

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

Departamento de Ingeniería Eléctrica

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Vehículo eléctrico: ¿Una opción de futuro en los sistemas eléctricos?**

AUTOR: Álvaro Iniesta López

TUTOR: Mónica Alonso Martínez

Leganés, Junio de 2015





## Resumen

El presente documento representa el estudio en el que se va a considerar al vehículo eléctrico como una medida de solución adoptada para lograr una mayor eficiencia global en la gestión de los sistemas eléctricos. Para su alcance se han llevado a cabo una serie de estudios que dividen el trabajo en dos fases.

La primera de ellas agrupa un estudio bibliográfico que comienza con una descripción del estado del arte del vehículo eléctrico, como de los beneficios vinculados a su uso, tanto a los usuarios como al sistema eléctrico. Conocidas las tipologías de vehículos eléctricos, se profundiza sobre un pilar fundamental que condiciona la viabilidad de los vehículos eléctricos, los sistemas de almacenamiento energético, analizando las diferentes opciones a las que se pueden optar con el fin de identificar la más adecuada en calidad de prestaciones. Ante esto hay que tener en cuenta las distintas posibilidades con las que podemos recargar el vehículo eléctrico, detallando una completa infraestructura a la que podemos acceder con el fin de determinar la más adecuada para nuestro vehículo y para el sistema. En lo que se refiere al sistema eléctrico español, se describe la actual situación del sistema de generación y de las redes de transporte y distribución, pasando por el desarrollo de un nuevo concepto en las redes eléctricas, las Smart Grids. Para finalizar, se exponen distintos ejemplos prácticos de proyectos de integración del vehículo eléctrico llevados a cabo en España, Europa e internacionalmente.

Como segunda y última fase, se procede a realizar un análisis práctico en cuatro escenarios sujetos a estudio mediante la herramienta informática PSS/E, con el fin de evaluar el impacto de la recarga del vehículo eléctrico en un sistema de potencia. En dichos escenarios se va a partir de un caso inicial, al cual se le irá incrementando la demanda del vehículo eléctrico y se analizarán los resultados correspondientes a los perfiles de demanda y de tensión, como el nivel de carga de las líneas.



## Índice

Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1 Contexto .....	9
1.2 Objetivos.....	10
1.3 Estructura de la memoria.....	10
Capítulo 2. El vehículo eléctrico.....	12
2.1 Revisión histórica .....	12
2.2 Tipologías del vehículo eléctrico.....	14
2.2.1 Vehículo híbrido eléctrico .....	15
2.2.2 Vehículo híbrido enchufable.....	20
2.2.3 Vehículo eléctrico.....	21
2.3 ¿Por qué elegir el vehículo eléctrico? .....	23
Capítulo 3. Sistemas de almacenamiento.....	28
3.1 Introducción al almacenamiento energético.....	28
3.2 Baterías.....	29
3.2.1 Plomo-ácido.....	32
3.2.2 Níquel-cadmio .....	32
3.2.3 Níquel-metal hidruro.....	33
3.2.4 Ión de litio .....	33
3.2.5 Polímero de litio .....	34
3.2.6 Sal fundida-Zebra .....	35
3.3 Supercondensadores.....	36
3.4 Pilas de combustible.....	38
Capítulo 4. El sistema eléctrico español .....	41
4.1 Introducción a los sistemas eléctricos .....	41
4.2 Generación y cobertura de la demanda.....	42
4.3 Redes de transporte y distribución.....	49
4.4 Demanda eléctrica.....	53
4.4.1 Curva de demanda eléctrica en España .....	53
4.5 Redes inteligentes .....	55
Capítulo 5. Infraestructura para la recarga.....	62



5.1 Introducción a la recarga eléctrica.....	62
5.2 Arquitectura del sistema de recarga.....	63
5.3 El punto de recarga.....	65
5.3.1 Tipos de recarga .....	66
5.3.2 Modos de recarga.....	69
5.3.3 Tipos de conectores .....	71
5.3.4 Emplazamiento de los puntos de recarga .....	74
5.4 Alternativas de recarga .....	76
5.4.1 Recarga inductiva.....	76
5.4.2 Intercambio de baterías .....	77
Capítulo 6. Proyectos de integración.....	79
6.1 Proyecto VERDE.....	79
6.2 Proyecto TECMUSA.....	80
6.3 Proyecto ELVIRE.....	81
6.4 Proyecto ZEM2ALL .....	82
Capítulo 7. Impacto del vehículo eléctrico en un sistema de potencia.....	84
7.1 Planteamiento del análisis.....	84
7.2 Escenarios de estudio .....	87
7.3 Resultados .....	88
Conclusiones .....	93
Bibliografía .....	94
Anexo .....	100



## Índice de Figuras

Figura 1. Primer motor rudimentario de Ányos Jedlik .....	12
Figura 2. La Jamais Contente de Camille Jenatzy.....	13
Figura 3. Modelos de las compañías Detroit Electric y Baker Motor. ....	13
Figura 4. Modelo EV1 de General Motors .....	14
Figura 5. Evolución del vehículo en función del grado de hibridación eléctrica.....	15
Figura 6. Estructura del vehículo híbrido eléctrico.....	16
Figura 7. Diagrama de funcionamiento del vehículo híbrido .....	17
Figura 8. Disposición del vehículo en configuración serie.....	18
Figura 9. Disposición del vehículo en configuración paralelo.....	19
Figura 10. Disposición del vehículo en configuración serie-paralelo .....	19
Figura 11. Estructura del vehículo híbrido enchufable.....	20
Figura 12. Estructura del vehículo eléctrico.....	21
Figura 13. Estructura del consumo de energía final en la UE.....	23
Figura 14. Comparación de la eficiencia energética entre el vehículo eléctrico y el vehículo convencional desde el punto de vista TTW y WTW .....	24
Figura 15. Evolución de las emisiones de CO2 por km recorrido.....	25
Figura 16. Diagrama de Ragone.....	29
Figura 17. Estructura de una batería.....	30
Figura 18. Esquema de un supercondensador con electrodos apilados.....	37
Figura 19. Principio de funcionamiento de la pila de hidrógeno .....	39
Figura 20. Esquema básico del sistema eléctrico .....	42
Figura 21. Evolución de la demanda energética 2007-2014 .....	43
Figura 22. Evolución de la potencia instalada 2007-2014 .....	44
Figura 23. Reparto porcentual de la capacidad instalada 2014 .....	45
Figura 24. Evolución de la producción de energía eléctrica 2007-2014 .....	46
Figura 25. Evolución de la generación renovable y no renovable 2007-2014.....	47
Figura 26. Reparto porcentual del mix de generación eléctrica 2014.....	48
Figura 27. Distribuidores de energía eléctrica en España .....	51
Figura 28. Kilómetros de la red de transporte instalados durante 2010-2014.....	52
Figura 29. Evolución de la capacidad de transformación instalada durante 2010-2014 .....	52
Figura 30. Evolución de la curva de demanda .....	54
Figura 31. Soluciones a la gestión de la demanda .....	55
Figura 32. Esquema de una Smart Grid .....	56
Figura 33. Recarga en horas punta.....	59
Figura 34. Recarga en horas valle sin gestión inteligente.....	60
Figura 35. Recarga en horas valle con gestión inteligente.....	60
Figura 36. Arquitectura del sistema de recarga eléctrica .....	64
Figura 37. Componentes de un punto de recarga tipo poste.....	66
Figura 38. Modo de carga 1.....	69
Figura 39. Modo de carga 2.....	70



Figura 40. Modo de carga 3.....	71
Figura 41. Modo de carga 4.....	71
Figura 42. Conector Schuko.....	72
Figura 43. Conector Tipo 1.....	72
Figura 44. Conector Tipo 2.....	73
Figura 45. Conector Tipo 3.....	73
Figura 46. Conector CHAdeMO.....	74
Figura 47. Posibles ubicaciones de los puntos de recarga.....	75
Figura 48. Primer punto de recarga inductiva en España.....	77
Figura 49. Sistema automático de intercambio de baterías.....	78
Figura 50. Niveles de tensión y potencia de los transformadores del sistema .....	85
Figura 51. Puntos de conexión de las redes de BT a la red de MT.....	85
Figura 52. Curvas de carga red MT y BT .....	86
Figura 53. Distribución horaria de potencias demandadas del Escenario 1.....	88
Figura 54. Distribución horaria de potencias demandadas del Escenario 2.....	89
Figura 55. Distribución horaria de potencias demandadas del Escenario 3.....	89
Figura 56. Distribución horaria de potencias demandadas del Escenario 4.....	89
Figura 57. Perfil de tensión horario para cada nudo del Escenario 1 .....	90
Figura 58. Perfil de tensión horario para cada nudo del Escenario 2 .....	91
Figura 59. Perfil de tensión horario para cada nudo del Escenario 3 .....	91
Figura 60. Perfil de tensión horario para cada nudo del Escenario 4 .....	91
Figura 61. Nivel de sobrecarga de la línea 9-10 en los diferentes escenarios.....	92



## Índice de Tablas

Tabla 1. Comparativa de costes energéticos entre el vehículo eléctrico y el vehículo con motor de combustión interna.....	26
Tabla 2. Comparativa de parámetros para las diferentes baterías .....	36
Tabla 3. Comparativa entre las distintas tipologías de la pila de combustible .....	40
Tabla 4. Reparto numérico de la capacidad instalada 2014 .....	45
Tabla 5. Reparto numérico de la producción de energía 2014.....	48
Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de las ubicaciones de los puntos de recarga .....	75
Tabla 7. Potencia de los generadores distribuidos .....	86
Tabla 8. Distribución nº VE a recargar para una integración del 20% de la flota.....	87
Tabla 9. Distribución nº VE a recargar para una integración del 100% de la flota .....	87
Tabla 10. Energía cedida mediante V2G para una integración del 20% de la flota.....	88
Tabla 11. Energía cedida mediante V2G para una integración del 100% de la flota.....	88
Tabla 12. Fabricantes y características de vehículos híbridos enchufables.....	100
Tabla 13. Fabricantes y características de vehículos eléctricos.....	101





# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Contexto

En las últimas décadas, hechos como la contaminación atmosférica por gases efecto invernadero, el cambio climático o el encarecimiento de las reservas de petróleo debido a su agotamiento, han planteado que el vehículo eléctrico se presente como una gran oportunidad para reducir su impacto. Los primeros pasos que se dieron en esta tecnología fueron gracias a la combinación de un motor de combustión interna junto a uno eléctrico, pero el panorama de estos vehículos ha evolucionado de forma significativa hasta poder hablar de una electrificación total, lo cual se espera que suceda durante los próximos años.

Desde el punto de vista ingenieril, el vehículo eléctrico supone una revolución en el medio de transporte al introducirse como un cambio de paradigma en nuestra sociedad, representando una posible solución al problema del transporte sostenible por medio de la incorporación de novedosas soluciones que se adapten a los requisitos tecnológicos que se demanden.

En vistas al futuro, el vehículo eléctrico jugaría un papel importante al contribuir con la Estrategia Europea del 20/20/20, consiguiendo un ahorro energético y beneficios medioambientales mediante las siguientes políticas:

- 20% de reducción de emisiones por gases efecto invernadero.
- 20% de la energía final procedente de las renovables.
- 20% de reducción del consumo de energía primaria.

Con estos objetivos nos estaríamos encaminando hacia un nuevo modelo energético donde el vehículo eléctrico desempeñaría un papel importante en el equilibrio energético de la red, reportando beneficios al sistema eléctrico a la vez que un considerable ahorro económico.

Sin embargo, para alcanzar la madurez en este medio de transporte se necesita de una investigación e innovación en determinados aspectos tecnológicos que se presentan como factores clave para el éxito del vehículo eléctrico, como puede ser la autonomía de las baterías o el tiempo de recarga, que a día de hoy se están dando con el fin de equiparar completamente al vehículo convencional en calidad de prestaciones.



## 1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es dar respuesta a la posibilidad de plantearse el vehículo eléctrico como una herramienta de futuro en la operación de los sistemas eléctricos.

Para ello, se va a llevar a cabo el alcance de una serie de objetivos secundarios:

- Identificar los principales aspectos característicos de las diferentes tipologías del vehículo eléctrico, con especial hincapié en el eléctrico puro.
- Realizar un estudio comparativo entre las distintas alternativas en sistemas de almacenamiento.
- Describir las singularidades del sistema eléctrico español.
- Detallar el actual sistema de recarga del que disponemos para recargar el vehículo eléctrico.
- Analizar la integración de la demanda del vehículo eléctrico en un sistema eléctrico.

## 1.3 Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, a continuación se muestra una breve descripción de los temas abordados en cada uno de los 7 capítulos que componen su estructura:

El **Capítulo 1** presenta la introducción del proyecto y los objetivos por los que surgió su estudio y su correspondiente análisis.

En el **Capítulo 2** se describen los antecedentes del vehículo eléctrico como las diferentes tipologías que podemos encontrarnos en el mercado, destacando los principales parámetros de cada una de ellas, como las ventajas que conllevan el uso del vehículo eléctrico para elegirlo como medio de transporte.

Por medio del **Capítulo 3** se introduce la importancia de las tecnologías de almacenamiento energético en el vehículo eléctrico y las significativas particularidades a tener en cuenta, analizando a nivel funcional y constructivo los principales sistemas de almacenamiento con los que se puede equipar todo vehículo eléctrico.

En el **Capítulo 4** se analiza la estructura del sistema eléctrico español y su evolución en los últimos años en términos de generación y cobertura de la demanda, revisando las redes de transporte y distribución. De igual modo, se introduce el concepto de las redes inteligentes como medida para una efectiva integración del vehículo eléctrico y su repercusión en el sistema eléctrico.

En el **Capítulo 5** se plantea la actual situación del sistema de recarga, detallando los principales agentes implicados durante el suministro de carga. Además, se presentan los diferentes tipos, modos y conectores a emplear durante la recarga, como los posibles emplazamientos para llevar a cabo dicha actividad y las alternativas de recarga disponibles en la actualidad.



A continuación, en el **Capítulo 6** se exponen varios proyectos significativos acerca de la integración del vehículo eléctrico a nivel nacional, europeo e internacional, en los que se van a identificar las herramientas empleadas en cada uno de ellos y sus objetivos a alcanzar.

Por último, el **Capítulo 7** representa la parte práctica del proyecto en el cual se simula el impacto que ocasionaría la recarga del vehículo eléctrico en un sistema eléctrico de potencia a pequeña escala, analizando sus correspondientes resultados bajo diferentes escenarios de actuación.

