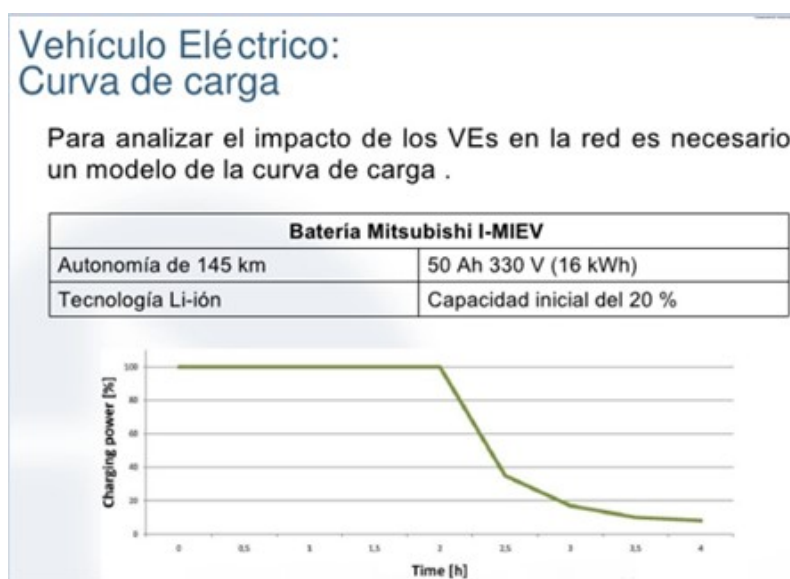


Figura 2.5 Curva de carga lenta del VE[3].

Como se puede observar, al final del periodo de carga tiene una disminución de la potencia

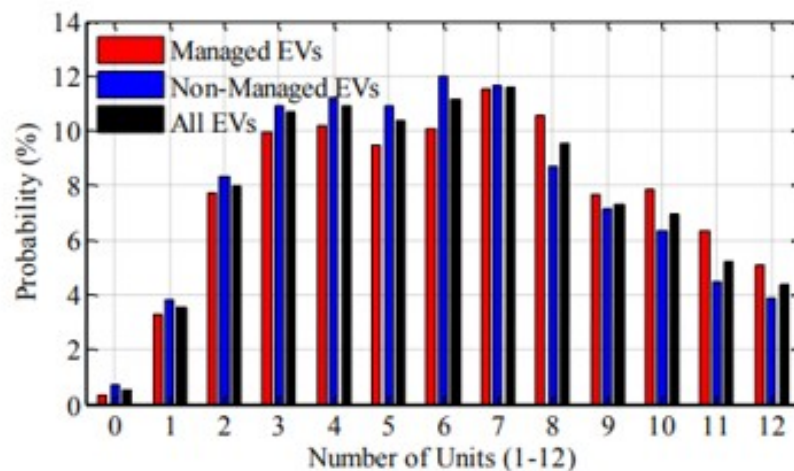
de carga, pero para este estudio se ha aproximado a un valor constante. Se ha optado por esta aproximación ya que al estar presente un gran número de VE en el estudio con diferentes horas de conexión y diferentes estados de carga al comienzo de la carga, el error no es casi perceptible en el estudio económico. Para otros estudios más precisos, que implicaran un reducido número de vehículos, habría que tener en cuenta la disminución lenta de potencia al final de la carga.

En este modelo el núcleo residencial dispondrá de 100 VE, con una batería cada uno de 30 kWh. Se usará un cargador de 3kW, por lo que una carga completa requeriría de 10 horas de carga. El coche modelo elegido será un Nissan Leaf, y dicho vehículo representa el SOC en 12 unidades de carga, correspondiendo cada unidad con 50 minutos de carga.

Para modelar la carga lenta es necesario conocer el nivel de carga esperado al comienzo del proceso de carga del VE, para lo cual fue muy útil el trabajo “Model Validation and Data Analysis” de Nando Ochoa [6]. En dicho trabajo se hacía una enorme recopilación de datos de carga de VE, y en concreto se consiguieron datos de la probabilidad existente de que un VE se conectase a la red para la carga según su nivel de SOC. Dicho estudio fue realizado para Reino Unido, pero la información es extrapolable para el comportamiento de España.

En dicho estudio [6] se proporciona información muy interesante del comportamiento de los usuarios de EVs, como por ejemplo que la mayoría de los usuarios conectan su coche cuando el SOC está entre 3 y 8 unidades de carga de las mencionadas previamente, y que en más del 60% de los casos los vehículos son cargados hasta alcanzar el 100%. Esto último podría deberse a la carga nocturna. También se menciona en el estudio que la gran mayoría de los usuarios realizan la carga únicamente una vez al día.

La gráfica mencionada (probabilidad frente a SOC) puede verse en la Fig. 2.6.



**Figura 2.6** Probabilidad de conexión del VE según su estado de SOC [6].

Se han utilizado los valores para “all EVs”, que incluirán a los VE para los cuales se controla en el estudio la hora de conexión a la red y los VE para los cuales dicha hora no es controlada, se deja a elección del usuario. Con estos valores y la potencia de carga del VE elegido se obtiene, para cada hora del día, la potencia consumida de la red. Se ha decidido dar libertad para elegir la hora de conexión de los VE, ya que en este estudio se realiza la conexión simultánea de los VE, pero podría ser realizado de forma que se repartan las conexiones a lo largo de la noche.

El estudio se realizará para intervalos de 15 minutos, ya que se considera que disminuir el intervalo temporal no mejora el resultado significativamente.

En la Fig 2.7 se puede ver un ejemplo de dicha carga, con conexión a las 4:00h.

Evidentemente se observa que el consumo va disminuyendo, ya que los VE que comenzaron la carga con un SOC elevado finalizarán antes su carga, dejando de consumir energía de la red.

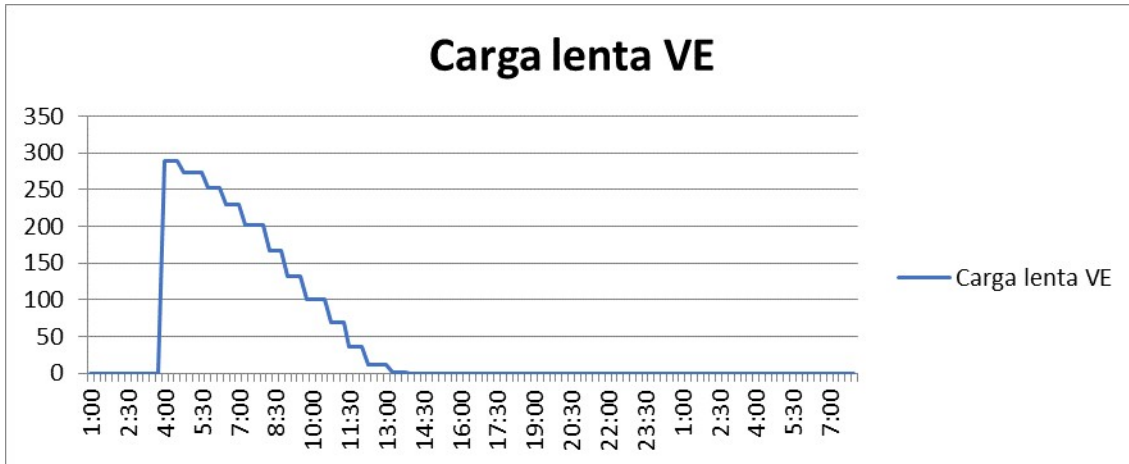


Figura 2.7 Ejemplo sin decalaje para conexión a las 4:00h.

## 2.3 Carga rápida

En la recarga rápida, la potencia que se demanda es muy alta, entre 44 y 50 kW. La recarga de esos 30 kWh de baterías puede llevar media hora. Lo normal es que no se haga una recarga del 100% sino en torno al 80% o 90%.

Para el modelo de la carga rápida del VE se ha partido de la curva de carga, que se puede ver en la Fig. 2.8.

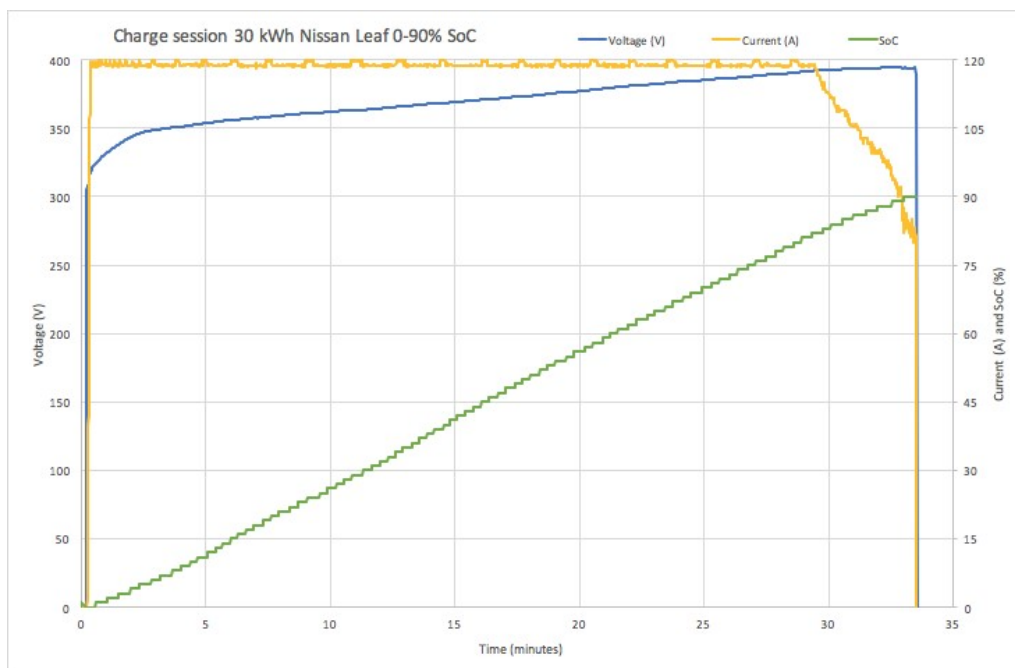


Figura 2.8 Curva de carga rápida del VE[8].

Para el caso de la carga rápida la curva de carga es bastante diferente, ya que es mucho más aproximable a un valor constante sin dar prácticamente lugar a errores. Para este tipo de carga se ha elegido un cargador de 50 kW, y se asumirá que todos los coches llegarán al 0% de SOC al momento de la carga, por lo que en 30 minutos se habrá completado una carga completa, aproximadamente.

En este modelo se ha planteado que la batería debe ser capaz de compensar la carga rápida de 5 VEs. Para mayor realismo habrá una conexión de 2 VEs en el pico de consumo de la mañana y 3 VEs en el pico de consumo de la tarde. Lo comentado se observa en la Fig. 2.9.

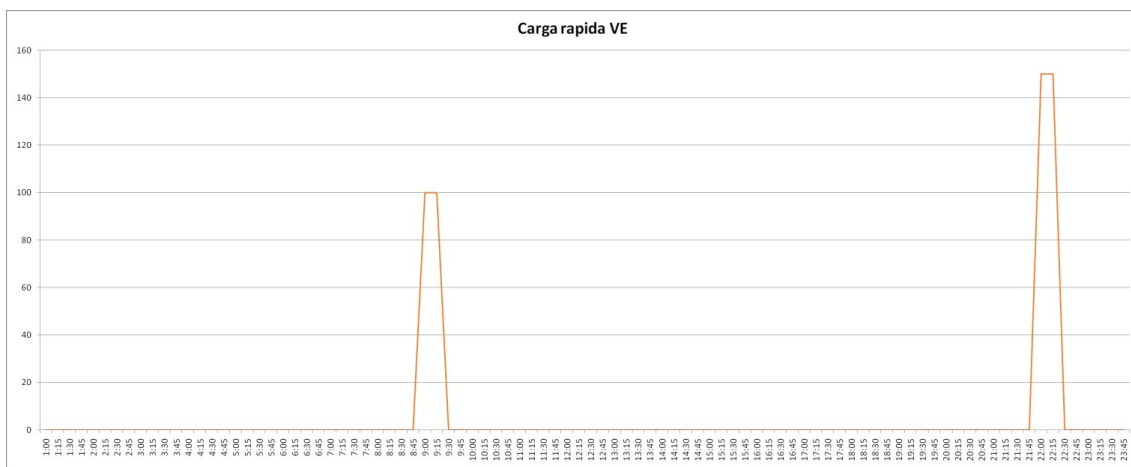


Figura 2.9 Demanda debida a la carga rápida del VE.

De esta representación se pueden observar los picos de consumo que generaría la carga rápida de 5 VEs.

En la Fig 2.10, se puede ver un cuadro resumen de los tipos de cargas existentes, centrándose este estudio en la normal y en la rápida.

Tipo	Recarga Normal	Recarga Semi-rápida	Recarga Rápida	Recarga Super-rápida	Recarga Ultra-rápida (experimental)
Potencia de conexión	3,7 kW	7,3 kW	45 kW	100 – 150 kW	150 – 350 kW
Tiempo de recarga <sup>(1)</sup>	6 – 10 h	3 - 4h	~30 min <sup>(2)</sup>	~20 min <sup>(2)</sup>	~5 - 10 min
Coste de inversión unitario (k€/poste)	0,5-1,5	2,5-15	40-80	100-200	N/A
Utilización prioritaria	Carga utilizada en garajes particulares, puede conectarse a la red de distribución de baja tensión	Carga utilizada en la vía pública y en algunas viviendas habilitadas para suministrar la potencia necesaria	Carga utilizada en la vía pública y en autopistas y carreteras que se conecta a la red de distribución	Carga utilizada en en autopistas y carreteras en aquellos puntos habilitados para suministrar la potencia necesaria	Carga experimental actualmente; en el futuro deberá asemejarse a la función y prestaciones de las actuales gasolineras

(1) Tiempo de recarga estimado para la recarga de una batería de 21 kWh

(2) Recarga del 80% de la capacidad de una batería de 21 kWh. El 20% restante requeriría el doble de tiempo

Fuente: análisis de prensa; AEDIVE; análisis Monitor Deloitte

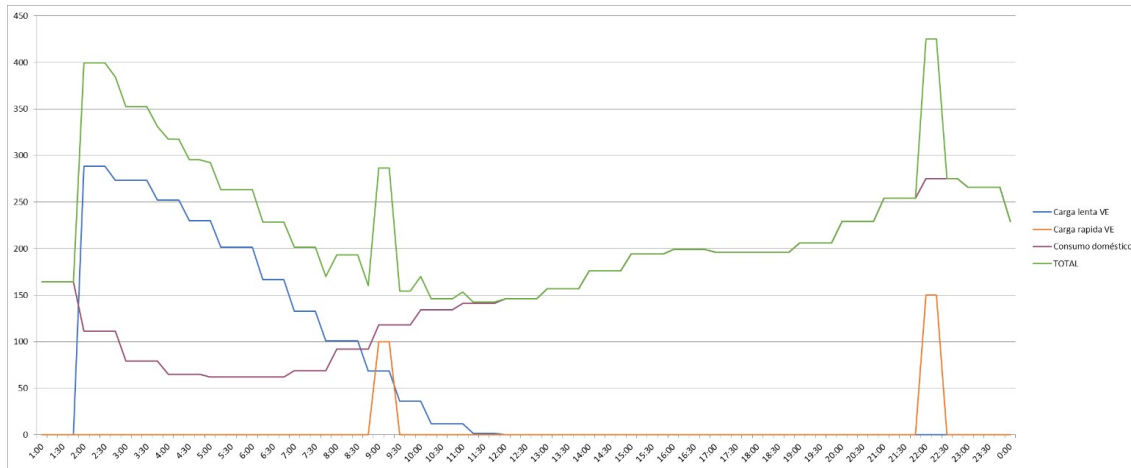
Figura 2.10 Tipología de infraestructura de recarga conductiva en función de la velocidad de recarga[11].



## 2.4 Curvas agregadas en un núcleo residencial

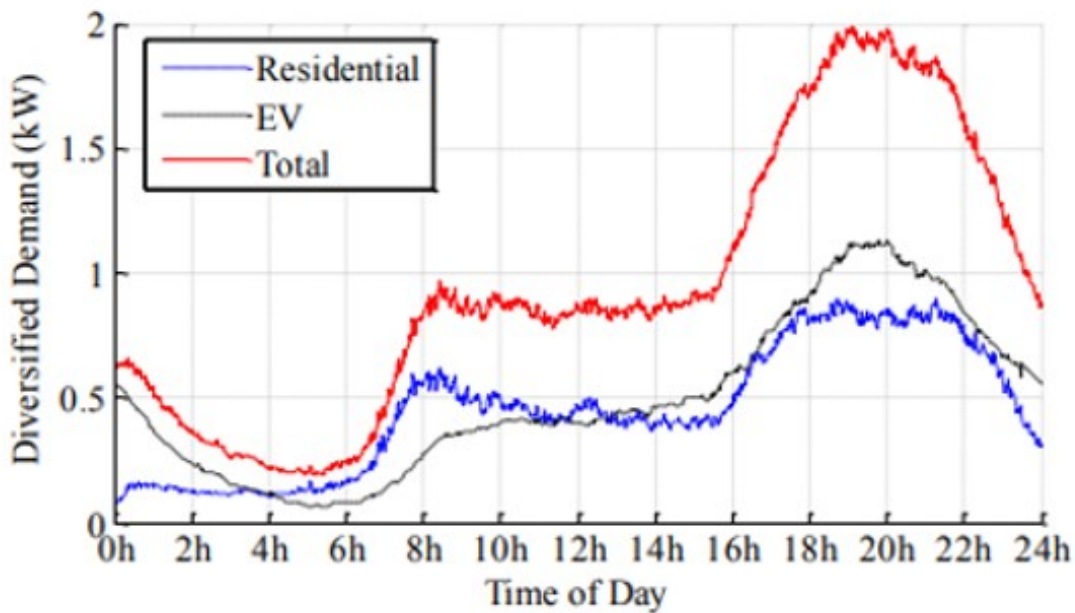
Para un estudio conjunto de los consumos residenciales se realizó una curva que agregase todas las mencionadas previamente (Fig 2.11).

Se considera como hora de comienzo de la carga lenta la 1:00h, y la carga rápida a las 9 y a las 22h.



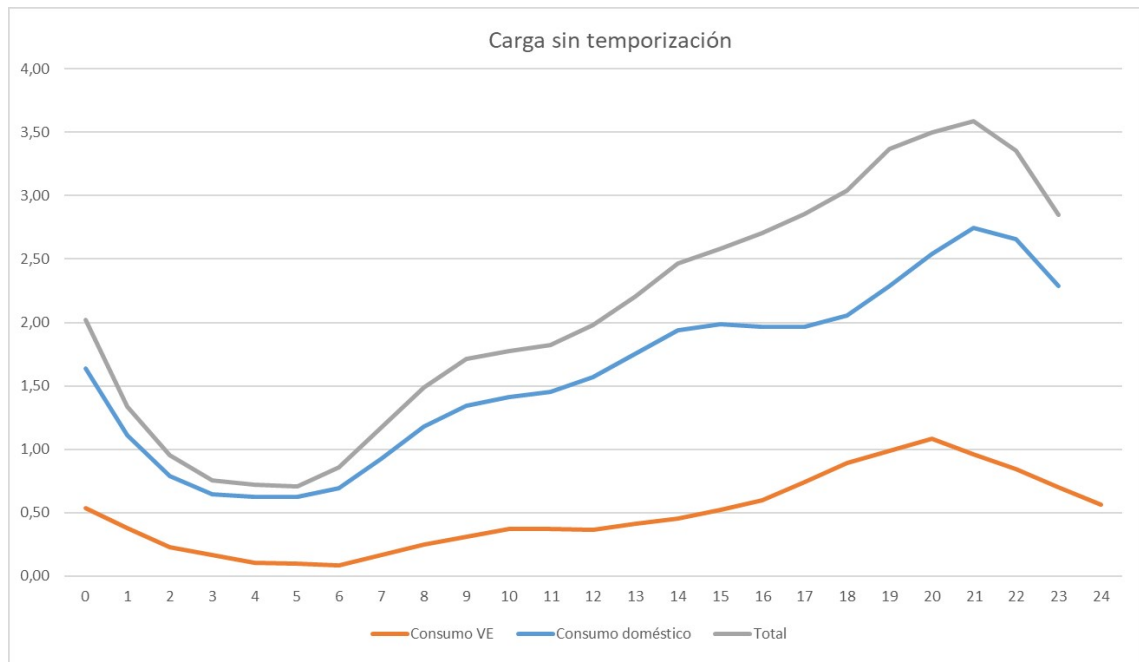
**Figura 2.11** Curva agregada de las demandas mencionadas.

Es muy importante que se lleve a cabo un control de dichas demandas, dentro de lo posible, ya que una carga de los VE sin ningún control podría suponer un enorme problema para la red. Para una primera idea de cómo afectaría al sistema dicho escenario se usó el perfil diversificado del mismo trabajo mencionado de Nando Ochoa [6], en el que se puede observar la Fig. 2.12:



**Figura 2.12** Conexión VE sin temporización[6].

De dicha gráfica se obtuvieron los consumos de EV (en ese caso dichas cargas fueron realizadas sin ningún tipo de control, a libre elección del usuario, como se puede ver por las horas en las cuales hay mayores niveles de carga), y lo agregamos al consumo doméstico ya obtenido. En la Fig. 2.13 se puede ver lo mencionado, para una vivienda y un VE.



**Figura 2.13** Conexión VE sin temporización.

Como se puede observar, la carga del VE realizada de esta forma no sería la opción más acertada, ya que aumenta bastante los problemáticos y ya mencionados picos de consumo. Lo más lógico sería una carga nocturna, más barata, que nos ayudase a aplanar la curva de consumo. Para disponer de una carga nocturna sería necesario el uso de temporizadores, escenario que será estudiado en apartados posteriores.



## 3 Modelo de Optimización

---

Para el modelo de optimización realizado se ha optado por el uso de GAMS[13], por su facilidad de uso para el nivel del modelo que se necesitaba diseñar. GAMS fue el primer software en combinar el álgebra matemática con conceptos tradicionales de programación, para lograr una descripción y resolución eficiente de problemas de optimización. Hoy en día, el modelado algebraico se considera la forma más productiva de implementar modelos de optimización y métodos de descomposición para problemas de optimización.

El modelo realizado tiene como objetivo minimizar costes, y para ello se han introducido las ecuaciones que definirán el problema, ciertas restricciones al problema y la función objetivo del trabajo. El coste que se tratará de minimizar será el coste diario por potencia y energía, ya que se ha tenido en cuenta en el problema el coste que habría que pagar por término de potencia. Este modelo requerirá de ciertos datos de entrada, algunos definidos en el propio modelo y otros calculados previamente e introducidos mediante tablas. Dichos datos (definidos en cada instante de tiempo) serán:

- Precio de la energía: precio del mercado mayorista de un día tipo. En nuestro caso se eligió un día laborable de enero de 2016.
- Demanda doméstica.
- Demanda carga lenta de los VE.
- Demanda carga rápida de los VE.

En este caso, como en todos los estudios previos realizados de la demanda, se ha optado por trabajar en intervalos de tiempo de 15 minutos, para mayor precisión en las demandas. Esto se debe a que al existir cargas tan rápidas y puntuales como sería la carga rápida de los VE no sería representativo el estudio en intervalos horarios.

El mencionado **modelo** puede verse en el Anexo A, siendo las ecuaciones que definen el modelo matemático las siguientes (3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5). La ecuación 3.1 será la función objetivo.

- **Ecuación costes:** incluye el coste diario por potencia y por energía.

$$Coste = \sum_t \frac{precio(t)}{1000} \frac{p_g(t)}{4} + p_{gmax} \frac{3.4297}{30.5} \quad (3.1)$$

El término 3.4297 será el TP elegido en este trabajo, por ser un valor medio en el mercado actual.

- **Ecuación balance:** se exige que la potencia demandada siempre sea menor a la generada por la red más la potencia que descarga la batería menos la que consume para su propia carga. Esta ecuación logra que siempre esté cubierta la demanda.

$$p_{dem}(t) \leq p_g(t) + p_d(t) - p_c(t) \quad \forall t \quad (3.2)$$

- **Ecuación potencia demandada:** dicha potencia incluirá el consumo doméstico, la carga lenta y la carga rápida de los VE.

$$p_{dem}(t) = p_{dom}(t) + p_{lento}(t) + p_{rapido}(t) \quad \forall t \quad (3.3)$$

- **Ecuación SOC:** representa la evolución del estado de carga de la batería a lo largo del tiempo, y se verá afectada por la carga y la descarga de la batería.

$$soc(t) = soc(t-1) + \frac{p_c(t)}{4} \eta_c - \frac{p_d(t)}{4} \eta_d \quad \forall t \quad (3.4)$$

- **Ecuación potencia generada máxima:** su función es limitar el consumo máximo de la red. Dicha potencia generada corresponderá a un generador ficticio que representará a la red eléctrica de la compañía distribuidora.

$$p_g(t) \leq p_{gmax} \quad \forall t \quad (3.5)$$

El modelo tal como está definido en el trabajo es un problema de optimización no lineal (NLP) que se resuelve utilizando un solver adecuado (en este caso se optó por CONOPT, pero GAMS da la opción de utilizar una gran variedad de solvers).

Con este modelo se estudiarán diversos escenarios de consumo y se obtendrá la solución óptima para cada uno de ellos. Gracias a la información que proporcionarán las simulaciones se realizarán estudios económicos y de viabilidad del proyecto.



## 4 Resultados

---

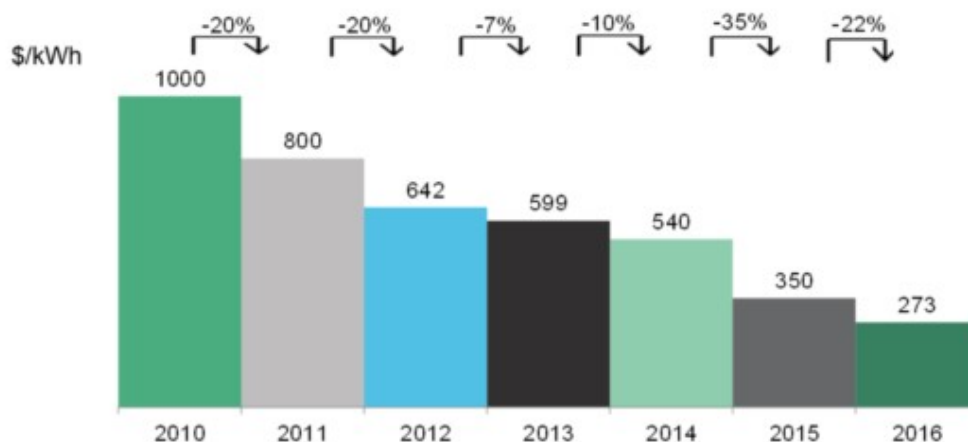
### 4.1 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento

Una de las decisiones más importantes a la hora de realizar un estudio como este es el dimensionamiento del sistema de almacenamiento, ya que es un elemento que a día de hoy sigue teniendo un coste bastante elevado. Cabe destacar que el precio de las baterías de ión litio ha experimentado una gran disminución en los últimos años, como puede verse en la imagen posterior, por lo que en este trabajo se mostrarán también los ahorros que se alcanzarían en el 2025 como consecuencia de dicha caída de los precios.