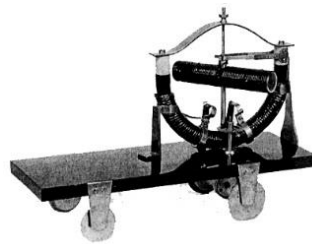
## Capítulo 2

### El vehículo eléctrico

#### 2.1 Revisión histórica

La puesta en marcha de la tecnología eléctrica en los medios de transporte no es un tema que haya surgido hace relativamente poco, al contrario, sus orígenes se remontan hace más de 150 años.

Los comienzos en el vehículo eléctrico surgieron con la invención del primer motor eléctrico acoplado en una maqueta, algo rudimentario, por el inventor húngaro Ányos Jedlik en 1828 [1]. Gracias a ello, Thomas Davenport en 1835 dio los primeros pasos hacia el diseño de la primera locomotora eléctrica y, poco después, el escocés Robert Davidson en 1838 llevó a cabo la fabricación y puesta en marcha de una similar, la cual llegaba a los 6km/h [2].



**Figura 1. Primer motor rudimentario de Ányos Jedlik. [1]**

Sin embargo, a pesar de estos primeros avances, el primer vehículo eléctrico considerado como tal llegó de la mano del inventor escocés Robert Anderson. Este vehículo consistía en un carruaje impulsado por un motor eléctrico al cual le suministraba la energía una batería no recargable, desventaja por aquel entonces para su autonomía. Por ello, se empezaron a buscar soluciones hasta que en el año 1859, tras una serie de avances conseguidos por el francés Gastón Planté y, años más tarde por Camille Faure, se diseñaron las primeras baterías recargables como las plomo-ácido [2]. Este hecho hizo que se consolidara su fabricación en serie, produciéndose un cambio importante en la industria automovilística.

Uno de los retos por aquel entonces era la velocidad que llegaban a alcanzar los vehículos, barrera que se venció de la mano del ingeniero Camille Jenatzy con La Jamais Contente en 1899. Llegó a superar el record de los 105 km/h, convirtiéndose en un punto clave para la expansión del automóvil eléctrico. Tanto es así, que en EE.UU el vehículo eléctrico representó casi un 30 % como medio de transporte [3].



**Figura 2. La Jamais Contente de Camille Jenatzy. [3]**

Años más tarde se siguió mejorando tanto en la autonomía como en la velocidad de los vehículos, llegando a alcanzar los 130 km/h gracias a las innovaciones introducidas en las baterías recargables, como las de níquel-hierro diseñadas por Thomas Edison [2].

Desde este momento, el interés hacia esta nueva red de transporte se hizo notar cada vez más, aumentando las ventas con respecto a los de gasolina debido al encarecimiento del precio del combustible. Esto fue así, que llegó a tal punto en el que las ventas de los eléctricos superaron con creces a los de gasolina, un 90% frente a un 10%, debido en parte a las altas clases de la sociedad, pues fueron los primeros usuarios en conducirlos. Su expansión iba en tal crecimiento, que una de sus primeras aplicaciones comerciales fue su implantación en una compañía de taxis creada en la ciudad de New York por la Electric Carriage and Wagon Company de Philadelphia [4].

Entre las primeras empresas dedicadas a la industria del automóvil eléctrico se encontraban Baker Motor Vehicle Company (1899-1914), que destacó por ser la primera en instaurar las baterías recargables níquel-hierro, al igual que Detroit Electric de Robert Anderson (1907-1939) [5].



**Figura 3. Modelos de las compañías Detroit Electric y Baker Motor. [5]**

Mientras tanto, cuando el vehículo eléctrico se encontraba en su mayor apogeo, llegaron las mejoras en los coches de gasolina de mano de Henry Ford con el modelo Ford T, el cual introducía un nuevo motor de combustión que mejoraba el arranque. Esto, junto a la implantación de la cadena de producción en masa y la bajada de precio del combustible, hicieron que el vehículo eléctrico fuera condenado a su extinción, dadas las mejores prestaciones de los de gasolina en tres variables que en aquel momento prevalecían: precio, velocidad y autonomía. Desde este momento la producción del vehículo eléctrico quedó estancada, llegando a su desaparición hacia 1920.

Fue entonces para los años 60 cuando empezó a invertirse la situación, cogiendo fuerza el vehículo eléctrico poco a poco, debido de nuevo al encarecimiento de la gasolina

tras las crisis que salvaguardaba por aquel entonces. Dada la cuestionable preocupación por el agotamiento de las alternativas de energía existentes y su contaminación, los fabricantes optaron por la electricidad como la mejor solución, una energía limpia y económica. Con ello llegó la aprobación en 1990 del mandato ZEV (*Zero Emission Vehicle*) en California [6], en la que la Junta de Recursos del Aire de California promovió el uso de vehículos con cero emisiones para lograr disminuir la contaminación y colaborar con el medio ambiente. De esta manera, se quería conseguir una mayor integración del vehículo eléctrico en la sociedad para ir sustituyendo al convencional vehículo de combustión.

Tras su implantación, General Motors sacó al mercado el primer coche moderno que era 100% eléctrico, el EV1, energéticamente limpio, mecánicamente sencillo y con una autonomía de 113 km a través de las baterías ácido-plomo, que posteriormente fueron reemplazadas por las níquel-metal hidruro, mejorando la autonomía hasta los 257 km. El EV1 fue inspiración para modelos de otras marcas para cumplir así con la ley, con modelos como el Toyota RAV4 EV, Honda EV Plus, Nissan Altra EV o el nuevo Ford Ranger EV [1].

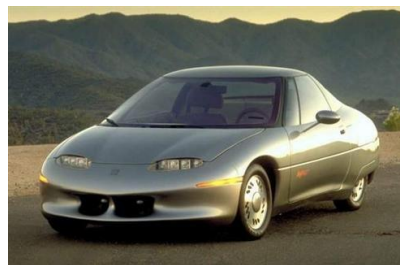


Figura 4. Modelo EV1 de General Motors. [1]

La situación actual del vehículo eléctrico sigue en crecimiento hacia su apogeo, pues el compromiso por parte de la población con el medio ambiente es cada vez mayor. La preocupación por las emisiones de CO<sub>2</sub> y con ello la calidad del aire, ha promovido dejar de lado el vehículo convencional, dado que la mayor parte de las emisiones son debidas al sector del transporte. Esto, junto a la diferencia de precios entre ambos suministros de energía, ha incitado a elegir el vehículo eléctrico como una solución mucho más limpia y que cada vez se equipara al de gasolina en prestaciones.

## 2.2 Tipologías del vehículo eléctrico

La electrificación del transporte con el paso de los años ha ido mejorando en prestaciones, tales como el rendimiento y la autonomía y, en función de su grado de integración, se puede hablar de mejoras en términos de eficiencia y movilidad. Se define como grado de hibridación eléctrica (GHE) a la relación entre la potencia eléctrica y la potencia total de tracción, y se puede decir que a mayor grado de electrificación en el vehículo, la eficiencia será mayor, pero a la vez el precio se verá encarecido. Partiendo de esta visión, surgen diversas alternativas de electrificación donde coexista coste y eficiencia de forma asequible, desde un nivel de hibridación eléctrica bajo hasta llegar al vehículo eléctrico puro.

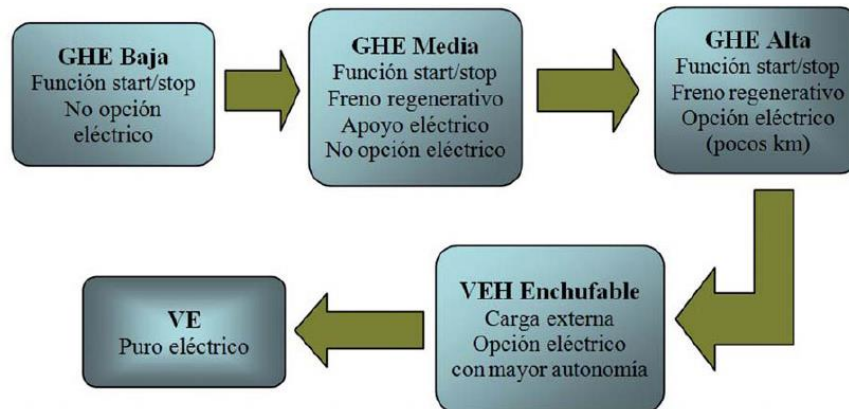


Figura 5. Evolución del vehículo en función del grado de hibridación eléctrica. [7]

A continuación, se va a analizar cada vehículo en función de su grado de hibridación eléctrica (GHE), distinguiendo fundamentalmente tres tipos de vehículos:

- Vehículo híbrido eléctrico o HEV (*Hybrid Electric Vehicle*)
- Vehículo híbrido enchufable o PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*)
- Vehículo eléctrico o EV (*Electric Vehicle*)

### 2.2.1 Vehículo híbrido eléctrico

Estos vehículos son el resultado de la primera evolución hacia el vehículo eléctrico, con un funcionamiento menos limpio, pero con una mayor eficiencia que los de motor de combustión interna. Funcionan gracias a la combinación de un motor de combustión interna (MCI) y uno eléctrico, para así conseguir una menor dependencia del combustible.

Tal y como se había comentado anteriormente, existen varios tipos de vehículos en función del grado de hibridación eléctrica:

#### Vehículos con GHE bajo o Micro HEV

En estos vehículos no entra en juego el motor eléctrico en la aceleración como en la conducción y, a diferencia del convencional, posee la capacidad de recuperar energía con la integración de sistemas eléctricos como el *Start-Stop*. A través de este sistema, se consigue parar automáticamente el motor de combustión interna al detenerse el vehículo y volver al arranque al acelerar, con el fin de reducir las emisiones hasta un 7% y dar un mejor uso al combustible al evitar el funcionamiento del motor en ralentí.

#### Vehículos con GHE medio o Mild HEV

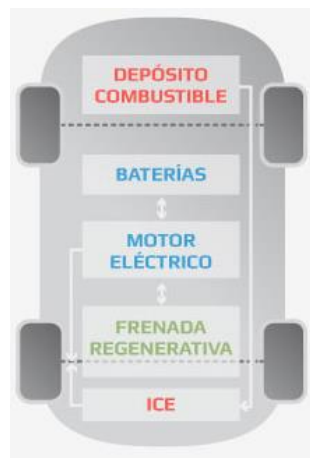
Surgen de la necesidad de reducir el par de arranque para que así sea más suave, por medio de la incorporación de un pequeño motor eléctrico que suministra una potencia extra al de combustión, permitiendo la aceleración en modo eléctrico. De esta manera, el consumo de combustible se reduce al contribuir durante el par de arranque, con ahorros del 15-20%. Además del sistema *Start-Stop*, incorporan el sistema de frenada regenerativa para recuperar la energía que se desprende durante las deceleraciones (energía en forma de calor), almacenándose en forma de energía eléctrica en las baterías.



### Vehículos con GHE alto o Full HEV

Por último tenemos los Full HEV, con una tecnología más eficiente capaz de elegir la fuente que le suministre la energía en cada momento. La combinación de los dos motores en esta tipología le otorga la gran ventaja de operar en altos rendimientos, al disponer de un motor térmico de menor tamaño que opera en su punto óptimo con una potencia más ajustada. Este tipo de hibridación permite un funcionamiento limpio a bajas velocidades en entornos urbanos, movido por la electricidad almacenada en las baterías, y a la vez recorrer grandes distancias al disponer del motor térmico. Cuando la tracción del vehículo es puramente eléctrica, el consumo de combustible puede verse disminuido en un 25% y, por consiguiente, las emisiones contaminantes.

Las baterías empleadas suelen ser de pequeños tamaños, ya que la tracción eléctrica se pone de manifiesto como soporte durante la aceleración y para la alternancia entre el motor eléctrico y el de combustión. Con la energía almacenada, permiten una conducción puramente eléctrica alrededor de los 10 a 15 km.



**Figura 6. Estructura del vehículo híbrido eléctrico. [8]**

En cuanto al funcionamiento de un híbrido eléctrico, depende de las siguientes condiciones de marcha:

- Arranque
- Crucero normal
- Aceleración
- Deceleración
- Parada

Durante el arranque, la batería se encarga de suministrar la energía necesaria al motor eléctrico encargado de impulsar al vehículo, debido a que el térmico no es capaz de vencer el par resistente que se genera a bajas velocidades. Una vez alcanzada la velocidad y aceleración óptimas en términos de eficiencia, se pone en funcionamiento el motor térmico para proporcionar el par demandado por las ruedas. En el caso de necesitar una aceleración, el motor eléctrico se encargará de ayudar al térmico para vencer el par generado.



Durante la conducción, llega un punto en el que no se demanda aceleración sino mantener la velocidad, conocido como punto de crucero. Es por ello que el motor térmico trabaja en su zona de régimen óptima en relación a sus prestaciones y consumo, entregando potencia para impulsar el vehículo y recargar la batería. Mientras que, cuando se quiera frenar de forma parcial o total, el motor térmico se para o sigue girando sin consumir, y la energía que se desprende se utiliza para cargar la batería a través de la frenada regenerativa. Por último, cuando el vehículo se encuentra en estado de parada, ambos motores se paran y dejan de consumir energía.

Todo el funcionamiento anteriormente descrito se representa en la Figura 7 para facilitar su comprensión desde el punto de vista gráfico, distinguiéndose las distintas etapas de conducción.