El tipo de batería que alimenta los VE ha alcanzado en la actualidad el valor más bajo gracias al aumento exponencial que ha sufrido su producción en todo el mundo. Los packs de baterías de ión litio se venden a un precio medio de 180€ el kWh, un 25% menos que hace un año y aproximadamente un quinto del precio que tenía en 2010, según muestra un estudio de Bloomberg New Energy Finance (BNEF)[9]. Dicho estudio afirma que esa tasa va a tender a caer aún más, alcanzando un precio por debajo de 85€ el kWh para el año 2025. Según la BNEF dicho precio es ampliamente visto como un punto de inflexión en la integración del VE.

En la Fig. 4.1 se puede ver la evolución de precios de dichas baterías entre los años 2010 y 2016.

**BNEF lithium-ion battery price survey, 2010-16 (\$/kWh)**



**Figura 4.1** Disminución de precios de las baterías de ión litio[9].

El primer criterio que se tuvo en cuenta para dimensionar la batería fue que fuera capaz de suministrar la carga rápida simultánea de 5 coches. Si la carga rápida dura menos de una hora, 250kWh de energía son suficientes. Para cumplir con ese criterio es necesario utilizar una batería que, como mínimo, tenga de potencia 250kW, ya que cada coche necesitaría de una potencia de 50kW para poder realizar su carga en modo rápido. Por lo tanto, se decide utilizar una batería de  $E=250\text{kWh}$  y  $P=250\text{kW}$ . Con dicha batería se consigue cumplir con dicho objetivo y además se consigue ahorro debido al buen uso de la energía que proporciona la batería. Todo esto se ampliará posteriormente, cuando se estudie cada escenario.

Para dicho dimensionamiento también se ha estudiado en cada escenario la opción más adecuada para el mismo, ya que, pese a que el comentado es un buen criterio de diseño, hay que tener en cuenta qué tamaño de batería daría mayor ahorro global para cada caso concreto. Dicho ahorro estará formado por el ahorro en energía que se consigue por la descarga de la batería en las horas de mayor precio, y por el ahorro en potencia, ya que al disponer de ese almacenamiento de energía no necesitaremos una potencia contratada tan elevada. En este trabajo tomaremos una batería con rendimientos de carga y de descarga de 0.95, ya que es un rendimiento realista que una batería actual podría alcanzar.

## 4.2 Escenarios estudiados

Como ya se ha comentado previamente en el trabajo, la libre decisión del usuario de cuándo realizar la carga de sus vehículos es una opción que podría ser válida cuando hablamos de pequeños conjuntos de VEs. De los aumentos de consumo que provocarían en los picos de demanda dicha carga libre de 100 VEs, mostrados en los apartados anteriores, se podrían extrapolar los enormes efectos que dicha carga provocaría si se cumpliesen las predicciones futuras de VEs en circulación. Dichos efectos no podrían ser soportados por la red de distribución actual española, ya que superaría el consumo para el cual está diseñada y habría que hacer un rediseño de todo el sistema, lo cual no sería la opción más sencilla. La mejor opción para el sistema sería el uso de temporizadores, con los cuales se pueda decidir la hora de conexión del VE para la carga lenta, en este caso. Esto tendrá la ventaja de que evitará la carga en las horas de mayor consumo, que son además las horas en las cuales la energía presenta un precio más elevado.

El uso de temporizadores no sólo presenta las ventajas ya mencionadas, sino que además colabora en la mejora de la curva de demanda ya que podría ayudar a aplanar dicha curva. Una curva de demanda prácticamente plana es lo que se persigue en todo sistema eléctrico, ya que permitiría evitar los poco deseados picos y valles en la demanda que provocan que haya una fluctuación en la generación, ya sea debida a un exceso o una escasez de energía.

En este trabajo se va a estudiar, por tanto, el caso con temporizadores y también se comentarán varios escenarios en el caso de que se decidiese prescindir del temporizador.

Todas las demandas que aparecerán en las tablas siguientes han sido obtenidas, como ya se mencionó previamente, del estudio realizado de cada tipo de demanda. Con dichas demandas se realizará, en cada escenario, el dimensionamiento más adecuado y los ahorros que se obtendrían por la adquisición de la batería, la cual se ha considerado con una vida útil de 8 años. Se realiza, por tanto, una comparativa de ahorro en el coste de la energía entre el caso sin batería y el caso con batería.

Dicho ahorro estará compuesto por el ahorro en energía, ya que la existencia de la batería permitirá que descargue en las horas de mayor precio y cargue en las horas más baratas, beneficiando al consumidor, y el ahorro en término de potencia, siendo este último de gran peso en nuestro estudio. Se obtiene una disminución en la necesidad de potencia contratada ya que la batería podrá suministrar la potencia que, en ausencia de ella, tendría que ser suministrada por la red, por lo que se podrá contratar una potencia menor, dando lugar a un ahorro a largo plazo muy destacable. Como beneficio



añadido, dicha disminución de la potencia consumida ayudaría a disminuir el problema de capacidad de la red de distribución.

En este trabajo se desprecia el deterioro por uso de la batería, factor que habría que tener en cuenta en un estudio realizado más a fondo.

A continuación, en la tabla 4.1, se muestra un resumen de los diferentes escenarios estudiados:

**Tabla 4.1** Tabla resumen escenarios.

Denominación	Temporización	Carga rápida
C1	Sí	Conexión 5 EVs simultáneamente
C2	Sí	Conexión 5 EVs simultáneamente
C3	Sí	Conexión 2 + 3 EVs
C4	Sí	Conexión 2 + 3 EVs
S1	No	Conexión 5 EVs simultáneamente
S2	No	Conexión 2 + 3 EVs

### Con temporizador

**Conexión 5 EVs simultáneamente:** el pico de demanda se daría a las 22h, y su valor sería de 525kW.

- **Escenario C1:** En el caso de que se exija que la batería sea capaz de suministrar la energía consumida por la conexión de los 5 coches en la hora de mayor consumo: se usa una batería de 250kWh, por los motivos ya comentados.

Se ven, en la tabla 4.2, las demandas presentes y la actuación de la batería elegida, de 250kWh. Los elementos presentes en dicha tabla (y en las posteriores) son los siguientes:

- Dom: consumo doméstico calculado previamente.
- Lento: consumo de los VE en modo de carga lenta.
- Rápido: consumo de los VE en modo de carga rápida.
- Total pdem: suma de los consumos anteriores.
- Pgen red: potencia generada por la red.
- Carga: potencia que requiere de la red la batería para su carga.
- Descarga: potencia que devuelve a la red la batería en su descarga.

Todos los elementos comentados se expresarán en kW.

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t1	164	0	0	164	309,33	145,33	0
t2	164	0	0	164	309,33	145,33	0
t3	164	0	0	164	309,33	145,33	0
t4	164	0	0	164	309,33	145,33	0
t5	111	288,62	0	399,62	309,33	0	90,29
t6	111	288,62	0	399,62	309,33	0	90,29
t7	111	288,62	0	399,62	309,33	0	90,29
t8	111	273,2	0	384,2	309,33	0	74,87
t9	79	273,2	0	352,2	309,33	0	42,87
t10	79	273,2	0	352,2	309,33	0	42,87
t11	79	273,2	0	352,2	309,33	0	42,87
t12	79	252,19	0	331,19	309,33	0	21,85
t13	65	252,19	0	317,19	309,33	0	7,85

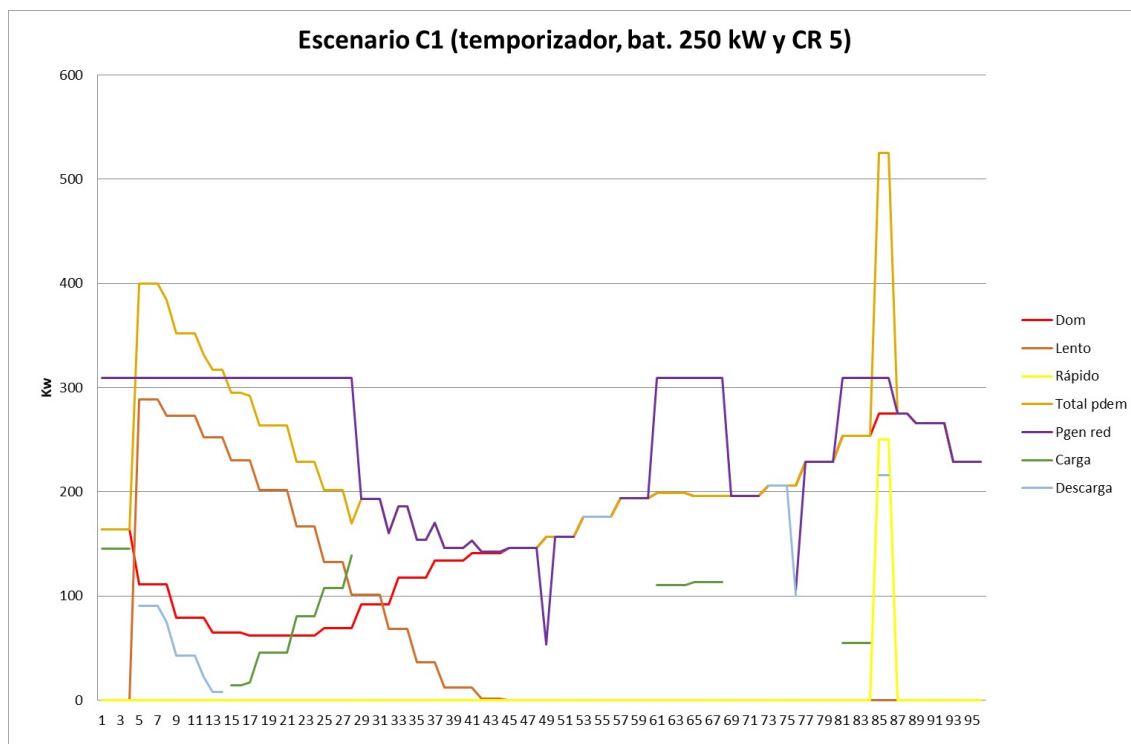
Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t14	65	252,19	0	317,19	309,33	0	7,85
t15	65	230,18	0	295,18	309,33	14,16	0
t16	65	230,18	0	295,18	309,33	14,16	0
t17	62	230,18	0	292,18	309,33	17,16	0
t18	62	201,58	0	263,58	309,33	45,76	0
t19	62	201,58	0	263,58	309,33	45,76	0
t20	62	201,58	0	263,58	309,33	45,76	0
t21	62	201,58	0	263,58	309,33	45,76	0
t22	62	166,51	0	228,51	309,33	80,82	0
t23	62	166,51	0	228,51	309,33	80,82	0
t24	62	166,51	0	228,51	309,33	80,82	0
t25	69	132,68	0	201,68	309,33	107,65	0
t26	69	132,68	0	201,68	309,33	107,65	0
t27	69	132,68	0	201,68	309,33	107,65	0
t28	69	100,97	0	169,97	309,33	139,36	0
t29	92	100,97	0	192,97	192,97	0	0
t30	92	100,97	0	192,97	192,97	0	0
t31	92	100,97	0	192,97	192,97	0	0
t32	92	68,27	0	160,27	160,27	0	0
t33	118	68,27	0	186,27	186,27	0	0
t34	118	68,27	0	186,27	186,27	0	0
t35	118	36,19	0	154,19	154,19	0	0
t36	118	36,19	0	154,19	154,19	0	0
t37	134	36,19	0	170,19	170,19	0	0
t38	134	12,19	0	146,19	146,19	0	0
t39	134	12,19	0	146,19	146,19	0	0
t40	134	12,19	0	146,19	146,19	0	0
t41	141	12,19	0	153,19	153,19	0	0
t42	141	1,62	0	142,62	142,62	0	0
t43	141	1,62	0	142,62	142,62	0	0
t44	141	1,62	0	142,62	142,62	0	0
t45	146	0	0	146	146	0	0
t46	146	0	0	146	146	0	0
t47	146	0	0	146	146	0	0
t48	146	0	0	146	146	0	0
t49	157	0	0	157	53,58	0	103,42
t50	157	0	0	157	157	0	0
t51	157	0	0	157	157	0	0
t52	157	0	0	157	157	0	0
t53	176	0	0	176	0	0	176
t54	176	0	0	176	0	0	176
t55	176	0	0	176	0	0	176
t56	176	0	0	176	0	0	176
t57	194	0	0	194	194	0	0
t58	194	0	0	194	194	0	0
t59	194	0	0	194	194	0	0
t60	194	0	0	194	194	0	0

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t61	199	0	0	199	309,33	110,33	0
t62	199	0	0	199	309,33	110,33	0
t63	199	0	0	199	309,33	110,33	0
t64	199	0	0	199	309,33	110,33	0
t65	196	0	0	196	309,33	113,33	0
t66	196	0	0	196	309,33	113,33	0
t67	196	0	0	196	309,33	113,33	0
t68	196	0	0	196	309,33	113,33	0
t69	196	0	0	196	196	0	0
t70	196	0	0	196	196	0	0
t71	196	0	0	196	196	0	0
t72	196	0	0	196	196	0	0
t73	206	0	0	206	0	0	206
t74	206	0	0	206	0	0	206
t75	206	0	0	206	0	0	206
t76	206	0	0	206	105,59	0	100,41
t77	229	0	0	229	229	0	0
t78	229	0	0	229	229	0	0
t79	229	0	0	229	229	0	0
t80	229	0	0	229	229	0	0
t81	254	0	0	254	309,33	55,33	0
t82	254	0	0	254	309,33	55,33	0
t83	254	0	0	254	309,33	55,33	0
t84	254	0	0	254	309,33	55,33	0
t85	275	0	250	525	309,33	0	215,67
t86	275	0	250	525	309,33	0	215,67
t87	275	0	0	275	275	0	0
t88	275	0	0	275	275	0	0
t89	266	0	0	266	266	0	0
t90	266	0	0	266	266	0	0
t91	266	0	0	266	266	0	0
t92	266	0	0	266	266	0	0
t93	229	0	0	229	229	0	0
t94	229	0	0	229	229	0	0
t95	229	0	0	229	229	0	0
t96	229	0	0	229	229	0	0

**Tabla 4.2** Escenario C1. Demandas y actuación batería.

En la Fig. 4.2 se puede observar fácilmente el comportamiento de las diferentes variables presentes en la tabla.

Se realiza la comparativa de la situación con batería frente a la situación sin batería, para una batería de 250 kWh (tabla 4.3). Para el caso con batería se puede disminuir la potencia contratada de 525 kW a 309 kW, proporcionando esto un ahorro destacable.



**Figura 4.2** Escenario C1. Representación gráfica.

**Tabla 4.3** Costes escenario C1.

	Unidad	Caso sin batería	Caso con batería
Potencia contratada	kW	525	309
Coste TP + energía/día	€	289.1689895	257.4347973
Coste TP + energía/año	€	105546.6812	93963.70102
Coste TP + energía/8 años	€	844373.4492	751709.6082

Ahorros (en €) respecto a caso sin batería con el precio actual y con el estimado para 2025 (tabla 4.4):

**Tabla 4.4** Ahorros escenario C1.

Ahorro total anual	11582.98013
Ahorro total 8 años con precio actual	47538.84104
Ahorro total 8 años con precio 2025	71063,84104

Los paybacks de las inversiones mencionadas se ven en la tabla 4.5:

**Tabla 4.5** Paybacks escenario C1.

Payback actual	3.8958	3 años y 10 meses
Payback 2025	1.8648	3 años y 10 meses

Como se puede observar, ambas opciones presentan un payback bastante bueno, teniendo en

cuenta que la vida útil de la batería se considera 8 años (todo el proceso llevaría 9 años, ya que se ha supuesto que la batería se compraría un año y se comenzaría a obtener beneficios a partir del año siguiente).

- **Escenario C2:** En el supuesto caso de que se dimensione la batería únicamente pensando en el ahorro, llegamos a que una batería de 200kWh sería más adecuada como solución.

Se ve a continuación, en la tabla 4.6, las demandas presentes y la actuación de la batería elegida, de 200kWh.

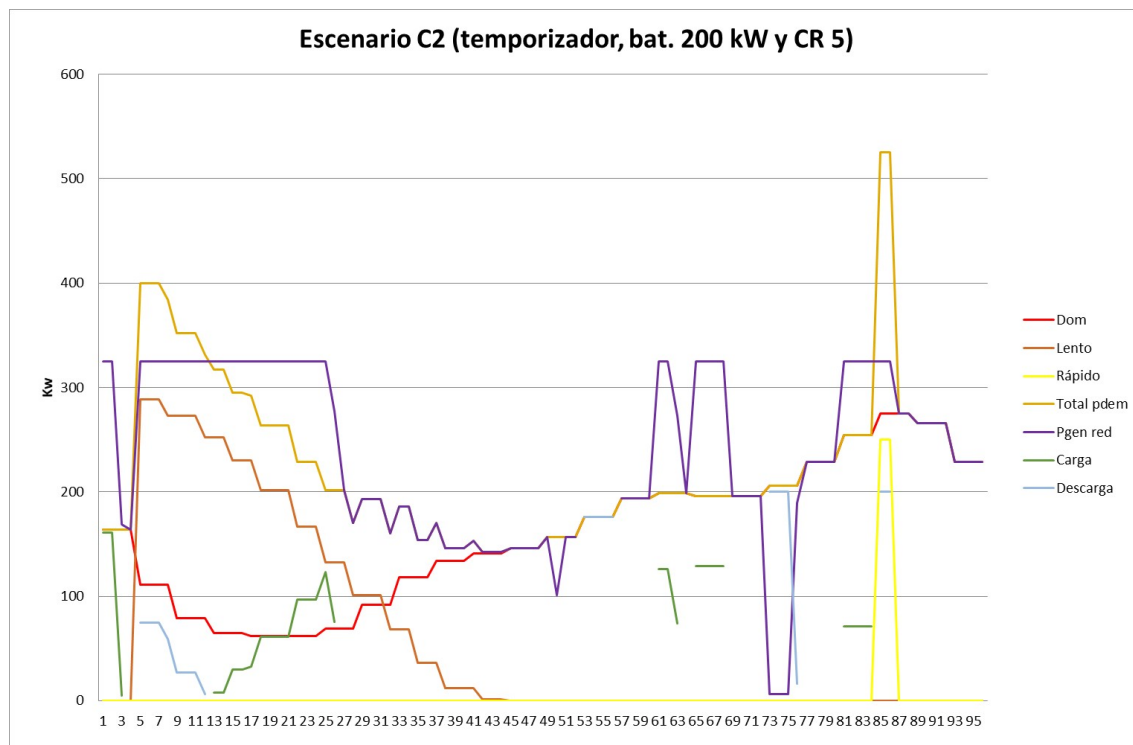
Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t1	164	0	0	164	325	161	0
t2	164	0	0	164	325	161	0
t3	164	0	0	164	168,71	4,71	0
t4	164	0	0	164	164	0	0
t5	111	288,62	0	399,62	325	0	74,62
t6	111	288,62	0	399,62	325	0	74,62
t7	111	288,62	0	399,62	325	0	74,62
t8	111	273,2	0	384,2	325	0	59,2
t9	79	273,2	0	352,2	325	0	27,2
t10	79	273,2	0	352,2	325	0	27,2
t11	79	273,2	0	352,2	325	0	27,2
t12	79	252,19	0	331,19	325	0	6,19
t13	65	252,19	0	317,19	325	7,81	0
t14	65	252,19	0	317,19	325	7,81	0
t15	65	230,18	0	295,18	325	29,82	0
t16	65	230,18	0	295,18	325	29,82	0
t17	62	230,18	0	292,18	325	32,82	0
t18	62	201,58	0	263,58	325	61,42	0
t19	62	201,58	0	263,58	325	61,42	0
t20	62	201,58	0	263,58	325	61,42	0
t21	62	201,58	0	263,58	325	61,42	0
t22	62	166,51	0	228,51	325	96,49	0
t23	62	166,51	0	228,51	325	96,49	0
t24	62	166,51	0	228,51	325	96,49	0
t25	69	132,68	0	201,68	325	123,32	0
t26	69	132,68	0	201,68	277,2	75,51	0
t27	69	132,68	0	201,68	201,68	0	0
t28	69	100,97	0	169,97	169,97	0	0
t29	92	100,97	0	192,97	192,97	0	0
t30	92	100,97	0	192,97	192,97	0	0
t31	92	100,97	0	192,97	192,97	0	0
t32	92	68,27	0	160,27	160,27	0	0
t33	118	68,27	0	186,27	186,27	0	0
t34	118	68,27	0	186,27	186,27	0	0
t35	118	36,19	0	154,19	154,19	0	0
t36	118	36,19	0	154,19	154,19	0	0
t37	134	36,19	0	170,19	170,19	0	0
t38	134	12,19	0	146,19	146,19	0	0

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t39	134	12,19	0	146,19	146,19	0	0
t40	134	12,19	0	146,19	146,19	0	0
t41	141	12,19	0	153,19	153,19	0	0
t42	141	1,62	0	142,62	142,62	0	0
t43	141	1,62	0	142,62	142,62	0	0
t44	141	1,62	0	142,62	142,62	0	0
t45	146	0	0	146	146	0	0
t46	146	0	0	146	146	0	0
t47	146	0	0	146	146	0	0
t48	146	0	0	146	146	0	0
t49	157	0	0	157	157	0	0
t50	157	0	0	157	101	0	56
t51	157	0	0	157	157	0	0
t52	157	0	0	157	157	0	0
t53	176	0	0	176	0	0	176
t54	176	0	0	176	0	0	176
t55	176	0	0	176	0	0	176
t56	176	0	0	176	0	0	176
t57	194	0	0	194	194	0	0
t58	194	0	0	194	194	0	0
t59	194	0	0	194	194	0	0
t60	194	0	0	194	194	0	0
t61	199	0	0	199	325	126	0
t62	199	0	0	199	325	126	0
t63	199	0	0	199	273,11	74,11	0
t64	199	0	0	199	199		0
t65	196	0	0	196	325	129	0
t66	196	0	0	196	325	129	0
t67	196	0	0	196	325	129	0
t68	196	0	0	196	325	129	0
t69	196	0	0	196	196	0	0
t70	196	0	0	196	196	0	0
t71	196	0	0	196	196	0	0
t72	196	0	0	196	196	0	0
t73	206	0	0	206	6	0	200
t74	206	0	0	206	6	0	200
t75	206	0	0	206	6	0	200
t76	206	0	0	206	189,69	0	16,31
t77	229	0	0	229	229	0	0
t78	229	0	0	229	229	0	0
t79	229	0	0	229	229	0	0
t80	229	0	0	229	229	0	0
t81	254	0	0	254	325	71	0
t82	254	0	0	254	325	71	0
t83	254	0	0	254	325	71	0
t84	254	0	0	254	325	71	0
t85	275	0	250	525	325	0	200

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t86	275	0	250	525	325	0	200
t87	275	0	0	275	275	0	0
t88	275	0	0	275	275	0	0
t89	266	0	0	266	266	0	0
t90	266	0	0	266	266	0	0
t91	266	0	0	266	266	0	0
t92	266	0	0	266	266	0	0
t93	229	0	0	229	229	0	0
t94	229	0	0	229	229	0	0
t95	229	0	0	229	229	0	0
t96	229	0	0	229	229	0	0

**Tabla 4.6** Escenario C2. Demandas y actuación batería.

En la Fig. 4.3 se puede observar fácilmente el comportamiento de las diferentes variables presentes en la tabla.



**Figura 4.3** Escenario C2. Representación gráfica.

Se puede observar en la tabla 4.7 que en este caso la potencia contratada resulta ser 325 kW, mayor que en el caso anterior, ya que se dispone de una batería más pequeña.

Tabla 4.7 Costes escenario C2.

	Unidad	Caso sin batería	Caso con batería
Potencia contratada	kW	525	325
Coste TP + energía/día	€	289.1689895	259.5404651
Coste TP + energía/año	€	105546.6812	94732.26976
Coste TP + energía/8 años	€	844373.4492	757858.1581

Ahorros (€) respecto al caso sin batería (tabla 4.8):

Tabla 4.8 Ahorros escenario C2.

Ahorro total anual	10814.41139
Ahorro total 8 años con precio actual	50415.29112
Ahorro total 8 años con precio 2025	69235.29112

Los paybacks de las inversiones mencionadas serían los que se pueden ver en la tabla 4.9:

Tabla 4.9 Paybacks escenario C2.

Payback actual	3.33813822	3 años y 4 meses
Payback 2025	1.59786782	1 año y 7 meses

#### Conexión 2 EV en pico de la mañana y 3 EV en pico consumo de la tarde

- **Escenario C3:** Para esta situación, que podría ser más habitual que la primera situación considerada ya que no todos los usuarios van a tener el mismo horario, el pico de consumo se produce a la misma hora que el caso anterior. Se dará a las 22h y será de 425kW. Esto permitirá poder optar por una batería de menor capacidad, y por lo tanto más barata. Tras estudiar varios casos se obtiene que el mayor ahorro se da para una batería de 150kWh.

Se puede observar en la tabla 4.10 las demandas presentes y la actuación de la batería elegida, de 150kWh.