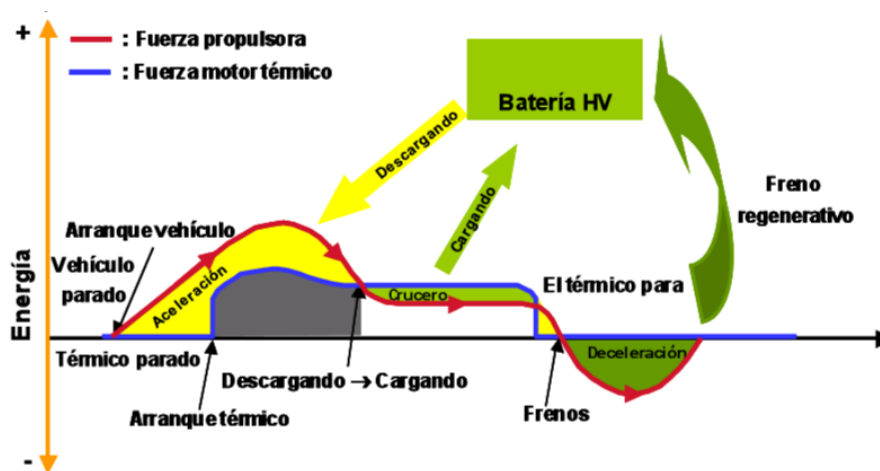
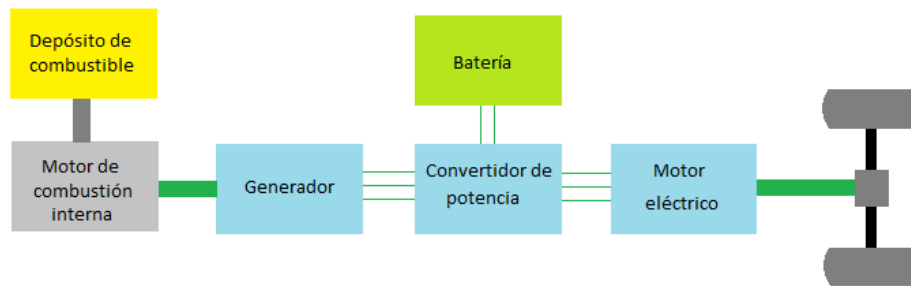


Figura 7. Diagrama de funcionamiento del vehículo híbrido. [9]

Dependiendo del requerimiento que se necesite durante el trayecto, entra en funcionamiento cada motor de manera independiente o a la vez, gracias a las configuraciones existentes en los vehículos híbridos eléctricos: serie, paralelo y serie-paralelo.

### Configuración serie

En este tipo de configuración el vehículo es impulsado por un motor eléctrico por medio del acoplamiento eléctrico, el cual se encarga de proporcionar la potencia propulsiva. Toda la energía necesaria para ello proviene del motor térmico que alimenta un generador, el cual se puede encargar de alimentar directamente al motor eléctrico o de recargar las baterías a velocidades de crucero. Para este caso, en el momento en el que están recargadas, el motor de combustión interna se desconecta y el suministro de energía parte de las baterías. Sin embargo, ésta no es la única forma de recargarlas, pues también puede ser invirtiendo el funcionamiento del motor eléctrico como generador durante las deceleraciones y, de esta forma, almacenar esa energía en las baterías.



**Figura 8. Disposición del vehículo en configuración serie. [10]**

Una clara ventaja en esta configuración es la sencillez en cuanto a su diseño, debido a que el acoplamiento es eléctrico, y a su distribución, pues al no haber conexión directa entre ambos motores pueden ser montados por separado para conseguir una reducción en el peso del conjunto. A la vez, al no haber acople mecánico directo entre el motor de combustión y las ruedas, hacen que su funcionamiento sea más eficiente al disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorar el uso del combustible.

Sin embargo, cuando la energía es suministrada por el motor térmico, tiene que circular por medio del generador y de un sistema de transmisión, ocasionando grandes pérdidas durante ese recorrido de transformación de la energía mecánica en eléctrica y viceversa, siendo necesario sobredimensionar tanto el motor de combustión como las baterías para que sean capaces de abastecer la energía demandada por el motor eléctrico.

### Configuración paralelo

En esta configuración, tanto el motor térmico como eléctrico suministran la energía necesaria a las ruedas gracias al acoplamiento mecánico. Esto hace que puedan ser usados de forma independiente o a la vez, para así conseguir suministrar mayor potencia.

La puesta en marcha del vehículo se consigue con la parte eléctrica, ya que el térmico suele ser de menor tamaño, encargándose de su tracción por debajo de los 30 km/h y dar apoyo al de combustión interna en los picos de potencia. De esta manera, la potencia de propulsión que necesita el motor eléctrico es menor que en serie, ya que el térmico entra en funcionamiento para complementarlo en los puntos donde obtener una mayor eficiencia, aunque se considera algo complejo de conseguir debido el acople mecánico entre el motor y las ruedas. Al igual que en serie, la energía que se desprende en los puntos de frenada se emplea para recargar la batería.

Aunque el diseño mecánico y el sistema de control son más complejos, se trata de un diseño compacto. Como la energía es aportada gracias a dos motores, no es necesario sobredimensionar las baterías y el motor eléctrico, cosa que sí sucedía en la configuración serie.

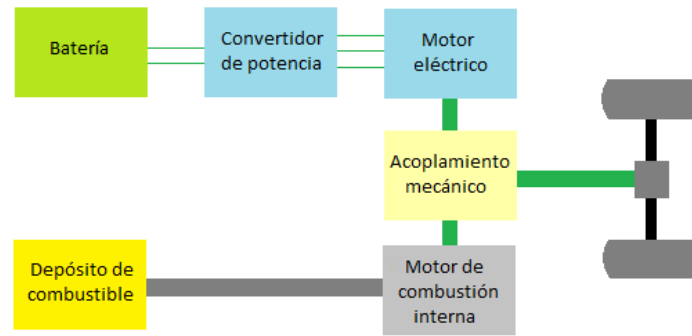


Figura 9. Disposición del vehículo en configuración paralelo. [10]

El hecho de que el suministro de energía proceda de dos fuentes diferentes, hace que no haya conversiones de energía de por medio, por lo que se consigue una disminución en cuanto a pérdidas. Cabe decir que por regla general, los recorridos que solemos realizar se tratan de tramos cortos y frecuentes, por lo que se entendería que con la configuración en paralelo, el motor eléctrico se encontraría en funcionamiento la mayor parte del tiempo.

### Configuración serie-paralelo

Ambos motores se encargan de poner en funcionamiento el vehículo gracias al acople mecánico. La mayor parte de las veces existe una combinación de ambas fuentes de energía, pero esto depende del régimen de giro. Bien puede funcionar completamente en configuración serie o paralelo, o una combinación de ambas, lo cual hace de él un diseño complejo y caro, pero se obtiene un mejor rendimiento global en la conducción.

A bajas velocidades, el motor de combustión suministra energía al generador que se encarga de cargar la batería o poner en funcionamiento el motor eléctrico (configuración serie). Mientras que a elevadas velocidades, el vehículo es puesto en movimiento por el motor térmico, el cual funciona en su rango de máxima eficiencia. Esta configuración cuenta también con la capacidad de cargar las baterías a velocidades de crucero.

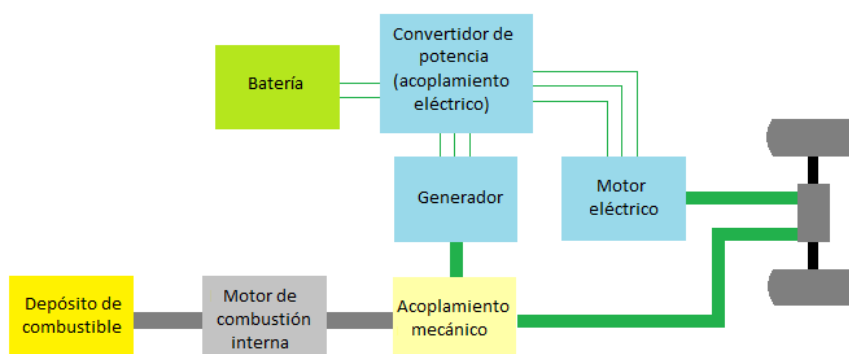


Figura 10. Disposición del vehículo en configuración serie-paralelo. [10]

Para finalizar, se pueden concluir tres características principales de los vehículos híbridos:

- Se reducen las pérdidas gracias al sistema *Start-Stop*, de forma que el motor de combustión interna se detiene automáticamente cuando el vehículo está parado.

- Mayor aprovechamiento de la energía que se desprende en las frenadas o que se excede por el motor térmico, capaz de almacenarse en energía eléctrica en las baterías.
- Funcionamiento más eficiente, ya que el motor eléctrico se encarga del vehículo cuando la eficiencia del de combustión es baja, esto es durante el arranque y a bajas velocidades, pero también se encarga de proporcionar energía cuando trabaja de forma eficiente.

## 2.2.2 Vehículo híbrido enchufable

Estos vehículos son conocidos como vehículos *Plug-in* y se diferencian del vehículo híbrido en que las baterías tienen acceso a ser recargadas de forma independiente a través de una conexión a la red eléctrica. Estos vehículos tienen un doble comportamiento, pues en las distancias cortas funcionan como vehículo eléctrico y en las distancias largas como híbrido eléctrico.

En cuanto a características estructurales, cabe destacar que el motor de combustión interna es más pequeño que el del vehículo convencional, dado que en esta tipología el uso del motor eléctrico va a ser mayor, sacándole el mayor partido y consiguiendo mayores autonomías en modo eléctrico durante 25 y 50 km, gracias al equipamiento de baterías de mayor tamaño.

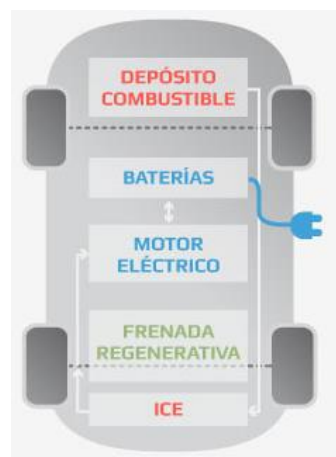


Figura 11. Estructura del vehículo híbrido enchufable. [8]

Esta tipología se considera la transición entre el vehículo híbrido y el eléctrico puro, reuniendo una serie de ventajas de ambos que lo hacen portador clave para llevar a cabo la electrificación del vehículo en entornos urbanos.

Dado que estadísticamente la sociedad emplea el vehículo como medio de transporte para desplazamientos reiterados y de poca distancia, el híbrido enchufable es ideal para un entorno urbano donde se puede recuperar la energía en las frenadas y no consumir durante las paradas. Éste sería impulsado por el motor eléctrico, contando siempre con el motor térmico para realizar autonomías mayores. Pero lo realmente importante es que, realizando un análisis global, la mayoría de kilómetros recorridos serían gracias al uso del motor eléctrico y, por tanto, sustentados con energía limpia de la red.

Las ventajas que presenta esta hibridación son las siguientes:

- Menor consumo de combustible por cada kWh consumido.
- Mayor eficiencia del combustible.
- Se consiguen mayores autonomías en modo eléctrico.
- Menores emisiones contaminantes, sobre todo si la electricidad consumida es de origen renovable como la eólica.
- Ahorro económico, como contribución al aplanamiento de la curva de demanda si se recargan las baterías durante las horas valle.
- Con ellos surge la posibilidad de comportarse como acumuladores de energía y poder devolver la energía sobrante a la red.

Sin embargo, la desventaja de esta tipología reside en el incremento del grado de hibridación, pues como consecuencia a ello el coste del vehículo se ve aumentado, al igual que ocurre con el peso y el tamaño de las baterías.

Cabe concluir que el PHEV se presenta como una alternativa al coche eléctrico, tanto por su semejante comportamiento en desplazamientos urbanos, como por una mayor flexibilidad y rendimiento en recorridos interurbanos.

En cuanto a los modelos que podemos encontrarnos en el mercado automovilístico, en el apartado A1 del Anexo se muestra una gama de vehículos híbridos enchufables en el que se pueden consultar sus fichas técnicas en función del comercializador.

### 2.2.3 Vehículo eléctrico

El vehículo totalmente eléctrico o vehículo eléctrico de baterías elimina el motor de combustión, por lo que las ruedas son impulsadas por un motor eléctrico. La energía para ello se almacena en las baterías que llega a través de los puntos de recarga a la red o mediante la frenada regenerativa. Estos vehículos permiten recorrer distancias de hasta 150 y 300 km debido a que están abastecidos con la tecnología más avanzada en baterías, como las de litio.

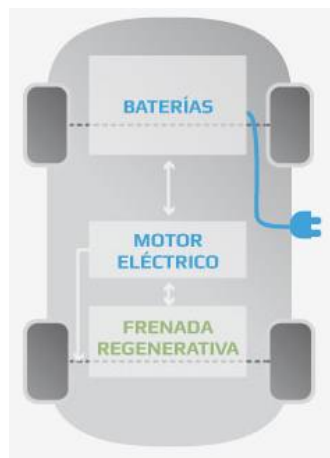


Figura 12. Estructura del vehículo eléctrico. [8]



El motor eléctrico con el que trabajan es de elevada eficiencia, robustez y con la capacidad de controlar de forma flexible tanto la velocidad como el par. Suelen disponer normalmente de un solo motor acoplado directamente a la transmisión, pero existe la posibilidad de acoplar varios motores directamente a cada rueda, evitando así pérdidas de transmisión y eliminando el mecanismo diferencial. Durante su funcionamiento apenas ocasionan vibraciones o ruido, pudiendo llegar a elevadas picos de giro. Al ser su curva de par más plana, su régimen óptimo se encuentra a bajas velocidades y son capaces de poner en marcha el vehículo desde velocidad cero, por lo que elimina la necesidad del embrague.

Respecto al vehículo convencional, se pueden prescindir de partes mecánicas que hacen del vehículo un mantenimiento menor, por lo que los costes de producción se ven reducidos. Aunque el precio de adquisición sea elevado, principalmente por las baterías, el precio por kilómetro recorrido es mucho menor que el del vehículo convencional, lo cual es un factor importante a tener en cuenta durante la vida útil del vehículo. Debido a la limitación en la autonomía de las baterías y a la escasa disponibilidad de una red de estaciones de recarga rápida, el mayor uso de los vehículos eléctricos sería para desplazamientos cortos, por lo que su uso idóneo sería urbano, donde se sacaría partido a la energía que se pierde en las deceleraciones y así mejorar su eficiencia.

Desde el punto de vista del sistema eléctrico, al igual que ocurre con los PHEV, al tener la posibilidad de conexión a red, permite la opción de actuar como almacenamiento desde las baterías a la red en las horas valle (kWh más barato) para posteriormente devolverla a la red en las horas de mayor demanda (kWh más caro) en aquellos países donde esté ya regulado dicha práctica. Este concepto es conocido como V2G (*Vehicle-to-Grid*), y mediante su aplicación se conseguiría una mejor gestión de la red, aplanar la curva de demanda, dar un mejor uso a las reservas de potencia activa, como dar un mayor uso de las renovables. Aparte, se conseguiría un considerable ahorro económico, pues suponiendo que un vehículo eléctrico recorra 17.000 km al año con recargas en el 80% de las veces con tarifa nocturna, el consumo anual de electricidad sería de 800€. Mientras que con el vehículo convencional, recorrer esa misma distancia conllevaría un coste de 2.000-2.500€ en combustible [8].

El hecho de que el vehículo eléctrico no esté lejos de convivir con el vehículo convencional es un hecho indiscutible, pues una de las principales ventajas es que no contamina directamente durante su funcionamiento con emisiones como CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. Pero para llegar a una mayor integración en las carreteras, se necesitan conseguir mayores autonomías a través de mejores capacidades en los sistemas de almacenamiento, al igual que un abaratamiento de los mismos. De forma paralela a la actual red de gasolineras, es preciso tener acceso a una amplia infraestructura de recarga eléctrica en todas sus modalidades y segmentos de aplicación, como recargarlos durante breves periodos de tiempo. A modo comparativo, el vehículo convencional recorre mayores kilómetros debido a las altas densidades energéticas de la gasolina (12,2 kWh/kg) como del gasoil (12,7 kWh/kg), frente a la inferior capacidad de almacenamiento de las mejores baterías de litio (120 Wh/kg) [11].

En el momento en el que se superen estas barreras en autonomía y libertad, la mayoría de ciudadanos podrá optar por el vehículo eléctrico como una opción de movilidad eficiente para el futuro, gracias al uso de una energía limpia como la energía eléctrica. Con la integración del vehículo eléctrico se conseguiría una menor dependencia de los combustibles fósiles, gracias a la recarga del vehículo con electricidad procedente de origen renovable, pudiendo alcanzar un ahorro del 46% en emisiones de CO<sub>2</sub> para el 2050 [12].

A día de hoy el acceso al mercado de vehículos eléctricos es múltiple, pudiendo optar a una gran variedad de modelos. Con el fin de ampliar esta información, en el apartado A2 del Anexo se puede consultar una lista con la relación entre el fabricante y el vehículo que comercializan.

### 2.3 ¿Por qué elegir el vehículo eléctrico?

El sector del transporte representa un fuerte consumidor energético en la Unión Europea, con una dependencia de más del 90% de los combustibles fósiles. Por ello el vehículo eléctrico se presenta como la solución alternativa al vehículo convencional para contribuir con los objetivos europeos propuestos para el 2020, consiguiendo mejorar la eficiencia energética como reducir las emisiones al medio ambiente, además de representar un punto clave en los sistemas eléctricos.

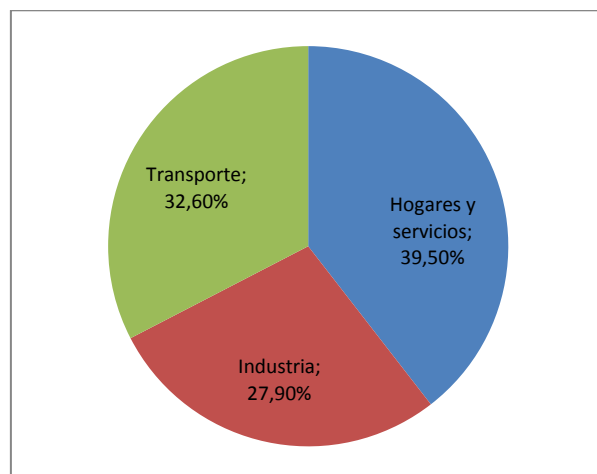


Figura 13. Estructura del consumo de energía final en la UE. [13]

Con la integración del vehículo eléctrico se conseguiría alcanzar una menor dependencia de los países productores de petróleo, logrando alcanzar los objetivos de una política económica competitiva como una seguridad en el suministro. Los mayores impactos ocasionados por la integración del vehículo eléctrico en nuestras ciudades serían los siguientes:

#### Eficiencia energética

En términos de eficiencia energética, el vehículo eléctrico supera al de combustión interna desde el punto de vista del rendimiento de los motores, pues en el caso del vehículo de combustión interna transforman el 25% de la energía química del combustible

en energía mecánica, desprovechándose un 75% en rozamientos internos. Para realizar un análisis comparativo entre ambas tecnologías, se puede hacer desde los puntos de vista “Desde el depósito a la rueda” o TTW (*Tank to Wheel*), y “Desde la planta a la rueda” o WTW (*Well to Wheel*). En ambos, el vehículo eléctrico supera en eficiencia al convencional, sin embargo el WTW permite un visionado global de la eficiencia, desde la generación de la energía hasta el suministro de la misma al vehículo eléctrico. Para ello, es muy importante tener en cuenta la fuente de suministro de energía, ya que si se trata de una central térmica su eficiencia es alrededor del 55%, o el 100% si se trata de fuentes renovables.

En el caso del vehículo híbrido, con la introducción del motor eléctrico en funcionamiento con el convencional, produce un ligero aumento del 5% en la eficiencia energética. Por su parte, el eléctrico puro posee las mejores eficiencias energéticas, con un valor del 77% si la energía de las baterías es de origen renovable o un 42% si se cargan en base a un mix de gas natural. Por último, queda decir del híbrido enchufable que dispondrá de una eficiencia superior a la del vehículo convencional y el híbrido, pues al tratarse una combinación entre ambos dispondrá del doble de la eficiencia de un convencional, entorno al 31-49% [13]. En la siguiente Figura 14 se muestra de forma esquemática todo lo comentado anteriormente.

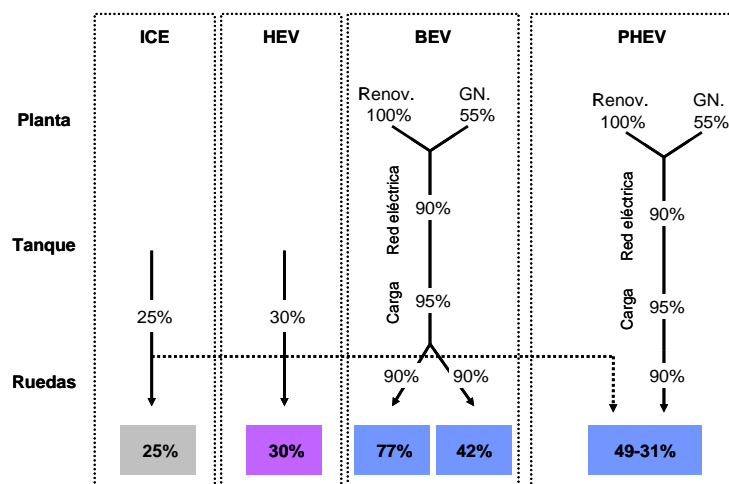


Figura 14. Comparación de la eficiencia energética entre el vehículo eléctrico y el vehículo convencional desde el punto de vista TTW y WTW. [13]

### Impacto medioambiental

Gracias a la electrificación del transporte se conseguiría un menor impacto medioambiental, pues el vehículo eléctrico desempeña un papel fundamental en la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, debido a su mayor eficiencia y a la nula contaminación durante su funcionamiento.

Según estudios, con la integración de una flota de 1.000 vehículos eléctricos en una ciudad, se conseguiría reducir a nivel anual una emisión de 30.000 kg de gases contaminantes como CO, NOx o HC, y en torno a 2 toneladas de CO<sub>2</sub>. Mientras que si nos ponemos a mirar aguas arriba, incluyendo los costes energéticos como medioambientales, gran parte del impacto vendrá determinado por la fuente de energía que genera la



electricidad. A nivel nacional se emiten 277 g de CO<sub>2</sub>/kWh hasta que la electricidad llega a consumirse, por lo que durante la vida útil del vehículo eléctrico se ahorraría entre 10 y 30 toneladas de CO<sub>2</sub> en función de la tecnología empleada para generar la electricidad.

Con una estimación de un mix futuro del 40% renovable (superior al 20% establecido por la UE) y del 60% de ciclos combinados, las emisiones de CO<sub>2</sub> de un vehículo eléctrico serían algo más de 40 g/km frente a los 160 g/km del convencional, cumpliendo de esta manera con uno de los objetivos europeos, tal y como se observa en el Figura 15, y que se conseguiría notar una mayor diferencia si las recargas de las baterías se hiciesen con energía de origen renovable.

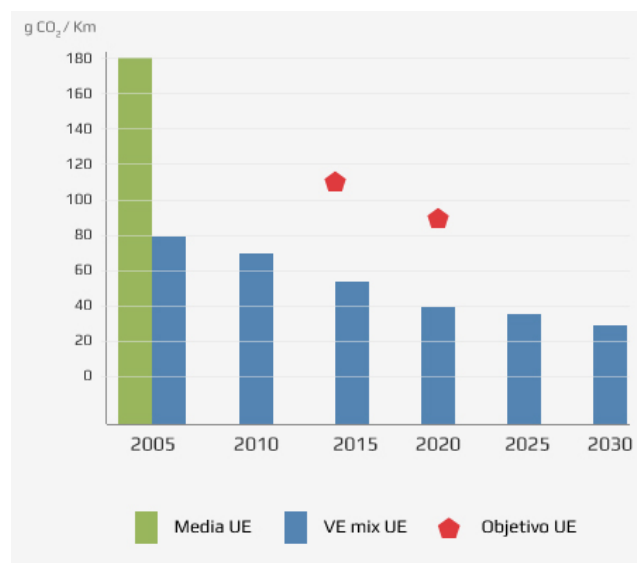


Figura 15. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> por km recorrido. [14]

### Contaminación acústica

Otro de los grandes problemas que nos podemos encontrar en los medios urbanos es la contaminación acústica debida al tráfico ocasionado. Los ruidos emitidos por el vehículo eléctrico durante su funcionamiento a bajas velocidades son casi nulos, y si los hay son debidos a la rodadura del propio vehículo, ya que los decibelios emitidos por el motor eléctrico son imperceptibles para el oído humano, nada que ver con el MCI, pues era la principal fuente de ruido. Con la implantación del vehículo eléctrico en las ciudades, se mejoraría la calidad de vida tanto para el conductor como para los peatones, haciendo de las ciudades un entorno agradable, y para el conductor un relajada conducción en ausencia de ruido y vibraciones.

### Ahorro económico

A la hora de comprar un vehículo eléctrico, su precio de adquisición es mayor al del vehículo convencional debido principalmente a que es una tecnología en vías de desarrollo, al contrario de la madurez de los vehículos de combustión interna. Sin embargo, esto no tiene que ser un punto en contra, pues hay que tener en cuenta diversos costes que afectan durante la vida útil del vehículo.



Una importante parte del encarecimiento del vehículo eléctrico es debida a las baterías, representando casi un 60% de dicho coste, pero que a espensas del vehículo convencional, es como si se tuviera que comprar por adelantado el 60% del combustible a utilizar durante un periodo de tiempo. En cuanto a la estructura del vehículo eléctrico, al necesitar de un menor número de componentes y a la mayor sencillez del motor eléctrico, hace que los costes de mantenimiento sean mínimos al evitarse cambios de aceite, problemas en el tubo de escape, desgaste de la caja de cambios o cambios de la correa de transmisión, entre otros.

Por último, el coste energético durante la vida útil del vehículo es un hecho importante a tener en cuenta en la elección del vehículo eléctrico, pues existe una diferencia elevada entre el coste por kWh para recargar las baterías y repostar el vehículo convencional con litros de gasolina/gasol. En la siguiente Tabla 1 se muestran unos costes orientativos para cada vehículo:

	Vehículo eléctrico	Vehículo de motor de combustión interna
<b>Hipótesis</b>	Consumo 100 km: 14 kWh Coste por kWh según tarifa: T. REGULADA (TUR): 0,14286€ T. DISCRIMACIÓN HORARIA: 0,05714€	Consumo 100 km: 6,5 litros Coste por litro: 1,30€
<b>Resultados</b>	Consumo 100 Km según tarifa: Desde 0,80€ hasta 2€	Consumo 100 Km: 8,45€

**Tabla 1. Comparativa de costes energéticos entre el vehículo eléctrico y el vehículo con motor de combustión interna. [15]**

Para tener una visión más global, en el supuesto de recorrer 17.000 km/año y con las hipótesis descritas en la Tabla 1, el ahorro energético conseguido con un vehículo frente a otro sería de 1100 €/año. De esta manera, aunque el precio de adquisición sea elevado, a lo largo se conseguiría un equilibrio de costes operativos entre ambas tecnologías.

#### Acceso e integración de las energías renovables en la red

A día de hoy, la introducción del vehículo eléctrico en la red permitiría una menor dependencia de los combustibles fósiles, y de esta manera optar por una amplia gama de combinaciones energéticas como las energías renovables, aprovechando la energía que se deja de producir por la falta de demanda, con especial interés en la eólica. La generación de energía eólica es muy variable y regularmente hay un mayor recurso eólico durante los periodos nocturnos, coincidiendo de esta manera con las horas valle, momento en el que no siempre es posible conseguir su integración en el sistema si la oferta supera a la demanda. Por ello, si se recargan los vehículos durante estos periodos, se estaría haciendo de una energía limpia con cero emisiones. A la vez, se aumentaría su gado de integración en la red aprovechando mejor la energía disponible, y de esta manera no haría falta llevar a cabo la desconexión de parques eólicos para evitar desequilibrios en el sistema por una producción que excede los límites de seguridad. Se estima que el consumo de 1,7 millones de vehículos eléctricos sea abastecido por un 25% de la generación renovable en 2020, evitando de esta manera su vertido en la red junto a sus correspondientes problemas de gestionabilidad [16].



### Aplanamiento de la curva de demanda

Un aplanamiento de la curva de la demanda se conseguiría bien, a través de la recarga inteligente o con las Smart Grids.

- **Recarga inteligente**

Con una recarga durante las horas punta, la diferencia entre los picos de mayor y menor consumo sería mayor, haciendo que el sistema eléctrico sea menos eficiente. Este hecho originaría una sobrecarga durante cortos periodos de tiempo sobre las infraestructuras, necesitando un aumento en la capacidad de generación y transporte y, por tanto, un mayor suministro de las centrales más contaminantes, ocasionando mayores emisiones de CO<sub>2</sub>. Mientras que con una recarga durante los periodos valle con gestión inteligente, permite un aplanamiento de la curva de demanda, incrementando la eficiencia del sistema como la integración de energías renovables.