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t1	164	0	0	164	304,21	140,21	0
t2	164	0	0	164	304,21	140,21	0
t3	164	0	0	164	304,21	140,21	0
t4	164	0	0	164	304,21	140,21	0
t5	111	288,62	0	399,62	304,21	0	95,41
t6	111	288,62	0	399,62	304,21	0	95,41
t7	111	288,62	0	399,62	304,21	0	95,41
t8	111	273,2	0	384,2	304,21	0	79,99
t9	79	273,2	0	352,2	304,21	0	47,99
t10	79	273,2	0	352,2	304,21	0	47,99
t11	79	273,2	0	352,2	304,21	0	47,99
t12	79	252,19	0	331,19	304,21	0	26,98
t13	65	252,19	0	317,19	304,21	0	12,98
t14	65	252,19	0	317,19	304,21	0	12,98



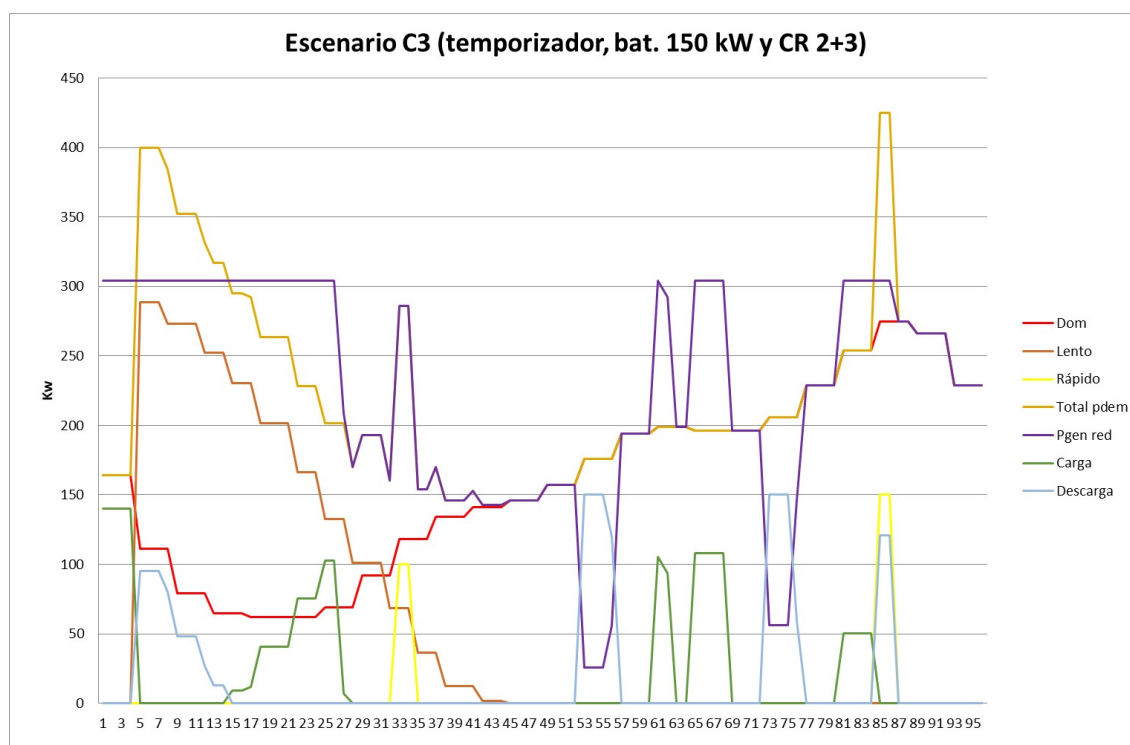
<b>Tiempo</b>	<b>Dom</b>	<b>Lento</b>	<b>Rápido</b>	<b>Total pdem</b>	<b>Pgen red</b>	<b>Carga</b>	<b>Descarga</b>
t15	65	230,18	0	295,18	304,21	9,03	0
t16	65	230,18	0	295,18	304,21	9,03	0
t17	62	230,18	0	292,18	304,21	12,03	0
t18	62	201,58	0	263,58	304,21	40,63	0
t19	62	201,58	0	263,58	304,21	40,63	0
t20	62	201,58	0	263,58	304,21	40,63	0
t21	62	201,58	0	263,58	304,21	40,63	0
t22	62	166,51	0	228,51	304,21	75,7	0
t23	62	166,51	0	228,51	304,21	75,7	0
t24	62	166,51	0	228,51	304,21	75,7	0
t25	69	132,68	0	201,68	304,21	102,52	0
t26	69	132,68	0	201,68	304,21	102,52	0
t27	69	132,68	0	201,68	208,49	6,8	0
t28	69	100,97	0	169,97	169,97	0	0
t29	92	100,97	0	192,97	192,97	0	0
t30	92	100,97	0	192,97	192,97	0	0
t31	92	100,97	0	192,97	192,97	0	0
t32	92	68,27	0	160,27	160,27	0	0
t33	118	68,27	100	286,27	286,27	0	0
t34	118	68,27	100	286,27	286,27	0	0
t35	118	36,19	0	154,19	154,19	0	0
t36	118	36,19	0	154,19	154,19	0	0
t37	134	36,19	0	170,19	170,19	0	0
t38	134	12,19	0	146,19	146,19	0	0
t39	134	12,19	0	146,19	146,19	0	0
t40	134	12,19	0	146,19	146,19	0	0
t41	141	12,19	0	153,19	153,19	0	0
t42	141	1,62	0	142,62	142,62	0	0
t43	141	1,62	0	142,62	142,62	0	0
t44	141	1,62	0	142,62	142,62	0	0
t45	146	0	0	146	146	0	0
t46	146	0	0	146	146	0	0
t47	146	0	0	146	146	0	0
t48	146	0	0	146	146	0	0
t49	157	0	0	157	157	0	0
t50	157	0	0	157	157	0	0
t51	157	0	0	157	157	0	0
t52	157	0	0	157	157	0	0
t53	176	0	0	176	26	0	150
t54	176	0	0	176	26	0	150
t55	176	0	0	176	26	0	150
t56	176	0	0	176	56	0	120
t57	194	0	0	194	194	0	0
t58	194	0	0	194	194	0	0
t59	194	0	0	194	194	0	0
t60	194	0	0	194	194	0	0
t61	199	0	0	199	304,21	105,21	0

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t62	199	0	0	199	292,54	93,54	0
t63	199	0	0	199	199	0	0
t64	199	0	0	199	199	0	0
t65	196	0	0	196	304,21	108,21	0
t66	196	0	0	196	304,21	108,21	0
t67	196	0	0	196	304,21	108,21	0
t68	196	0	0	196	304,21	108,21	0
t69	196	0	0	196	196	0	0
t70	196	0	0	196	196	0	0
t71	196	0	0	196	196	0	0
t72	196	0	0	196	196	0	0
t73	206	0	0	206	56	0	150
t74	206	0	0	206	56	0	150
t75	206	0	0	206	56	0	150
t76	206	0	0	206	146,33	0	59,67
t77	229	0	0	229	229	0	0
t78	229	0	0	229	229	0	0
t79	229	0	0	229	229	0	0
t80	229	0	0	229	229	0	0
t81	254	0	0	254	304,21	50,21	0
t82	254	0	0	254	304,21	50,21	0
t83	254	0	0	254	304,21	50,21	0
t84	254	0	0	254	304,21	50,21	0
t85	275	0	150	425	304,21	0	120,79
t86	275	0	150	425	304,21	0	120,79
t87	275	0	0	275	275	0	0
t88	275	0	0	275	275	0	0
t89	266	0	0	266	266	0	0
t90	266	0	0	266	266	0	0
t91	266	0	0	266	266	0	0
t92	266	0	0	266	266	0	0
t93	229	0	0	229	229	0	0
t94	229	0	0	229	229	0	0
t95	229	0	0	229	229	0	0
t96	229	0	0	229	229	0	0

**Tabla 4.10** Escenario C3. Demandas y actuación batería.

En la Fig. 4.4 se puede observar fácilmente el comportamiento de las diferentes variables presentes en la tabla.

En la tabla 4.11 se observa que la potencia contratada alcanza su valor mínimo hasta el momento, como era de esperar, ya que existe un pico de consumo menor que en los casos previos.



**Figura 4.4** Escenario C3. Representación gráfica.

**Tabla 4.11** Costes escenario C3.

	Unidad	Caso sin batería	Caso con batería
Potencia contratada	kW	450	305
Coste TP + energía/día	€	277.9240714	260.1451002
Coste TP + energía/año	€	101442.2861	94952.96157
Coste TP + energía/8 años	€	811538.2886	759623.6925

Ahorros (€) respecto al caso sin batería (tabla 4.12):

**Tabla 4.12** Ahorros escenario C3.

Ahorro total anual	6489.324507
Ahorro total 8 años con precio actual	24839.59606
Ahorro total 8 años con precio 2025	38954.59606

Los paybacks de las inversiones mencionadas serían los que se observan en la tabla 4.13:

**Tabla 4.13** Paybacks escenario C3.

Payback actual	4.1722	4 años y 2 meses
Payback 2025	1.0136	1 año aprox

- **Escenario C4:** Por similitud con escenarios anteriores se comentará el caso de elección de batería de 250kWh, ya que se considera la batería base de este estudio.

En la Fig. 4.5 se puede observar fácilmente el comportamiento de las diferentes variables presentes en la tabla.

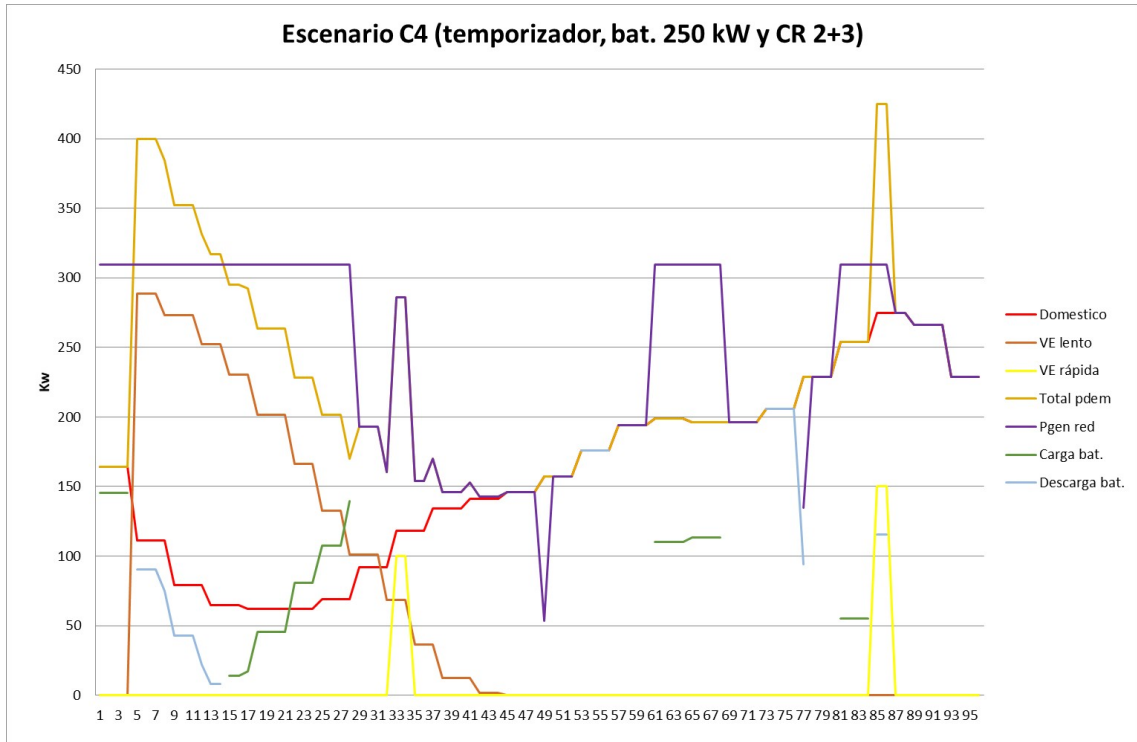


Figura 4.5 Escenario C4. Representación gráfica.

En este caso no se mostrará la tabla de demandas presentes y de actuación de la batería por ser un caso desestimado por las ventajas que presenta el caso de 150 kWh, pero las tablas de TP, ahorros y paybacks serían las siguientes (tablas 4.14, 4.15 y 4.16):

Tabla 4.14 Costes escenario C4.

	Unidad	Caso sin batería	Caso con batería
Potencia contratada	kW	450	309
Coste TP + energía/día	€	277.9240714	256.9792663
Coste TP + energía/año	€	101442.2861	93797.43219
Coste TP + energía/8 años	€	811538.2886	750379.4576

Tabla 4.15 Ahorros escenario C4.

Ahorro total anual	7644.853878
Ahorro total 8 años con precio actual	16033.83102
Ahorro total 8 años con precio 2025	39558.83102

Tabla 4.16 Paybacks escenario C4.

Payback actual	5.9027	5 años y 11 meses
Payback 2025	2.8254	2 años y 10 meses

Se puede observar que presenta un ahorro total con la batería actual a 8 años peor que en el caso con 150kWh, al igual que ocurre con su payback.

### Sin temporizador

Para el caso sin temporizador existirán unos consumos más elevados, ya que se asume la conexión de los VE a las 20h de la tarde, por lo que se sumarán al pico de consumo de las 22h que aparece en el caso con temporizador. En este apartado se ha considerado la posibilidad de usar baterías de mayor capacidad, debido al enorme incremento que sufre la demanda, y se han realizado los mismos análisis de ahorro del caso con temporizador.

**Conexión 5 EVs simultáneamente:** el pico de demanda se daría a las 22h, y su valor sería de 777kW.

- **Escenario S1:** En este caso al tener un pico de consumo tan elevado, la batería de 250kWh que se ha utilizado previamente para este caso con temporizador no sería válida, no daría una solución óptima.

Se elige una batería de 300kWh, ya que está capacitada para compensar las enormes demandas que aparecen en este caso, y además proporciona un ahorro bastante bueno. Vemos en la tabla 4.17 las demandas presentes y la actuación de la batería elegida, de 300kWh.