- **Smart Grids**

Estas redes inteligentes permiten integrar todo tipo de acciones y comportamientos llevados a cabo por los usuarios conectados a ella, asegurando una sostenibilidad y eficiencia energética del sistema. De esta forma se crearía una interacción entre la red eléctrica y el vehículo, la cual lo emplearía como sistema de almacenamiento para reducir los altos picos de producción eléctrica con el fin de aplanar la curva de demanda. Por ello, en el mercado eléctrico, empresas dedicadas tanto a la regulación como a la gestión de los sistemas eléctricos, encontrarían en el vehículo eléctrico la alternativa a ello.



## Capítulo 3

### Sistemas de almacenamiento

#### 3.1 Introducción al almacenamiento energético

Una de las grandes diferencias entre el vehículo eléctrico y el de combustión interna reside en la forma de almacenar la energía, de tal forma que los depósitos convencionales son reemplazados por diversas tecnologías. Los acumuladores de energía permiten almacenar energía para posteriormente ser utilizada en diversas operaciones, separando de esta manera la generación de energía de la demanda de la misma. El aumento de la capacidad de almacenamiento energético se considera una solución para la mejora de la eficiencia, fiabilidad y coste del sistema eléctrico, conseguido gracias al aplanamiento de la curva de demanda y a una mayor integración de las energías renovables, evitando así el vertido de esta energía limpia en los periodos valle y haciendo más seguro al sistema eléctrico.

La energía eléctrica se sustenta bajo tres pilares principales: generación, transporte y distribución. Sin embargo, el almacenamiento en grandes cantidades aunque es dificultoso, se puede diferenciar tres formas de hacerlo durante el proceso de suministro [17]:

- Almacenamiento a gran escala (GW)
- Almacenamiento en redes (MW)
- Almacenamiento a nivel usuario (kW)

Las tecnologías que a día de hoy están más desarrolladas para almacenar energía son diversas como las baterías electroquímicas, los supercondensadores, las pilas de combustible o los condensadores, entre otros. Para comparar estos sistemas, se utilizan los conceptos de energía específica (Wh/kg) y densidad de potencia (W/kg) mostrados en el diagrama de Ragone de la Figura 16, para así evaluar la capacidad de almacenamiento y el rendimiento de cada tecnología. De la mano de estos sistemas, harán del almacenamiento eléctrico un aporte de valor en cada paso hacia el suministro de electricidad, convirtiéndose en primordiales en el funcionamiento del sistema eléctrico de la mano del vehículo eléctrico.

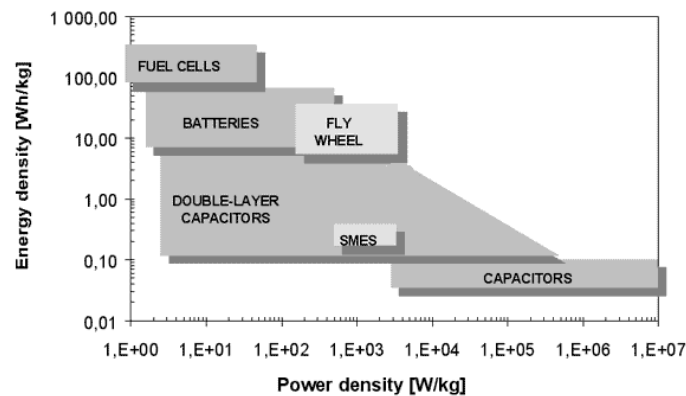


Figura 16. Diagrama de Ragone. [18]

Cada tecnología tiene una serie de ventajas y desventajas según el uso de aplicación que se le dé, pero a pesar de ello, hay que tener claro que para una mejor eficiencia durante la puesta en marcha del vehículo eléctrico y una mayor integración, se deben cumplir una serie de especificaciones a tener en cuenta, como las siguientes:

- Valores de energía específica y densidad de potencia elevados, para así conseguir mayores autonomías.
- Una larga vida útil para amortizar la inversión inicial.
- Baja tasa de auto-descarga para evitar pérdidas.
- Alta capacidad de recarga en poco tiempo y de forma continua.
- Precios económicos para una mayor aceptación en el mercado.
- Un diseño que cuente con materiales de bajo impacto medioambiental.
- Un mantenimiento escaso y económico.
- Poder hacer un uso reciclado de ellas.
- Funcionamiento seguro.

Actualmente, no existe ninguna tecnología que reúna por sí sola todas y cada una de las características anteriormente mencionadas, por lo que se busca aquella que ofrezca el mayor número de prestaciones en conjunto.

### 3.2 Baterías

Las baterías son una parte del vehículo eléctrico muy importante y su elección es primordial, ya que de su fiabilidad y de su autonomía depende el futuro del vehículo eléctrico. Se trata de un dispositivo que almacena energía eléctrica mediante procesos electroquímicos y que la devuelve posteriormente con ciertas pérdidas, pudiendo reiterarse este proceso de forma continua o no, diferenciándose así entre las baterías primarias o secundarias.

Las primarias pueden ser utilizadas una sola vez hasta que se descargan y son sustituidas, por lo que están destinadas a aplicaciones que requieran de bajas potencias y dimensiones reducidas. Mientras que las secundarias, permiten un ciclo continuo de carga y descarga con aplicaciones desde pequeña a gran potencia. Debido a la facilidad de aplicación en los vehículos eléctricos, resultan las baterías recargables las que poseen

mejores prestaciones al evitarse, principalmente, el inconveniente de sustituirlas durante cada descarga.

El principio de funcionamiento para el almacenamiento electroquímico se basa en un proceso reversible llamado redox (reducción-oxidación), bajo dos operaciones fundamentales: el proceso de carga y el de descarga. Durante la descarga, el ánodo pierde electrones al oxidarse, mientras que el cátodo se reduce al ganarlos, circulando estos electrones a través de un circuito externo y originando una corriente que suministra de energía a una carga. Mientras que durante la carga, ocurre el proceso contrario, la oxidación se produce en el electrodo positivo y la reducción en el negativo. Estas reacciones no se pueden dar de manera infinita, pues con el paso del tiempo los electrodos terminan por debilitarse, perdiendo capacidad la batería de forma paulatina hasta que se estropean por completo.

En cuanto a su estructura, todas las baterías se componen de forma similar con un determinado número de celdas electroquímicas apiladas y conectadas entre sí formando módulos, a través de conexiones en serie o paralelo, para así conseguir las especificaciones necesarias en aplicaciones concretas de tensión y corriente. Estas celdas son la unidad más pequeña que las constituye y están formadas por un electrodo positivo (cátodo) y otro negativo (ánodo), sumergidos en un electrolito. Éste suele tratarse de un medio acuoso que presenta una elevada conductividad iónica y un comportamiento como aislante electrónico. Para confinar el electrolito en las celdas, éste se impregna en un separador, evitando de esta manera el contacto directo entre ambos electrodos.

La tecnología de las baterías es un tema que está en desarrollo continuo del que se prevé un futuro alentador, pues son una gran diversidad de aparatos tecnológicos los que se sustentan de esta tecnología y, por tanto, van surgiendo cada día innovaciones que se van incorporando al mercado.

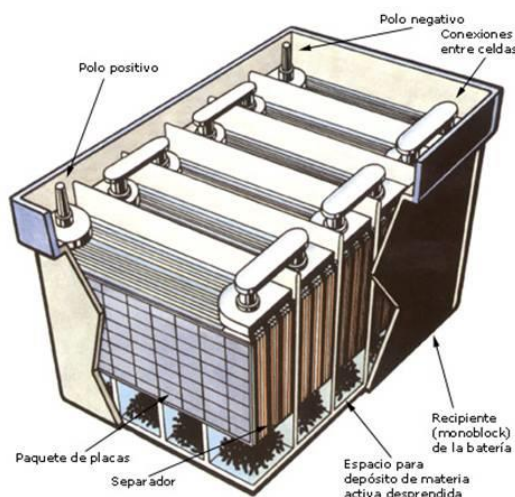


Figura 17. Estructura de una batería. [19]

Entre sus campos de aplicación en los vehículos, se pueden distinguir las baterías que dan soporte durante el arranque, utilizadas en los vehículos convencionales para aportar



grandes cantidades de energía durante breves periodos de tiempo. Y por otro lado, las baterías de tracción, que deben soportar constantes ciclos de carga/descarga y son empleadas en los vehículos eléctricos/híbridos de forma equiparable al tradicional depósito de combustible.

El problema mayor con el que nos encontramos a la hora de sustituir el motor térmico por el eléctrico radica en la baja capacidad de almacenamiento de energía de las baterías, derivando en una limitada autonomía. Junto a esto, el precio de la batería representa alrededor del 60% del precio del vehículo, por lo que se necesita una inversión elevada y que, sumado al problema anterior, los convierte en puntos débiles para una mejor integración del vehículo eléctrico. Otro factor limitante nos lo encontramos a la hora de recargar las baterías, teniendo restricciones tanto en tiempo como en corrientes de carga y descarga, lo que obliga al vehículo eléctrico a permanecer inactivo durante largos periodos de tiempo hasta completarse el ciclo de carga.

Las prestaciones de la batería van a depender en gran parte de las características de las celdas por las que están compuestas. Entre los parámetros más importantes a tener en cuenta para su elección, hay que destacar los siguientes:

- **Tensión** - Parámetro muy importante, pues a mayor potencial por cada celda, permitiría un menor número de celdas a conectar en serie para conseguir una tensión nominal mayor en la batería, mientras que en paralelo se consigue suministrar una mayor corriente. El voltaje por celda electroquímica viene determinado por los potenciales de cada electrodo.
- **Capacidad específica** - Determina la cantidad de carga eléctrica capaz de almacenar la batería. Para comparar las diferentes tipologías se suelen referir respecto a dos importantes magnitudes, como la masa (Ah/kg) o el volumen (Ah/l) de cada batería.
- **Energía específica** - Indica el volumen, y por tanto, el peso necesario para almacenar una cantidad de energía. Este parámetro es importante en el diseño del vehículo, pues a mayor peso se requiere de un mayor consumo y, por tanto, una menor autonomía. Se puede distinguir entre la propia energía específica (Wh/kg) si se refiere respecto a la masa, o densidad de energía si es respecto al volumen másico (Wh/l).
- **Potencia específica** - También llamado densidad de potencia, indica la potencia instantánea que puede suministrar la batería (W/kg).
- **Tiempo de carga y descarga** - Tiempo que tarda en cargarse y descargarse completamente la batería.
- **Velocidad de auto-descarga** - Indica la pérdida de capacidad de una batería cuando el vehículo eléctrico no está en uso, es decir, en estado de circuito abierto, aumentando en proporcionalidad según la temperatura. La unidad de medida es la cantidad de carga disipada por unidad de tiempo en tanto por ciento.
- **Rango de temperaturas** - Aquel rango para el que la batería funcione de forma correcta y sin daños.
- **Ciclos de vida** - Representa la durabilidad de una batería determinada por el número de ciclos de carga/descarga que se pueden efectuar hasta alcanzar el 80%





de la capacidad nominal de la batería. El valor medio es de 500 ciclos para ser empleadas en los vehículos eléctricos.

Entre las diferentes baterías recargables, podemos encontrarnos en los vehículos eléctricos las plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-metal hidruro, ión-litio, polímero de litio y sal fundida (Zebra), desarrollando cada tipología con un mayor detenimiento a continuación.

### 3.2.1 Plomo-ácido

Estas baterías son las más antiguas que podemos encontrar en el mercado, diseñadas por Gastón Planté en 1859. Compuestas por un conjunto de placas de plomo e introducidas en ácido sulfúrico, se trata de una tecnología que destaca por su madurez, una rápida disponibilidad y por sus bajos precios, dotándola de liderazgo en el mercado.

Su gran uso se debe a que sus celdas disponen de una tensión por celda relativamente elevada, alrededor de 2 V, y tienen un comportamiento adecuado tanto a altas como bajas temperaturas (-40 a 50°C). Son fáciles de fabricar al no necesitar de un material adicional entre cátodo-ánodo para mejorar la conductividad eléctrica, y a la vez están hechas de materiales reciclables.

Suelen utilizarse comúnmente como batería de arranque en los vehículos tradicionales, ya que son capaces de suministrar corrientes elevadas debido a la rápida cinética de reacción de los electrodos, dotándoles de grandes potencias específicas con valores de 180 W/kg. Sin embargo, es una tecnología con un uso limitado en los vehículos eléctricos como baterías de tracción, debido a sus bajos valores de energía específica entre 30-50 Wh/kg. Esto hace que se necesiten grandes volúmenes para conseguir mayores autonomías, haciendo que gran parte del peso del vehículo sea debido a ellas. A la vez, disponen de bajos ciclos de vida (200-300 ciclos) y unos tiempos de recarga de 8 a 16 horas [20] [25].

### 3.2.2 Níquel-cadmio

Se tratan de baterías con un gran uso extendido a nivel industrial y doméstico, pudiendo encontrarlas en herramientas eléctricas, iluminación de emergencia, juguetes o dispositivos electrónicos.

Su estructura básica se compone de un hidróxido de níquel como cátodo, un ánodo de cadmio y un electrolito alcalino. Su uso cada vez está más encaminado a la extinción, debido a que el cadmio es un metal pesado y de un alto precio, a la vez que muy contaminante. De esta manera, resulta más costosa su fabricación al tener que llevar a cabo su reciclaje.

Se caracterizan por sus celdas selladas con tensiones nominales de 1,2 V, mucho menores en comparación con las plomo-ácido; su masa es la mitad y soportan mayores temperaturas. Destacan de ellas su alta durabilidad con ciclos comprendidos entre los 1000 y 1500, y entre sus valores nominales tienen una energía específica entre 45-80 Wh/kg y una potencia específica de 150 W/kg [21] [25].





Sin embargo, la desventaja principal de estas baterías reside en su efecto memoria que provoca una menor capacidad en las baterías debido a cargas incompletas, acelerándose su proceso de descarga. Este fenómeno ocurre cuando, sin haberse descargado del todo la batería, se carga de forma reiterada. Esto provoca que se formen unos cristales en el interior de la batería, en este caso de cadmio, que no se disuelven con el paso de la corriente al recargar la batería. Con el efecto memoria, las baterías siguen funcionando con normalidad, pero con cada recarga se va limitando su tiempo de uso. La solución a ello bastaría con realizar recargas completas cada cierto tiempo para que se así se descarguen completamente.

### 3.2.3 Níquel-metal hidruro

Se tratan de una extensión de las baterías Ni-Cd, y surgen de la necesidad de reducir su contaminación y abaratar el precio. Constructivamente hablando son iguales a las Ni-Cd, a diferencia del cátodo. Como ánodo utilizan oxihidróxido de níquel (NiOOH) y el cátodo se trata de una aleación de hidruro metálico, eliminando así los problemas medioambientales del cadmio.

La primera batería Ni-MH que se comercializó, ocurrió en 1989 de la mano de Dr. Masahiko Oshitani de la empresa GS Yuasa, representando estas baterías el paso intermedio entre las Ni-Cd y Níquel e Hidrógeno (NiH<sub>2</sub>).

Las baterías Ni-MH también son susceptibles al efecto memoria, pero en menor medida, y poseen una mayor capacidad de carga de hasta el triple que las Ni-Cd. Cada célula puede proporcionar 1,2 V con una capacidad entre 0,8-2,9 Ah, operando en una amplia gama de temperaturas, entre -30 y 75°C. Los ciclos de vida son algo moderados, entre 300-500, y poseen una energía específica de 60-120 Wh/kg, ligeramente mayor a las anteriores. Sin embargo, presentan tasas de auto descarga mayores, un 30% frente al 20% de las Ni-Cd, con una baja tolerancia a las sobrecargas. Su precio respecto a las de plomo-ácido se ve encarecido el doble, pero se prevé que irá disminuyendo según vaya aumentando la producción de vehículos eléctricos a gran escala [22] [25].

Podemos encontrar estas baterías equipadas en vehículos impulsados eléctricamente como el General Motors EV1, el Honda EV Plus, Ford Ranger EV, y en híbridos como el Toyota Prius o Honda Insignia, con recargas rápidas de hasta 1 a 3 horas y sin necesidad de realizarles un mantenimiento a las baterías.

Dada su tasa de auto-descarga tan alta, en 2005 se diseñaron una gama de este tipo de baterías con bajas tasas de auto-descarga, y empresas como Varta o Sanyo fueron las pioneras en introducirlas en el mercado.

### 3.2.4 Ión de litio

Estas baterías surgieron en la década de los años 90 para competir con las más usadas hasta la fecha, las Ni-Cd. Las baterías de ión de litio es la tecnología que más rápidamente ha crecido a día de hoy y que ha tenido una mayor aceptación, pues el litio se trata del metal más ligero capaz de proporcionar mayores densidades de energía con respecto a su peso. Los inicios en el desarrollo de esta tecnología fueron difíciles, pues no se conseguía



dar con la solución para que la batería fuera recargable, debido a la inestabilidad del litio. Por ello, surgió la posibilidad de utilizar iones de litio, mucho más seguro y que utilizan sal de litio como electrolito, facilitando los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y ánodo. En 1991 empresas como Sony, comercializaron la primera batería de iones de litio recargable.

Las prestaciones nominales de las celdas son mayores respecto a las tecnologías ya comentadas. La tensión nominal de cada celda puede llegar a los 3,6 V, haciendo posible la reducción del número de celdas en cada batería y, por tanto, un menor peso. Poseen una alta energía específica entre 110-160 Wh/kg y una potencia específica de 250-340 W/kg. Sus ciclos de vida pueden llegar a los 1000 y tienen un bajo impacto medioambiental por parte del litio al ser menos contaminante. La fabricación de estas baterías es costosa, mayor a las de Ni-Cd e igual a las Ni-MH. Trabajan en un amplio rango de temperaturas (-20 a 60°C), pero los fabricantes recomiendan temperaturas de funcionamiento alrededor de 15°C para reducir el efecto de envejecimiento que sufren durante su uso. Este envejecimiento es debido al calor generado en las celdas y se ve más acusado a temperaturas elevadas, afectando a la capacidad de recarga. Ante esto, se recomienda realizar un mantenimiento básico que comprende no descargarlas más de un 20%, y que, durante estacionamientos prolongados, la batería se conserve con un estado de carga del 40% [23] [25].

Esta tecnología es la más usada en el sector de la telefonía móvil, con baterías de una sola célula, dado su alto potencial y su ligero peso, mientras que si utilizásemos las de Ni-Cd se necesitaría una agrupación en serie. Además, estas baterías presentan la ventaja de carecer de efecto memoria, una baja tasa de auto-descarga (menos de la mitad de las Ni-Cd y Ni-MH), una alta resistencia a la descarga y, además, se pueden realizar ciclos de carga sin la necesidad de estar descargadas completamente, no afectando a la vida útil.

Sin embargo, a pesar de todo ello, presentan desventajas tales como su degradación o su sensibilidad a la temperatura, pudiendo sobrecalentarse hasta llegar al punto de explotar, por lo que para un funcionamiento seguro, cada célula lleva incorporado un circuito de protección. Con este circuito se limita la tensión pico de cada célula durante la carga, evitando que no se reduzca demasiado durante la descarga, además de tener un control sobre las temperaturas que se alcanzan para no superar los extremos, lo que provocaría una pérdida de capacidad. Con las mejoras comprendidas en esta tecnología durante estos años, han hecho que la probabilidad de explosión se considere mínima.

Empresas como General Motors, Hyundai o Toyota integraron rápidamente estas baterías en sus prototipos. En la actualidad siguen innovando en esta tecnología, con nuevas mejoras en el mercado que hacen posible una mayor integración de este tipo de baterías para conseguir una reducción en los precios de esta tecnología.

### 3.2.5 Polímero de litio

En la década de los años 70, se diseñó el primer modelo de esta batería en el que se utilizaba como electrolito un polímero seco, con un comportamiento similar al de una fina lámina plástica que no conduce la electricidad, pero sí permite el intercambio de iones. La



diferencia respecto al resto de tipologías reside en el electrolito que usa, el cual sustituye al antiguo separador de celdas que se encuentra bañado en los electrolitos de ácidos tradicionales.

El diseño de estas baterías ofrece simplificaciones a la hora de fabricarlas, pues las celdas poseen espesores de tan solo 1 mm que permite multitud de diseños, en cuanto a forma y tamaños más ligeros y flexibles. Además, cuentan con mayor seguridad que las de ion de litio al no necesitar de un recubrimiento metálico.

Por el contrario, la conductividad interna que presenta el polímero es deficiente, ya que la resistencia interna es muy alta, no haciendo posible entregar toda la energía necesaria a suministrar. La forma de evitarlo es según aumenta la temperatura de funcionamiento, hasta los 60°C, lo cual limita su uso para aplicaciones portátiles, pero que con un adecuado aislamiento pueden aplicarse en los vehículos eléctricos. Para dar solución a ello, se les puede añadir un electrolito gelificado en las membranas de separación.

Dadas las mejores prestaciones que ofrecen respecto a otros sistemas de almacenamiento y a sus bajos costes de fabricación, no se ha alcanzado una alta penetración en el mercado tal y como se tenía previsto. Al tener unas prestaciones similares a las baterías ión de litio, con incluso capacidades inferiores a las de ésta, enfoca a estas baterías a un mercado con aplicaciones en las que se demanden diseños con geometrías delgadas [23].

### 3.2.6 Sal fundida-Zebra

Su origen data de 1985 cuando fueron creadas por el grupo Zebra (*Zeolite Battery Research Africa*), de ahí que se conozcan comúnmente con tal denominación. Estas baterías utilizan sal fundida (NaNiCl) como electrolito y son altamente térmicas. Como electrodo negativo se usa sodio triturado, y como positivo, níquel cuando se encuentra descargada o cloruro de níquel si está cargada. Al ser insolubles el níquel y cloruro de níquel en soluciones básicas y neutras, existe muy poca resistencia en la transferencia de cargas. Debido a que trabajan a temperaturas elevadas, tanto el electrolito como los electrodos se encuentran en estado líquido, necesitando un separador de tipo cerámico.

Las celdas por las que está compuesta ofrecen tensiones de 2,6 V y densidades energéticas mucho mayores a las de plomo-ácido, con valores de hasta 5 veces mayor, pero trabajan a temperaturas con rangos de 270-350°C, haciendo necesario un buen aislamiento. Presentan una energía y potencia específica de 90 Wh/kg y 155 W/kg. En cuanto a su durabilidad, pueden llegar a los 1500 ciclos a los 5 años o incluso a los 3000 al cabo de 8 años [24]. Presentan la ventaja de que en caso de producirse un cortocircuito en una celda, no provoca el fallo en el resto de la batería.

El hecho de que estas baterías estén compuestas con materiales de una alta disponibilidad a nivel mundial, las hace potencialmente más ventajosas con respecto a las de iones de litio. Su fabricación se lleva a cabo únicamente en Stabio, situado en el sur del



cantón de Tesino (Suiza), por parte de la empresa FZ Sonick donde llevan a cabo su producción en serie.

Entre sus aplicaciones, nos las podemos encontrar en vehículos de tracción eléctrica, como autobuses, camiones o vehículos propios como el Think City, equipado con baterías de 17,5 kW.

Sin embargo, dadas sus altas temperaturas de operación se producen pérdidas térmicas, pues cuando se encuentra inactiva la batería, el electrolito se solidifica y en caso de encendido requieren un tiempo de recalentamiento. Este tiempo varía en función del estado de carga al desconectarla, como de la potencia necesaria para dicho recalentamiento, pudiendo llegar a un periodo de 24 horas para alcanzar la temperatura óptima. Una vez completada la carga suele tardar entre 3 y 4 días en enfriarse y solidificar.

Una vez revisadas las baterías recargables que disponemos en el mercado, se muestra a continuación un resumen de las características más importantes de cada una de ellas:

Tipo de batería recargable	Energía específica (Wh/kg)	Tensión por celda (V)	Ciclos de vida	Autodescarga (%/mes)	Tiempo de recarga (horas)
<b>Pb-ácido</b>	30 - 50	2	200 - 300	5	8 - 16
<b>Ni-Cd</b>	45 - 80	1,2	1500	20	1
<b>Ni-MH</b>	60 - 120	1,2	300 - 500	30	2 - 4
<b>Li-ion</b>	110 - 160	3,6	500 - 1000	10	2 - 4
<b>Li-Po</b>	100 - 130	3,6	300 - 500	10	2 - 4
<b>Zebra</b>	90	2.6	1500 - 3000	-	-

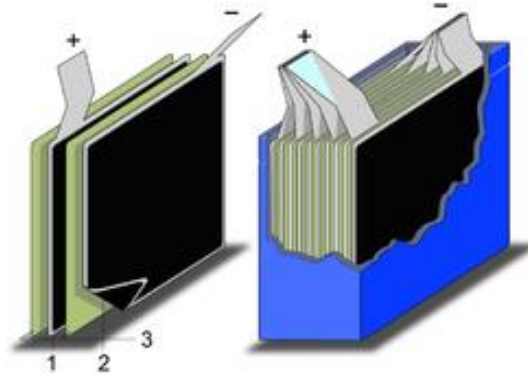
Tabla 2. Comparativa de parámetros para las diferentes baterías. [25]

A día de hoy, la mayoría de los vehículos híbridos están equipados de baterías de Ni-MH, por poseer una mayor capacidad de almacenar energía frente a las de Pb-ácido, como tener un menor coste respecto a las de iones de litio. Sin embargo, para los vehículos eléctricos de batería, la batería de iones de litio se presenta como la mejor solución por su alto poder energético en relación a su masa para conseguir mayores autonomías y, aunque su precio de fabricación sea costoso, se prevé que vaya disminuyendo debido a una mayor integración de estas baterías en múltiples aplicaciones.

### 3.3 Supercondensadores

Existen otras formas de almacenamiento de energía como los supercondensadores, representando la transición entre los condensadores convencionales y las baterías recargables. En función del almacenamiento de la energía eléctrica, nos podemos encontrar los de doble capa eléctrica o EDCL (*Electric Double-Layer Capacitor*), o los pseudocondensadores.

Los EDCL son los más desarrollados y comercializados, y su almacenamiento se basa en un principio puramente electrostático sin la intervención de una reacción química, donde la energía eléctrica es almacenada en la doble capa electroquímica formada en la interfase electrodo-electrolito, con una diferencia de potencial aplicada entre los electrodos.



1. Electrodo positivo; 2. Electrodo negativo; 3. Separador

**Figura 18. Esquema de un supercondensador con electrodos apilados. [26]**

La composición del electrolito puede ser acuosa, donde el potencial aplicado no puede ser mayor a 1 V debido a que provocaría su descomposición, u orgánico, que permite tensiones de trabajo mayores del orden de 2,5 V. Mientras que los electrodos pueden estar compuestos por materiales como óxidos de metales de transición, polímeros conductores y carbono. Los dos primeros proporcionan altas capacidades, pero tienen la desventaja de ser relativamente caros o de sufrir hinchamientos. Por ello, los basados en carbono representan la mejor solución por sus bajos costes y gran disponibilidad.

Propiedades como fiabilidad, potencia y duración, hace que esta nueva tecnología se presente como una alternativa a las baterías, con ciclos de vida de más de 1.000.000 sin pérdidas de rendimiento y una elevada eficiencia en cargas y descargas [27]. Durante su ciclo de vida, necesitan un bajo mantenimiento y son capaces de trabajar a temperaturas extremas, a la vez que su contaminación es menor al estar constituidos por materiales mucho menos tóxicos.

A diferencia de los condensadores convencionales, son capaces de almacenar mayores cantidades de energía pero proporcionando menores densidades de potencia, por lo que los hace idóneos en aplicaciones donde se requiera pequeñas cantidades de energía. Sin embargo, en comparación con las baterías, presentan desventajas como una menor capacidad de almacenamiento de energía, con una energía específica de 0,10-10 Wh/kg, junto a un elevado precio de adquisición.

Los supercondensadores destacan por la capacidad de cargarse y descargarse durante cortos periodos de tiempo, pudiendo llegar al orden de segundos. Esto las hace apropiadas para responder ante picos de potencia, como interrumpir el suministro de corriente durante breves periodos de tiempo. Por ello, su uso como complemento a las baterías en los vehículos eléctricos durante el arranque sería idóneo, pues se estaría combinando la rápida actuación de los supercondensadores para suministrar energía, con la mayor capacidad de almacenamiento de las baterías, prolongándose así su vida útil.

A día de hoy, los supercondensadores de grafeno se presentan como la mejor solución utilizada en los vehículos eléctricos para proporcionar mayores autonomías a través de recargas rápidas que pueden llegar a los 2-3 minutos [28].