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t1	164	132,68	0	296,68	182,68	0	114
t2	164	132,68	0	296,68	296,68	0	0
t3	164	132,68	0	296,68	296,68	0	0
t4	164	100,97	0	264,97	264,97	0	0
t5	111	100,97	0	211,97	211,97	0	0
t6	111	100,97	0	211,97	211,97	0	0
t7	111	100,97	0	211,97	211,97	0	0
t8	111	68,27	0	179,27	179,27	0	0
t9	79	68,27	0	147,27	147,27	0	0
t10	79	68,27	0	147,27	147,27	0	0
t11	79	36,19	0	115,19	115,19	0	0
t12	79	36,19	0	115,19	115,19	0	0
t13	65	36,19	0	101,19	164,34	63,16	0
t14	65	12,19	0	77,19	77,19	0	0
t15	65	12,19	0	77,19	77,19	0	0
t16	65	12,19	0	77,19	77,19	0	0
t17	62	12,19	0	74,19	374,19	300	0
t18	62	1,62	0	63,62	363,62	300	0
t19	62	1,62	0	63,62	363,62	300	0
t20	62	1,62	0	63,62	363,62	300	0
t21	62	0	0	62	62	0	0
t22	62	0	0	62	62	0	0

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t23	62	0	0	62	62	0	0
t24	62	0	0	62	62	0	0
t25	69	0	0	69	69	0	0
t26	69	0	0	69	69	0	0
t27	69	0	0	69	69	0	0
t28	69	0	0	69	69	0	0
t29	92	0	0	92	92	0	0
t30	92	0	0	92	92	0	0
t31	92	0	0	92	92	0	0
t32	92	0	0	92	92	0	0
t33	118	0	0	118	118	0	0
t34	118	0	0	118	118	0	0
t35	118	0	0	118	118	0	0
t36	118	0	0	118	118	0	0
t37	134	0	0	134	134	0	0
t38	134	0	0	134	134	0	0
t39	134	0	0	134	134	0	0
t40	134	0	0	134	134	0	0
t41	141	0	0	141	141	0	0
t42	141	0	0	141	141	0	0
t43	141	0	0	141	141	0	0
t44	141	0	0	141	141	0	0
t45	146	0	0	146	146	0	0
t46	146	0	0	146	146	0	0
t47	146	0	0	146	146	0	0
t48	146	0	0	146	146	0	0
t49	157	0	0	157	0,00	0	157
t50	157	0	0	157	0,00	0	157
t51	157	0	0	157	35	0	122
t52	157	0	0	157	157	0	0
t53	176	0	0	176	0,00	0	176
t54	176	0	0	176	0,00	0	176
t55	176	0	0	176	0,00	0	176
t56	176	0	0	176	0,00	0	176
t57	194	0	0	194	194	0	0
t58	194	0	0	194	194	0	0
t59	194	0	0	194	194	0	0
t60	194	0	0	194	194	0	0
t61	199	0	0	199	337,41	138,41	0
t62	199	0	0	199	199	0	0
t63	199	0	0	199	199	0	0
t64	199	0	0	199	199	0	0
t65	196	0	0	196	477,19	281,19	0
t66	196	0	0	196	477,19	281,19	0
t67	196	0	0	196	477,19	281,19	0
t68	196	0	0	196	477,19	281,19	0
t69	196	0	0	196	196	0	0

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t70	196	0	0	196	196	0	0
t71	196	0	0	196	196	0	0
t72	196	0	0	196	196	0	0
t73	206	0	0	206	66,34	0	139,66
t74	206	0	0	206	206	0	0
t75	206	0	0	206	206	0	0
t76	206	0	0	206	206	0	0
t77	229	288,62	0	517,62	477,19	0	40,44
t78	229	288,62	0	517,62	477,19	0	40,44
t79	229	288,62	0	517,62	477,19	0	40,44
t80	229	273,2	0	502,2	477,19	0	25,02
t81	254	273,2	0	527,2	477,19	0	50,02
t82	254	273,2	0	527,2	477,19	0	50,02
t83	254	273,2	0	527,2	477,19	0	50,02
t84	254	252,19	0	506,19	477,19	0	29
t85	275	252,19	250	777,19	477,19	0	300
t86	275	252,19	250	777,19	477,19	0	300
t87	275	230,18	0	505,18	477,19	0	27,99
t88	275	230,18	0	505,18	477,19	0	27,99
t89	266	230,18	0	496,18	477,19	0	18,99
t90	266	201,58	0	467,58	467,58	0	0
t91	266	201,58	0	467,58	467,58	0	0
t92	266	201,58	0	467,58	467,58	0	0
t93	229	201,58	0	430,58	430,58	0	0
t94	229	166,51	0	395,51	395,51	0	0
t95	229	166,51	0	395,51	395,51	0	0
t96	229	166,51	0	395,51	395,51	0	0

**Tabla 4.17** Escenario S1. Demandas y actuación batería.

En la Fig. 4.6 se puede observar fácilmente el comportamiento de las diferentes variables presentes en la tabla.

Comparativa costes caso con batería frente a caso sin batería (tabla 4.18):

**Tabla 4.18** Costes escenario S1.

	Unidad	Caso sin batería	Caso con batería
Potencia contratada	kW	778	478
Coste TP + energía/día	€	355.5988786	308.2560726
Coste TP + energía/año	€	129793.5907	112513.4665
Coste TP + energía/8 años	€	1038348.726	900107.7321

Ahorros (€) respecto al caso sin batería (tabla 4.19):

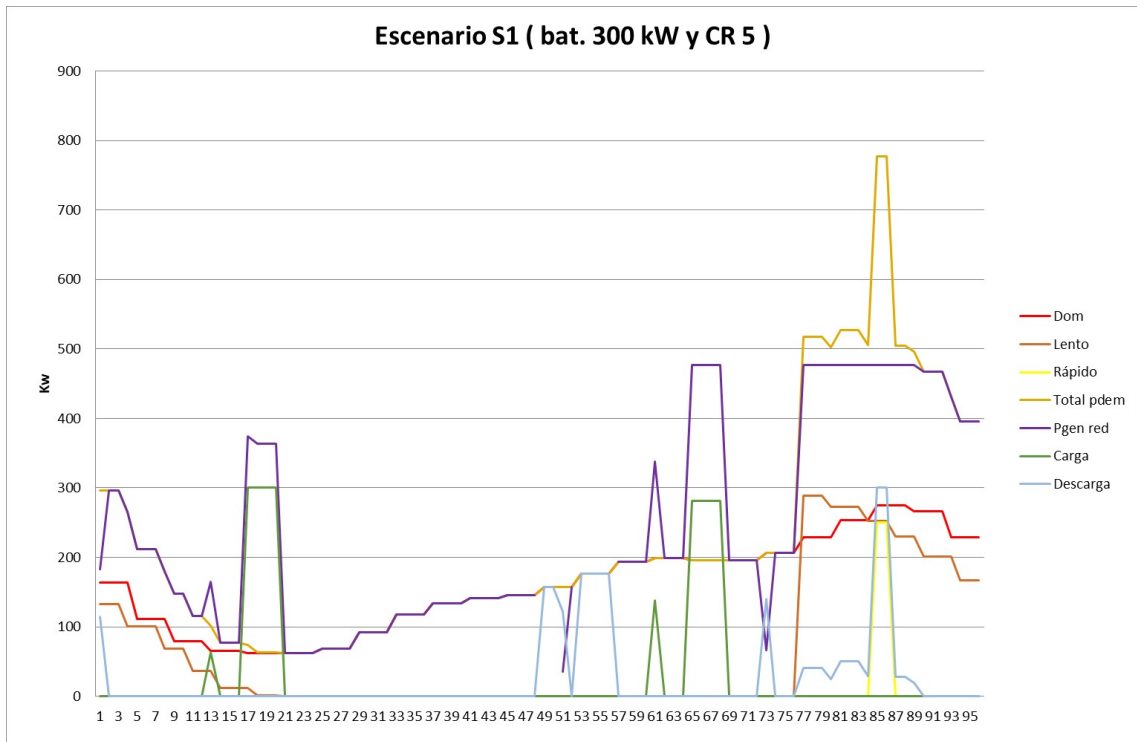


Figura 4.6 Escenario S1. Representación gráfica.

Tabla 4.19 Ahorros escenario S1.

Ahorro total anual	17280.12418
Ahorro total 8 años con precio actual	84090.99342
Ahorro total 8 años con precio 2025	112320.9934

Los paybacks de las inversiones mencionadas serían los que aparecen en la tabla 4.20:

Tabla 4.20 Paybacks escenario S1.

Payback actual	3.1337	3 años y 5 meses
Payback 2025	1.4999	1 año y 6 meses

**Conexión 2 EV en pico de la mañana y 3 EV en pico consumo de la tarde:** El pico de demanda se daría a las 22h, y su valor sería de 677kW, ya que no aparecen los 100kW que aportarían los 2 EV.

- **Escenario S2:** Para este caso se elige la batería de 250kWh por ser la que da mejores resultados, y se comentará a posterior la comparativa con otras baterías.

Vemos en la tabla 4.21 las demandas presentes y la actuación de la batería elegida, de 250kWh.



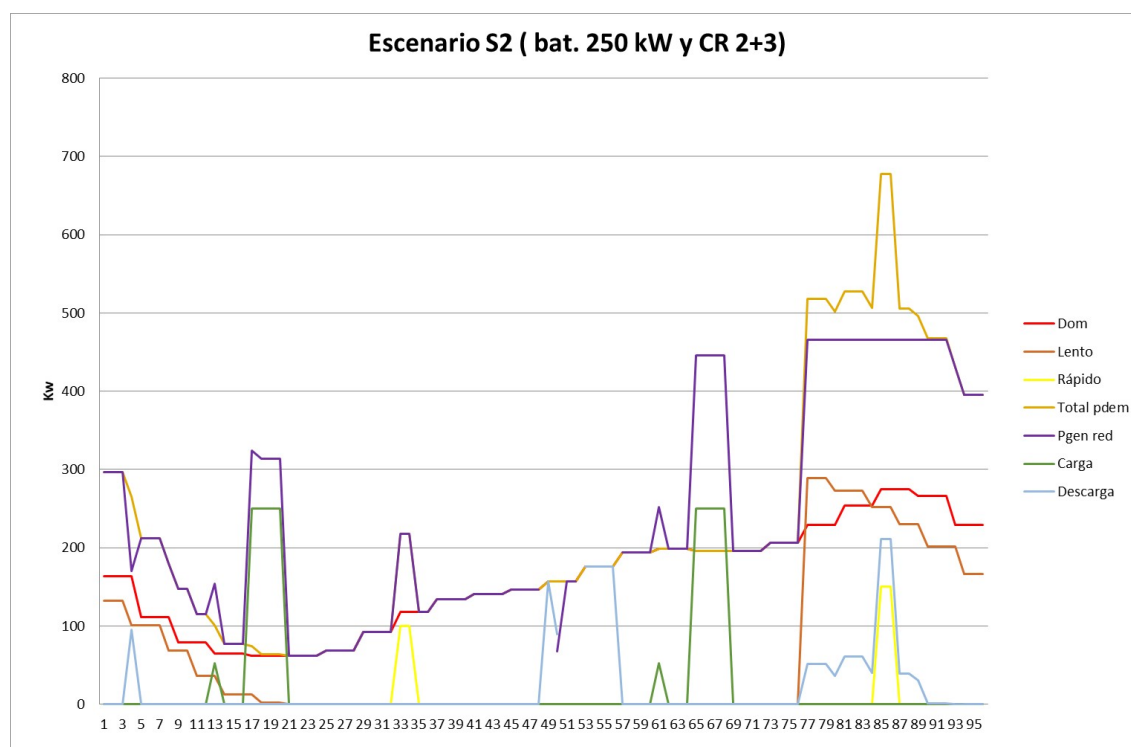
<b>Tiempo</b>	<b>Dom</b>	<b>Lento</b>	<b>Rápido</b>	<b>Total pdem</b>	<b>Pgen red</b>	<b>Carga</b>	<b>Descarga</b>
t1	164	132,68	0	296,68	296,68	0	0
t2	164	132,68	0	296,68	296,68	0	0
t3	164	132,68	0	296,68	296,68	0	0
t4	164	100,97	0	264,97	169,97	0	95
t5	111	100,97	0	211,97	211,97	0	0
t6	111	100,97	0	211,97	211,97	0	0
t7	111	100,97	0	211,97	211,97	0	0
t8	111	68,27	0	179,27	179,27	0	0
t9	79	68,27	0	147,27	147,27	0	0
t10	79	68,27	0	147,27	147,27	0	0
t11	79	36,19	0	115,19	115,19	0	0
t12	79	36,19	0	115,19	115,19	0	0
t13	65	36,19	0	101,19	153,82	52,63	0
t14	65	12,19	0	77,19	77,19	0	0
t15	65	12,19	0	77,19	77,19	0	0
t16	65	12,19	0	77,19	77,19	0	0
t17	62	12,19	0	74,19	324,19	250	0
t18	62	1,62	0	63,62	313,62	250	0
t19	62	1,62	0	63,62	313,62	250	0
t20	62	1,62	0	63,62	313,62	250	0
t21	62	0	0	62	62	0	0
t22	62	0	0	62	62	0	0
t23	62	0	0	62	62	0	0
t24	62	0	0	62	62	0	0
t25	69	0	0	69	69	0	0
t26	69	0	0	69	69	0	0
t27	69	0	0	69	69	0	0
t28	69	0	0	69	69	0	0
t29	92	0	0	92	92	0	0
t30	92	0	0	92	92	0	0
t31	92	0	0	92	92	0	0
t32	92	0	0	92	92	0	0
t33	118	0	100	218	218	0	0
t34	118	0	100	218	218	0	0
t35	118	0	0	118	118	0	0
t36	118	0	0	118	118	0	0
t37	134	0	0	134	134	0	0
t38	134	0	0	134	134	0	0
t39	134	0	0	134	134	0	0
t40	134	0	0	134	134	0	0
t41	141	0	0	141	141	0	0
t42	141	0	0	141	141	0	0
t43	141	0	0	141	141	0	0
t44	141	0	0	141	141	0	0
t45	146	0	0	146	146	0	0
t46	146	0	0	146	146	0	0
t47	146	0	0	146	146	0	0