### 3.4 Pilas de combustible

También conocidas como célula o celda de combustible, son dispositivos electroquímicos de conversión de energía química en eléctrica a partir de un combustible, sin necesidad de una combustión previa. La diferencia primordial con las baterías radica en que los reactivos son suministrados de forma continua desde el exterior, generando energía eléctrica de forma continua, siempre y cuando se mantenga el suministro de combustible. Al contrario de lo que ocurre en las baterías, en las que al contener el combustible en su interior, el suministro de electricidad finaliza al agotarse el mismo, llevando a cabo entonces el desecho o recarga de la misma.

El proceso de generación de electricidad, a partir de la energía química obtenida del combustible, conlleva una serie de pasos intermedios que se resumen a continuación:

Energía Química → Energía Térmica → Energía Mecánica → Energía Eléctrica

- Paso 1: conversión de la energía química del combustible mediante su combustión para obtener calor.
- Paso 2: este calor se emplea para generar vapor y así mover una turbina, convirtiendo la energía térmica en mecánica.
- Paso 3: por último se hace funcionar un generador para producir electricidad.

Sin embargo, con el uso de la pila de combustible se sintetiza todo este proceso en una única transformación directa de la energía química en eléctrica, a través de la entalpía libre del combustible mediante un proceso isotérmico. Por lo general, estas pilas están compuestas a su vez de una agrupación en serie de pilas individuales (*stack*). Cada una consta de un par de electrodos, cátodo y ánodo, y de un electrolito que los mantiene en contacto.

El principio de funcionamiento consiste en la reducción de un oxidante en el cátodo, en este caso el oxígeno del aire el cual no hay que almacenar, junto al suministro de un combustible que normalmente suele ser hidrógeno. El ánodo se alimenta con hidrógeno, mientras que el cátodo con oxígeno. En el ánodo, un catalizador de platino provoca la disociación del hidrógeno en protones y electrones, de los cuales el electrolito (comúnmente una membrana polimérica) permite el paso de los protones hacia el cátodo, mientras que los electrones deben atravesar un circuito externo generando una corriente eléctrica. Por último, en el cátodo ocurre una reacción entre los protones y electrones del hidrógeno con el oxígeno formándose agua, tal y como se puede observar en la Figura 19.



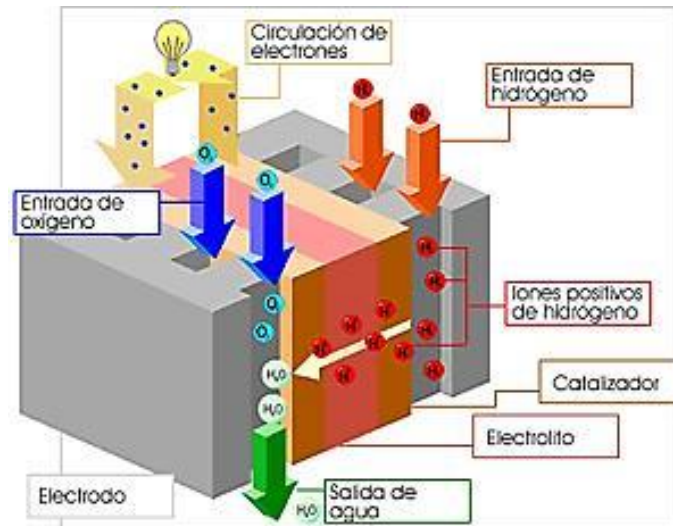


Figura 19. Principio de funcionamiento de la pila de hidrógeno. [29]

Entre las ventajas que conlleva la implantación de esta tecnología en el vehículo eléctrico, cabe destacar [30]:

- Mayor eficiencia del combustible, pues al no tratarse de una máquina térmica, el funcionamiento de la pila no viene condicionado por el ciclo de Carnot.
- Emisión cero en contaminantes al obtenerse calor, agua y electricidad en la combustión del hidrógeno con el oxígeno.
- Funcionamiento silencioso, junto a un mantenimiento simple al tener una composición estructural que carece de partes móviles.
- Amplio rango de temperaturas desde los 60 a 1000°C.
- Altas densidades energéticas.

Sin embargo, no todo son ventajas, pues la principal desventaja nos las encontramos en su alto precio de obtención y la inmadurez de esta tecnología. El almacenamiento del hidrógeno es una tarea dificultosa, al igual que su transporte, y los metales empleados como catalíticos son caros y escasos. Otro problema reside en el proceso de obtención del hidrógeno puro, pues no nos lo podemos encontrar en la naturaleza, por lo que se necesita producirlo a partir de energías primarias como los combustibles fósiles, aunque lo ideal sería a partir de otra fuentes como agua o biomasa para así poder tratarse como recurso renovable.

Estas pilas se pueden clasificar en función de diversos factores, entre otros según el tipo de combustible, temperatura de operación o tipo de electrolito. Según este último, la clasificación se muestra en la siguiente Tabla 3:



	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
<b>Electrolito</b>	Membrana de Polímero de Sodio	Solución Alcalina	Ácido Fosfórico	Carbonatos Fundidos	Óxido Sólido	Membrana de Polímero Sólido
<b>Temperatura Trabajo (°C)</b>	60 - 80	100 - 120	200 - 250	600 - 700	800 - 1000	50 - 120
<b>Combustible</b>	Hidrógeno	Hidrógeno	Hidrógeno Gas Natural	Gas Natural	Gas Natural	Metanol
<b>Ventajas</b>	Baja T <sup>a</sup> Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida	Acepta H <sub>2</sub> con 1% de CO	Reformado interno Cogeneración	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformador de combustible
<b>Aplicaciones</b>	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales	Generación eléctrica distribuida Automoción	Generación eléctrica	Generación eléctrica	Portátiles

**Tabla 3. Comparativa entre las distintas tipologías de la pila de combustible. [31]**

De todas ellas, las tipo PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cells*) resultan más atractivas como alternativa a las baterías en los vehículos eléctricos por su flexibilidad, eficiencia y bajas temperaturas de operación, permitiendo un arranque limpio junto a una respuesta rápida ante cambios en la consumo del motor. En el sector automovilístico, importantes marcas como Honda, Nissan, Renault, Peugeot-Citroen, Toyota y Volswege entre otras, han desarrollado sus primeros prototipos equipados de la mano de esta tecnología, que irán en aumento tras el objetivo por parte de la UE para el 2020 de que el 2% de los automóviles se muevan bajo la pila de combustible, mediante el desarrollo e integración de una red de hidrogenas para dotar de suministro a estos sistemas [32].





## Capítulo 4

# El sistema eléctrico español

### 4.1 Introducción a los sistemas eléctricos

El sistema eléctrico está compuesto por el conjunto de medios y elementos que hacen posible su correcto funcionamiento, manteniendo un constante equilibrio entre la generación y demanda de energía por medio de su transporte, para lo cual se precisa de una operación coordinada. Esta demanda debe ser cubierta por las tecnologías que actualmente disponemos en España y asegurar que en todo momento se disponga de una fuente de suministro. Todo sistema eléctrico se sustenta bajo tres actividades fundamentales:

- Producción de la energía eléctrica en centrales de generación.
- Transporte de la electricidad desde las plantas de generación hasta la red de distribución, a través de líneas de alta tensión.
- Distribución de la electricidad a los consumidores desde la red de transporte, por medio de líneas de alta, media y baja tensión.

Una vez efectuadas cada una de las anteriores acciones, la electricidad sería consumida por los consumidores finales que la demandan, bien a través de la conexión directa a la red de transporte, como ocurre a nivel industrial, o a la red de distribución, lo cual es más habitual.

En la Figura 20, se muestra el esquema básico de todo sistema eléctrico en el que se pueden apreciar otros elementos anteriormente no comentados y que son de especial importancia, como son las subestaciones de transformación o distribución, cuya función es la de adecuar el nivel de tensión para llevar a cabo el correcto transporte y distribución de la electricidad hasta el punto de consumo. Cabe destacar la presencia de la figura del Centro de Control Eléctrico, el cual se encarga de la operación y supervisión coordinada en tiempo real de las instalaciones de generación y transporte ante posibles incidencias, como asegurar la correcta comunicación entre ellos.

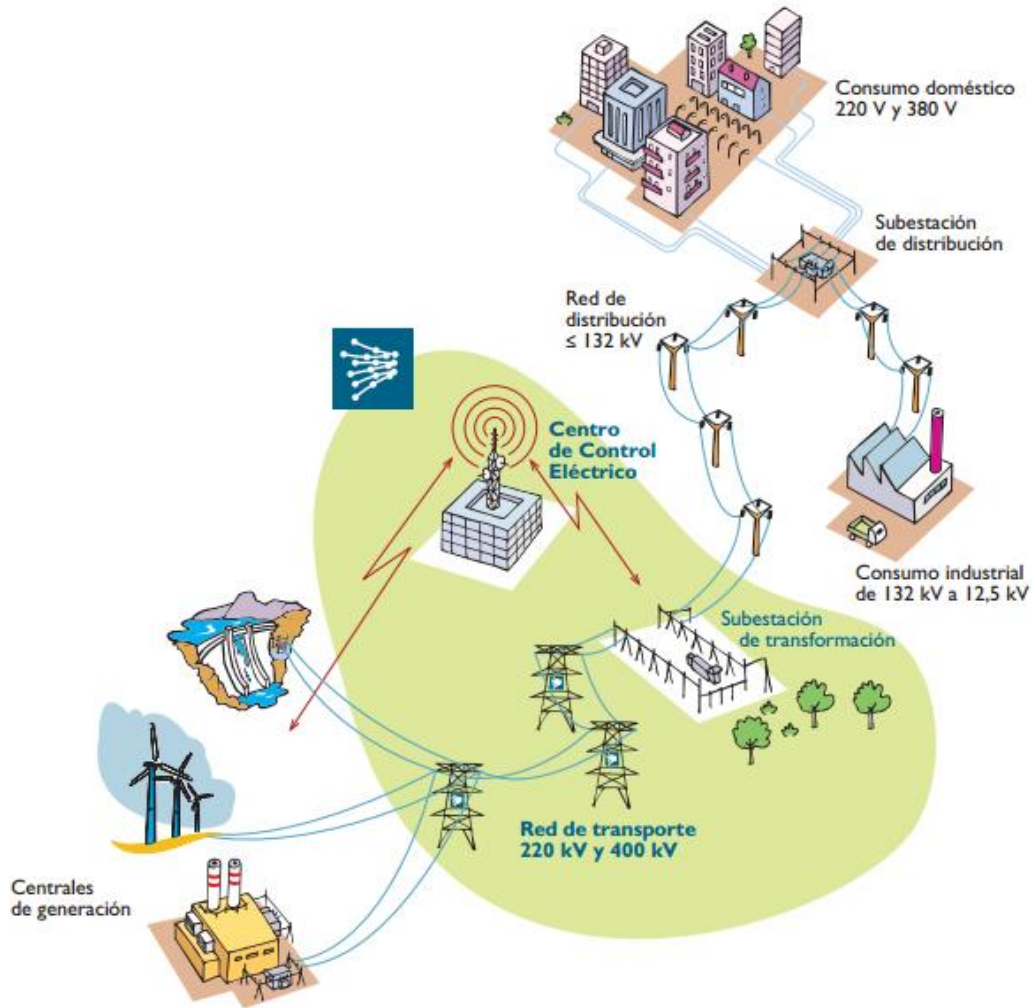


Figura 20. Esquema básico del sistema eléctrico. [33]

## 4.2 Generación y cobertura de la demanda

El sistema eléctrico español se caracteriza por ser un sistema energéticamente fuerte, seguro y diversificado, pero a la vez muy caro. Desde la década de los 90 se han producido crecimientos anuales en torno al 6%, llegando a ocasionar un pico de demanda durante los años 2000 y 2001 que originó problemas en el sistema para tal abastecimiento, resultado por el aumento en la calidad de vida y el auge urbanístico, como por el crecimiento significativo en la economía española [34]. Sin embargo, este aumento del consumo eléctrico se vio afectado en 2008 por la crisis económica y financiera que corría por aquel entonces, y que hizo que desde 2010 la demanda se encuentre en un descenso continuo, tal y como se muestra en la Figura 21:

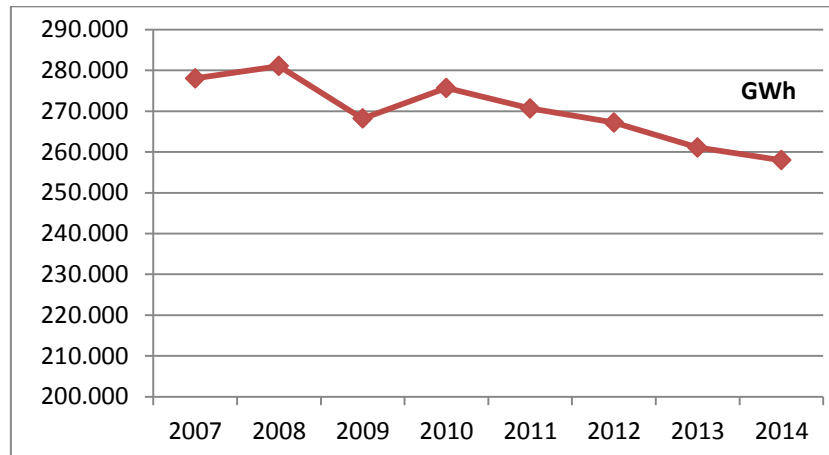


Figura 21. Evolución de la demanda energética 2007-2014. [35]

Al hablar de generación, la regulación del sistema eléctrico español establece una distinción entre producción en régimen ordinario y régimen especial. El régimen ordinario agrupa aquellas instalaciones de tipo hidráulica, nuclear, carbón, fuel/gas y ciclo combinado, cuya producción de energía eléctrica como la contaminación originada durante su proceso (salvo el caso de la tecnología hidráulica que no origina emisiones CO<sub>2</sub>), son superiores que las centrales de régimen especial. El resto de tecnologías forman parte del régimen especial, asignado a la producción de energía eléctrica procedente de instalaciones con potencia instalada no superior a 50 MW, que utilizan fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración [36]. Este tipo de generación se beneficia de una serie de ventajas económicas y jurídicas frente a la producción en régimen ordinario, como de un ahorro energético al tener un menor impacto sobre el entorno por la disminución de emisiones contaminantes, logrando una mayor eficiencia energética.