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t48	146	0	0	146	146	0	0
t49	157	0	0	157	0	0	157
t50	157	0	0	157	68	0	89
t51	157	0	0	157	157	0	0,00
t52	157	0	0	157	157	0	0,00
t53	176	0	0	176	0,00	0	176
t54	176	0	0	176	0,00	0	176
t55	176	0	0	176	0,00	0	176
t56	176	0	0	176	0,00	0	176
t57	194	0	0	194	194	0	0
t58	194	0	0	194	194	0	0
t59	194	0	0	194	194	0	0
t60	194	0	0	194	194	0	0
t61	199	0	0	199	251,63	52,63	0
t62	199	0	0	199	199	0	0
t63	199	0	0	199	199	0	0
t64	199	0	0	199	199	0	0
t65	196	0	0	196	446	250	0
t66	196	0	0	196	446	250	0
t67	196	0	0	196	446	250	0
t68	196	0	0	196	446	250	0
t69	196	0	0	196	196	0	0
t70	196	0	0	196	196	0	0
t71	196	0	0	196	196	0	0
t72	196	0	0	196	196	0	0
t73	206	0	0	206	206	0	0
t74	206	0	0	206	206	0	0
t75	206	0	0	206	206	0	0
t76	206	0	0	206	206	0	0
t77	229	288,62	0	517,62	466,03	0	51,59
t78	229	288,62	0	517,62	466,03	0	51,59
t79	229	288,62	0	517,62	466,03	0	51,59
t80	229	273,2	0	502,2	466,03	0	36,17
t81	254	273,2	0	527,2	466,03	0	61,17
t82	254	273,2	0	527,2	466,03	0	61,17
t83	254	273,2	0	527,2	466,03	0	61,17
t84	254	252,19	0	506,19	466,03	0	40,16
t85	275	252,19	150	677,19	466,03	0	211,16
t86	275	252,19	150	677,19	466,03	0	211,16
t87	275	230,18	0	505,18	466,03	0	39,15
t88	275	230,18	0	505,18	466,03	0	39,15
t89	266	230,18	0	496,18	466,03	0	30,15
t90	266	201,58	0	467,58	466,03	0	1,54
t91	266	201,58	0	467,58	466,03	0	1,54
t92	266	201,58	0	467,58	466,03	0	1,54
t93	229	201,58	0	430,58	430,58	0	0
t94	229	166,51	0	395,51	395,51	0	0

Tiempo	Dom	Lento	Rápido	Total pdem	Pgen red	Carga	Descarga
t95	229	166,51	0	395,51	395,51	0	0
t96	229	166,51	0	395,51	395,51	0	0

**Tabla 4.21** Escenario S2. Demandas y actuación batería.

En la Fig. 4.7 se puede observar fácilmente el comportamiento de las diferentes variables presentes en la tabla.



**Figura 4.7** Escenario S2. Representación gráfica.

Comparativa costes caso con batería frente a caso sin batería (tabla 4.22):

**Tabla 4.22** Costes escenario S2.

	Unidad	Caso sin batería	Caso con batería
Potencia contratada	kW	680	466
Coste TP + energía/día	€	344.5788589	309.3243225
Coste TP + energía/año	€	125771.2835	112903.3777
Coste TP + energía/8 años	€	1006170.268	903227.0218

Ahorros (€) respecto al caso sin batería (tabla 4.23):

**Tabla 4.23** Ahorros escenario S2.

Ahorro total anual	12867.90579
Ahorro total 8 años con precio actual	57818.24628
Ahorro total 8 años con precio 2025	81343.24628

Los paybacks de las inversiones mencionadas serían los que aparecen en la tabla 4.24:

**Tabla 4.24** Paybacks escenario S2.

Payback actual	3.5229	3 años y 6 meses
Payback 2025	1.6829	1 año y 8 meses

En este apartado se ha estudiado la posibilidad de utilizar baterías de mayor capacidad, ya que existía un pico de consumo tan elevado. Las baterías estudiadas fueron de 400kWh y 500kWh. Se puede ver a continuación que, a pesar de presentar un ahorro mayor (tablas 4.25 y 4.27) ya que al tener mayor capacidad puede realizar una mejor gestión de la energía, presentan unos paybacks que no son admisibles para este estudio (tablas 4.26 y 4.28).

**Tabla 4.25** Batería 400kWh (Ahorro)- S2.

Ahorro total anual	16588.83351
Ahorro total 8 años con la batería actual	60510.66811

**Tabla 4.26** Batería 400kWh (Payback)- S2.

Payback actual	4.3523	4 años y 4 meses
----------------	--------	------------------

**Tabla 4.27** Batería 400kWh (Ahorro)- S2.

Ahorro total anual	18899.64851
Ahorro total 8 años con la batería actual	60947.18811

**Tabla 4.28** Batería 400kWh (Payback)- S2.

Payback actual	6.5804	6 años y 7 meses
----------------	--------	------------------

Para tener una idea más general de todos los escenarios estudiados se realiza el siguiente **resumen económico**.

Respecto a los ahorros (€) obtenidos se pueden observar en la tabla 4.29:

Tabla 4.29 Resumen ahorros obtenidos.

Escenario	Ahorros 8 años - precio batería actual	Ahorros 8 años - precio batería 2025
C1	47539	71064
C2	50415	69235
C3	24840	38955
C4	16034	39559
S1	84091	112321
S2	57818	81343

En la Fig. 4.8 se puede observar dicho ahorro de forma comparativa:

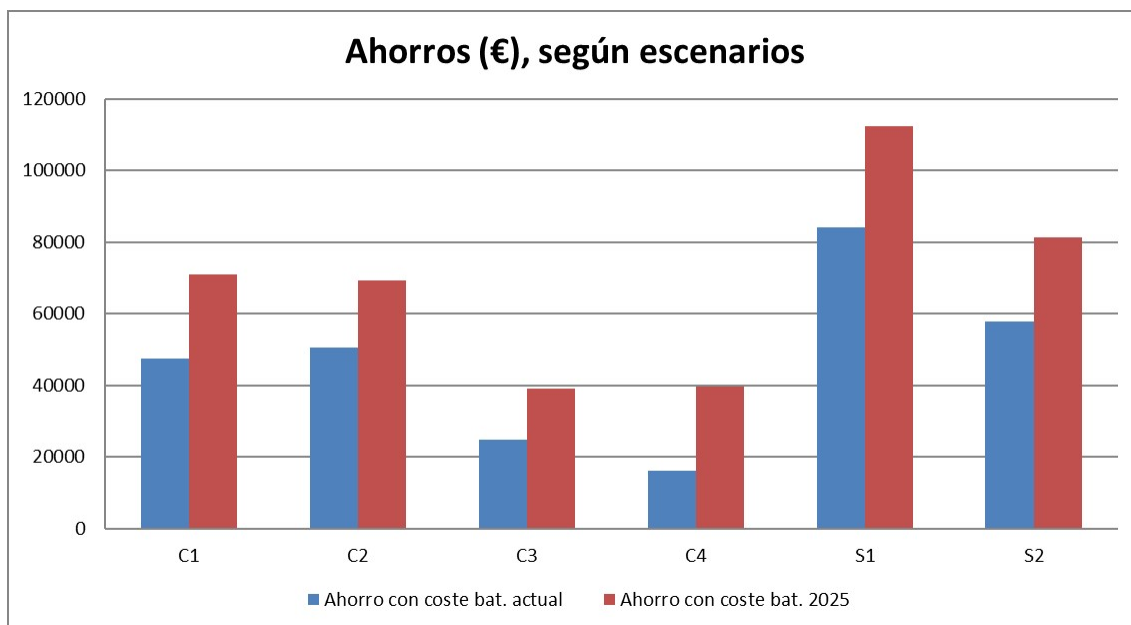


Figura 4.8 Ahorros según escenarios.

Se puede observar que, respecto a los casos con temporizador, existe mayor ahorro en los casos C1 y C2. Esto se debe a que la potencia demandada es mayor, y por lo tanto van a existir mayores picos de consumo en las horas caras, por lo que la batería tendrá mayor capacidad para actuar en esas horas provocando un mayor ahorro. Además, se puede observar que hay una mayor bajada en estos casos en la potencia contratada, en torno a 200-250kW frente a los casi 150kW de los escenarios C3 y C4), lo cual confirma el enorme peso que tiene en el coste el término de potencia.

De igual manera se puede entender por qué en los dos casos sin temporizador el ahorro es mayor, ya que tiene el valor más elevado de potencia demandada en las horas más caras.

Respecto a los paybacks (tabla 4.30):

Tabla 4.30 Resumen paybacks obtenidos.

Escenario	Payback, con precio batería actual	Payback, con precio batería 2025
C1	3.34	1.60
C2	3.90	1.86
C3	4.17	1.01
C4	5.90	2.83
S1	3.13	1.50
S2	3.52	1.68

En la Fig. 4.9 se pueden observar los paybacks de forma comparativa:

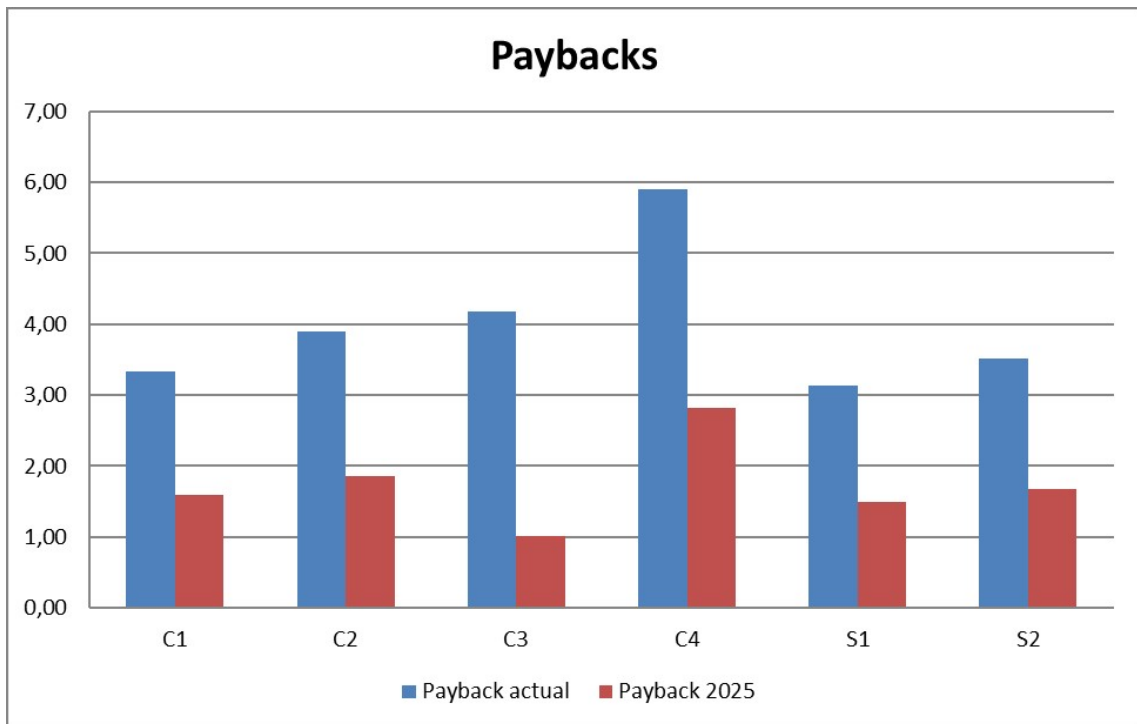


Figura 4.9 Paybacks según escenarios.

Como ya se comentó hay un escenario, el C4, que se ha estudiado puramente por continuar con la batería de 250kWh, pero se pone de manifiesto en este gráfico el mal resultado que da con respecto al payback.

El resto de escenarios tanto en la actualidad como en el 2025 dan resultados aceptables, validando este estudio.

Se puede observar de la Fig. 4.9 que, si bien en la actualidad los valores de payback son aceptables, no son muy impresionantes. Evidentemente, en el 2025 este tipo de proyectos estará mucho más extendido por la gran rentabilidad que presentan.



## 5 Conclusiones y trabajos futuros

---

En el apartado previo, donde se comentan los resultados del trabajo, se puede observar que se alcanzan unos ahorros considerables, los cuales demuestran que las soluciones obtenidas para los diferentes escenarios estudiados son posibles y necesarias para la correcta integración del VE, sin tener que recurrir a la modificación de toda la estructura del sistema eléctrico, lo que implicaría un gran coste.

Cabe mencionar que en todo este estudio hay muchos factores que no se han tenido en cuenta en el coste, como podría ser todo el sistema de montaje necesario para el uso de la batería (por ejemplo, los convertidores de potencia) y el desgaste por uso que sufren las baterías a lo largo de su vida útil, empeorando su eficiencia y rendimiento. Este último factor mencionado no sería muy relevante ya que el estudio se ha realizado a 8 años, y dichas baterías no suelen ver muy modificado su rendimiento en ese tiempo de uso.

A modo de resumen, las ventajas que muestran los resultados de este trabajo serían las siguientes:

- El ahorro estudiado en potencia y energía. Se observa que da de sobra para compensar el coste de la batería, por lo que se demuestra la rentabilidad del proyecto.
- En el caso de que se tuvieran limitaciones de consumo se podrían realizar la carga de dichos VEs sin superar las restricciones. Se estaría bajando el pico de consumo, lo cual es muy beneficioso.
- Colabora en el aplanamiento de la curva de demanda diaria, lo cual evitaría la necesidad actual de tener un sistema tan sobredimensionado.
- Animar al consumidor en la idea de la adquisición de un VE. Como con todo, las ventajas económicas siempre suponen un incentivo.

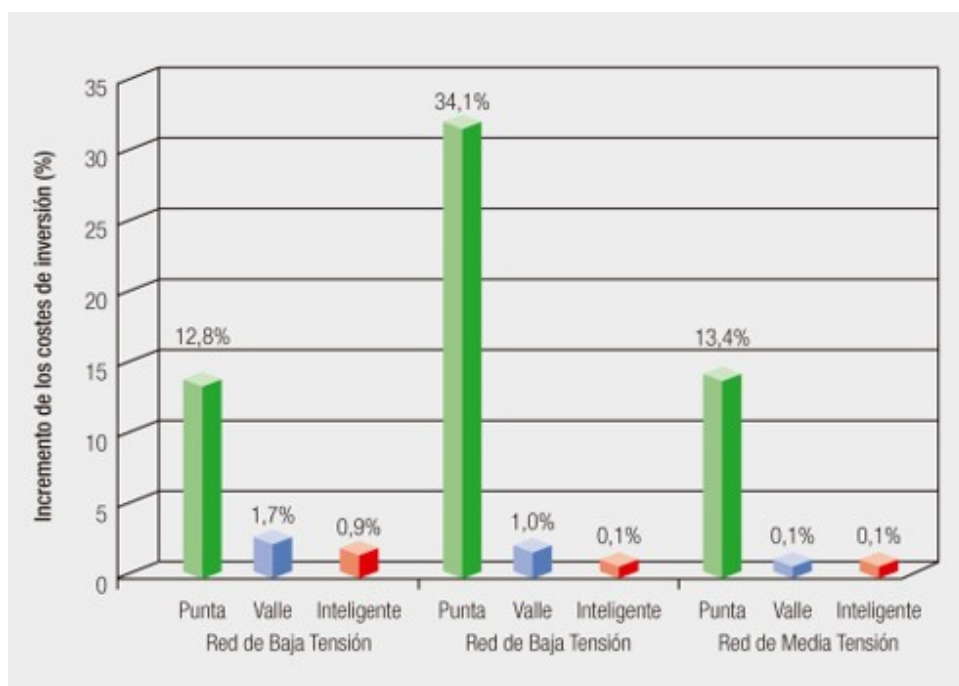
Este trabajo representa únicamente un estudio básico de las enormes ventajas que podría traer el uso de baterías en situaciones como las presentadas. Habría muchas posibles líneas futuras de trabajo, como las siguientes:

- La utilización de placas fotovoltaicas asociadas a dichas baterías. De esta forma podríamos disponer de una fuente de energía más limpia y respetuosa con el medio ambiente, y nos permitiría producir nuestra propia energía. Con ello tendríamos que depender menos de la red y podríamos ahorrar en potencia y en energía. Habría que estudiar la rentabilidad que daría en nuestro caso el uso de placas fotovoltaicas, y ver las características de la zona en la que se instalaría, ya que es una tecnología muy dependiente del clima.
- Realizar el estudio optimizando el término de potencia en lugar de optimizando el coste. Esta variante podría ser útil en escenarios que tengan unas limitaciones de potencia muy restrictivas, por problemas con la infraestructura. Podría ser más usual en zonas con infraestructuras más antiguas, menos preparadas para el aumento de consumo.



- En lo que a contadores se refiere hay mucha evolución posible que podría beneficiar a este tipo de estudios. Desde una conexión absoluta de los VE y la red conocida como “Vehicle to grid”, en la cual mediante las mediciones instantáneas de los contadores se pueda decidir cuál sería el mejor momento para estar cargando, para que se favorezca más a la curva de demanda, hasta que el VE funcionase también como acumulador de energía pudiendo descargarla si fuera necesario.

Si el intercambio de datos entre el VE y las redes de distribución y generación estuviese bien diseñado se podría avisar del día y la hora a la que se va a requerir el VE la próxima vez (cargado) de forma que durante el tiempo que permanezca enchufado funcione como acumulador de energía que tome o ceda en función de las circunstancias. Teniendo en cuenta cómo funcionan las renovables, esta función de amortiguación sería de gran ayuda para las baterías. Este método comentado sería la integración inteligente. Se puede observar en la Fig. 5.1 la diferencia de costes que supone esa integración con el resto de opciones.



**Figura 5.1** Costes de inversión[5].

Se observa que habría que invertir mucho dinero para poder adaptar la red a una penetración masiva del VE si no se hiciera de forma inteligente, es decir, con el control previamente mencionado.

- Respecto a los contadores también se está intentando llegar es a que tengamos un único contrato vinculado a dos contadores, con un único término de potencia. Así se podría cargar el VE del domicilio por la noche, que es cuando no estamos usando la gran mayoría de la potencia contratada. De esa forma se podría aprovechar por la noche la potencia que estás pagando y usando únicamente a lo largo del día. Evidentemente que se pueda llegar a dicho escenario futuro estaría condicionado a las decisiones de las empresas distribuidoras, o a las decisiones del gobierno, que mediante una modificación legal exija a las distribuidoras que lo permitan. Todo esto colaboraría en hacer más atractiva la idea para el consumidor de la compra de un VE.



# Apéndice A

## Código GAMS

---

```
1 Sets
2 n generador / n1/
3 t periodos /t0*t96/;

5 Scalar
6 E capacidad SAE(kWh) /250/
7 P potencia SAE (kW) /250/
8 nc rendimiento de carga /0.95/
9 nd rendimiento de descarga /0.95/
10 pgmin potencia generada minima /0/;

12 Table
13 datprecios(t,*) datos precios energía
14 $ondelim
15 $include precios.csv
16 $offdelim ;

18 Table
19 datdom(t,*) datos consumos domésticos
20 $ondelim
21 $include domestico.csv
22 $offdelim ;

24 Table
25 datlento(t,*) datos VE lento
26 $ondelim
27 $include lento.csv
28 $offdelim ;

30 Table
31 datrapido(t,*) datos VE rápido
32 $ondelim
33 $include rapido.csv
34 $offdelim ;

36 Variables
37 coste coste total
38 pg(t) potencia generada período t
39 pdem(t) potencia demandada período t
40 soc(t) estado carga SAE período t
41 pc(t) carga SAE período t
42 pd(t) descarga SAE período t
43 pgmax potencia generada máxima;
```

```

45 Equations
46 eq_costes costes
47 eq_balance balance de potencia
48 eq_pdem demanda sistema estudio
49 eq_soc estado de carga
50 eq_pgmax potencia contratada;

52 eq_costes.. coste =e= sum(t, ((datprecios(t,'precio')/1000)*pg(t)/4))+pgmax
    *3.4297/(30.5);

54 eq_balance(t)$(not sameas(t, "t0")).. pdem(t) =l= pg(t) + pd(t) - pc(t);

56 eq_pdem(t)$(not sameas(t, "t0")).. pdem(t) =e= datdom(t,'consumo') +
    datlento(t,'consumo') + datrapido(t,'consumo');

58 eq_soc(t)$(not sameas(t, "t0")).. soc(t) =e= soc(t-1)+((pc(t))/4)*nc - ((pd(
    t))/4)/nd;

60 eq_pgmax(t)$(not sameas(t, "t0")).. pg(t)=l=pgmax;

62 * Límites de las variables
63 pg.lo(t) = Pgmin;
64 pg.up(t) = 500;
65 soc.lo(t) = 0;
66 soc.up(t) = E;
67 soc.fx("t0") = 0.1*E;
68 pc.lo(t) = 0;
69 pc.up(t) = P;
70 pd.lo(t) = 0;
71 pd.up(t) = P;

73 model opt_coste /all/;
74 solve opt_coste minimizing coste using nlp;

```

# Índice de Figuras

---

1.1	Comparativa de alternativas de descarbonización del transporte de pasajeros particular (unidades/100km)[11]	2
1.2	Objetivos de reducción de emisiones GEI en España en 2050 en función de la transposición de los objetivos europeos[11]	3
1.3	Comparativa internacional de penetración del vehículo eléctrico durante los primeros años del despliegue (% anual de ventas)[11]	4
1.4	Incertidumbres críticas para el desarrollo futuro de la movilidad de pasajeros [11]	7
1.5	Parque de turismos en función del escenario de movilidad en el futuro (millones de vehículos) [11]	8
1.6	Evolución del parque de vehículos eléctricos en España (millones de vehículos; entre paréntesis% de ventas de VE sobre el total) [11]	9
2.1	Curva de carga del hogar medio en un día laborable de invierno[1]	13
2.2	Coefficiente de simultaneidad, según el número de viviendas[2]	14
2.3	Consumo medio diario doméstico	14
2.4	Consumo medio total del edificio	15
2.5	Curva de carga lenta del VE[3]	15
2.6	Probabilidad de conexión del VE según su estado de SOC [6]	16
2.7	Ejemplo sin decalaje para conexión a las 4:00h	17
2.8	Curva de carga rápida del VE[8]	17
2.9	Demanda debida a la carga rápida del VE	18
2.10	Tipología de infraestructura de recarga conductiva en función de la velocidad de recarga[11]	18
2.11	Curva agregada de las demandas mencionadas	19
2.12	Conexión VE sin temporización[6]	19
2.13	Conexión VE sin temporización	20
4.1	Disminución de precios de las baterías de ión litio[9]	25
4.2	Escenario C1. Representación gráfica	30
4.3	Escenario C2. Representación gráfica	33
4.4	Escenario C3. Representación gráfica	37
4.5	Escenario C4. Representación gráfica	38
4.6	Escenario S1. Representación gráfica	42
4.7	Escenario S2. Representación gráfica	45
4.8	Ahorros según escenarios	47
4.9	Paybacks según escenarios	48
5.1	Costes de inversión[5]	51

# Índice de Tablas

---

4.1	Tabla resumen escenarios	27
4.2	Escenario C1. Demandas y actuación batería	29
4.3	Costes escenario C1	30
4.4	Ahorros escenario C1	30
4.5	Paybacks escenario C1	30
4.6	Escenario C2. Demandas y actuación batería	33
4.7	Costes escenario C2	34
4.8	Ahorros escenario C2	34
4.9	Paybacks escenario C2	34
4.10	Escenario C3. Demandas y actuación batería	36
4.11	Costes escenario C3	37
4.12	Ahorros escenario C3	37
4.13	Paybacks escenario C3	37
4.14	Costes escenario C4	38
4.15	Ahorros escenario C4	38
4.16	Paybacks escenario C4	39
4.17	Escenario S1. Demandas y actuación batería	41
4.18	Costes escenario S1	41
4.19	Ahorros escenario S1	42
4.20	Paybacks escenario S1	42
4.21	Escenario S2. Demandas y actuación batería	45
4.22	Costes escenario S2	45
4.23	Ahorros escenario S2	46
4.24	Paybacks escenario S2	46
4.25	Batería 400kWh (Ahorro)- S2	46
4.26	Batería 400kWh (Payback)- S2	46
4.27	Batería 400kWh (Ahorro)- S2	46
4.28	Batería 400kWh (Payback)- S2	46
4.29	Resumen ahorros obtenidos	47
4.30	Resumen paybacks obtenidos	48

# Bibliografía

---

- [1] *Proyecto indel, atlas de la demanda eléctrica española*, Enero 1998.
- [2] *Guía bt-10: Previsión de cargas para suministros en bt*, Septiembre 2003.
- [3] *El vehículo eléctrico y su interacción con la red eléctrica*, Abril 2010.
- [4] *Análisis del consumo energético del sector residencial en españa: Informe final*, Julio 2011.
- [5] *Evaluación del impacto de la integración del coche eléctrico en las redes de distribución de energía eléctrica*, Octubre 2011.
- [6] *Model validation and data analysis*, Febrero 2015.
- [7] *Estrategia andaluza de la calidad del aire*, Abril 2016.
- [8] *How fast charging works*, Marzo 2016.
- [9] *Batteries keep on getting cheaper*, Diciembre 2017.
- [10] *Plan movalt vehículos*, Noviembre 2017.
- [11] *Un modelo de transporte descarbonizado para españa en 2050: Recomendaciones para la transición*, Marzo 2017.
- [12] *Coche eléctrico en europa: situación actual y cifras de ventas*, Marzo 2018.
- [13] *An introduction to gams*, Mayo 2018.