En el sistema eléctrico español la tecnología hidráulica ha sido siempre una contribución importante como fuente de suministro eléctrico. Durante el periodo de crecimiento de la demanda se fueron denotando otras fuentes de energía como instrumentos de cobertura, como la energía térmica, introduciéndose al comienzo mediante grupos de fuel, más tarde con un importante parque generador de carbón y, por último en la década de los 80, con la integración de las centrales nucleares.

Tras la incorporación de estas nuevas tecnologías de generación se produjo un estancamiento, hasta que a finales de la década de los 90, el sistema de generación de electricidad comenzó a retomar su crecimiento debido al importante papel que tomaron las tecnologías de régimen especial, fundamentalmente la energía eólica como participante del mix de generación en 1996, con un crecimiento en la potencia instalada que llega a los 23.000 MW en 2014.

Respecto al régimen ordinario, cabe destacar la instalación de los ciclos combinados que, desde que en 2002 se instalara el primer ciclo combinado de gas natural hasta la actualidad, se han instalado más de 27.000 MW de nueva generación procedente de esta tecnología. Años más tarde, hacia el 2007, es cuando comienza a abrirse camino la

producción de energía solar, a través de la instalación de las placas fotovoltaicas y las centrales termosolares.

A pesar de la caída en la demanda, la potencia de generación instalada en el sistema eléctrico español ha seguido en continuo crecimiento hasta llegar a disponer de 108.144 MW, con un peso importante del ciclo combinado y de la eólica como fuentes potenciales de generación eléctrica, representando el 25% y 21% respectivamente.

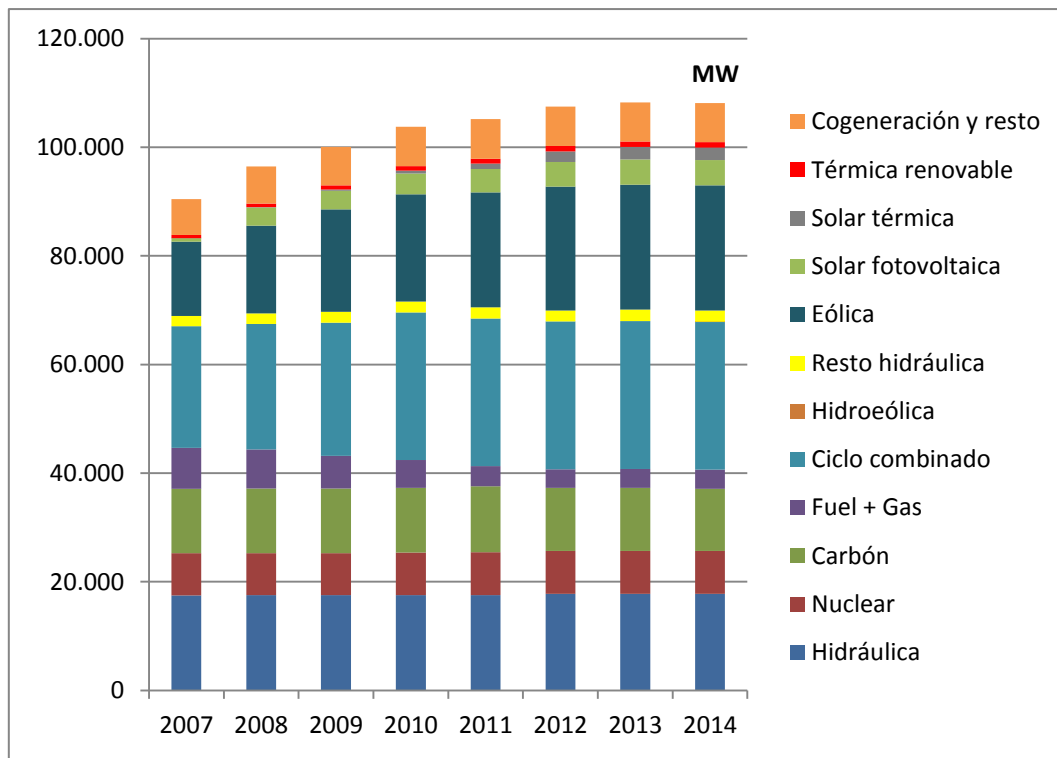


Figura 22. Evolución de la potencia instalada 2007-2014. [35]

Independientemente de esta amplia capacidad, el parque nacional de generación eléctrica se contrajo por primer vez en 2014 debido a la reducción de la potencia instalada en la península en 122 MW, lo que representa un 0,1% menos que en diciembre de 2013. Motivo de ello, es la coincidencia entre la variación registrada del carbón, debido al cierre de la central de Escucha situada en la provincia de Teruel, y la parada de nuevas instalaciones de origen renovable, debido al Real Decreto Ley 1/2012 que suspende temporalmente las primas para las nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica de régimen especial [37].

En la siguiente Figura 23, se muestra el reparto porcentual por tecnologías de la potencia instalada a 31 de diciembre de 2014, y en términos numéricos en la Tabla 4:

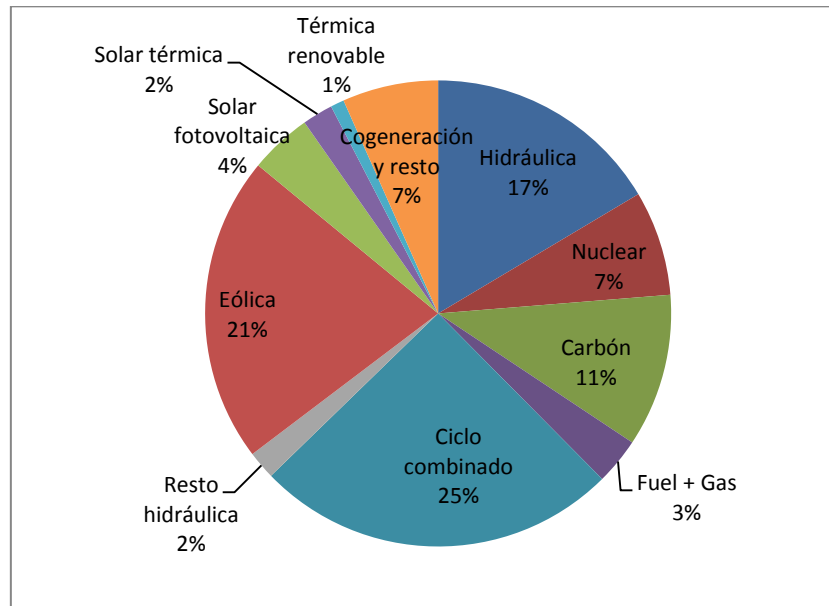


Figura 23. Reparto porcentual de la capacidad instalada 2014. [35]

Potencia instalada	MW
Hidráulica	17.787
Nuclear	7.866
Carbón	11.482
Fuel/gas	3.498
Ciclo combinado	27.206
<b>Total régimen ordinario</b>	<b>67.839</b>
Resto hidráulica	2.106
Hidroeólica	12
Eólica	23.002
Solar fotovoltaica	4.672
Solar térmica	2.300
Térmica renovable	1.018
Cogeneración y resto	7.196
<b>Total régimen especial</b>	<b>40.305</b>
<b>Total</b>	<b>108.144</b>

Tabla 4. Reparto numérico de la capacidad instalada 2014. [35]

El pasado año se cerró con unos valores máximos de potencia instantánea (potencia absorbida por la demanda en cualquier instante de tiempo) de 38.948 MW el 4 de febrero, siendo un 3,3% inferior respecto al máximo del año anterior, y un 14,3% inferior al pico de 45.450 MW ocurrido el 17 de diciembre de 2007. Por lo que numéricamente hablando, aunque existen ciertas tecnologías renovables que suministran la energía eléctrica de forma discontinua, se puede concluir que la capacidad instalada llega a duplicar la necesidad de cobertura del país.

En cuanto a la producción de energía eléctrica, se situó en 257.983 GWh, valor sensiblemente inferior en un 1,2% respecto a los 261.081 GWh alcanzados en 2013, y representado una progresiva caída del 7,2% desde 2007. Esta demanda dada en barras de central, es la energía suministrada a la red procedente de las centrales de régimen ordinario, régimen especial y de las importaciones, a la cual hay que descontar tanto los

consumos de generación (correspondientes a la producción hidráulica, nuclear, carbón, fuel/gas y ciclo combinado), como los consumos en bombeo, exportaciones y las pérdidas ocasionadas en la red de transporte y distribución. Por último, atendiendo a los máximos de demanda, se alcanzaron el 4 de febrero con 38.666 MWh como máximo horario, y el 11 de febrero con 798 GWh como máximo diario.

La caída en la generación de los ciclos combinados desde 2008 es abismal, pasando de los 95.529 GWh generados ese año hasta los 25.729 GWh de 2014, lo que representa una bajada del 73%. En la Figura 24, se puede observar cómo ha evolucionado la generación en España durante el periodo 2007-2014, apreciándose el descenso de los ciclos combinados. Tras esto, las grandes compañías eléctricas (Iberdrola, Endesa, Gas Natural Fenosa, EON y EDP), ante la pérdida de dinero acarreada por el escaso funcionamiento de sus centrales de ciclo combinado, piden al Ministerio de Industria la aprobación de un Real Decreto de hibernación que conlleva un menor gasto, a diferencia de optar por el cierre definitivo. Sin embargo, dicha aprobación se está retrasando debido a que por parte de Industria se agarran a la posibilidad de un crecimiento en la demanda y, por tanto, sea necesario cubrir parte de la demanda a través de los ciclos combinados. A pesar de ello, fuentes como la CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia), confirman la existencia de tal sobrecapacidad instalada de esta tecnología en España, que abarcaría hasta 2017 sin necesidad de nueva instalación [38].

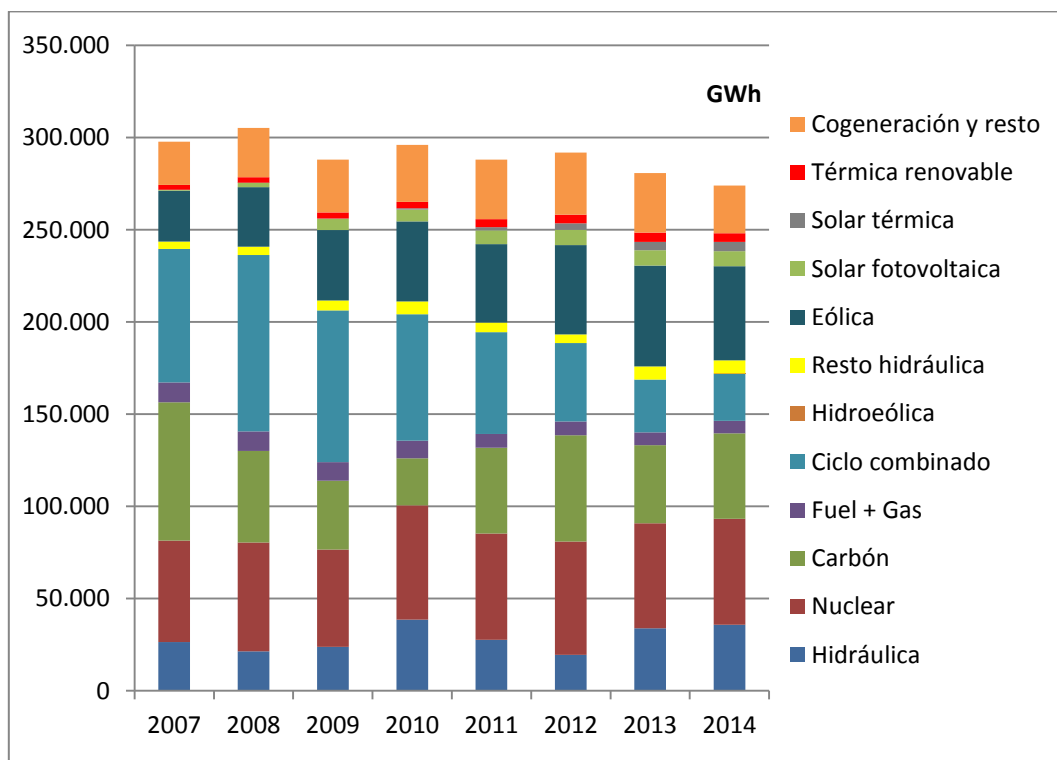
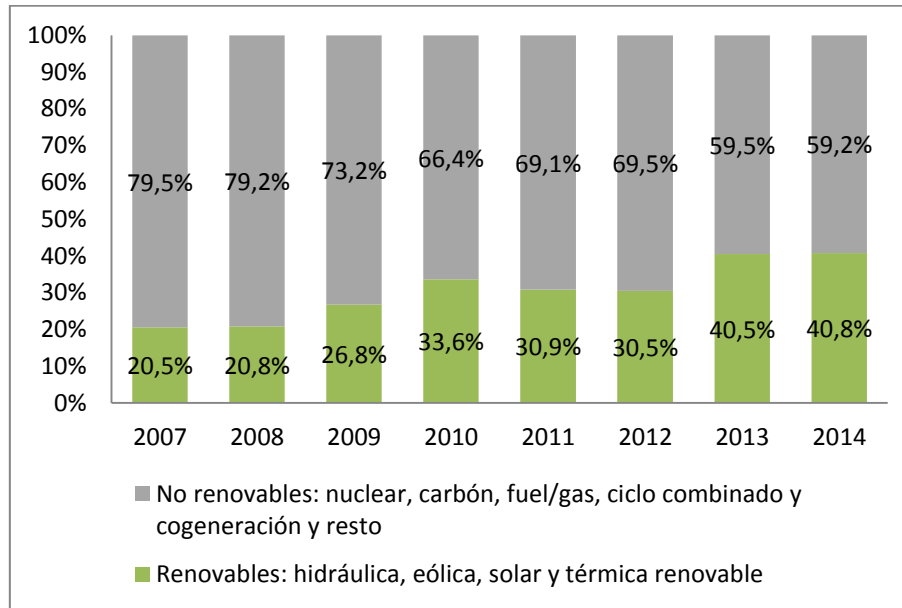


Figura 24. Evolución de la producción de energía eléctrica 2007-2014. [35]

Respecto a la evolución en la generación por tecnologías, en los últimos años cabe destacar el acelerado crecimiento de la producción de energía renovable, tal y como se puede observar en la Figura 25, llegando a duplicar la producción desde 2007 en un

40,8%. Por el contrario, cabe decir que la generación por parte de las tecnologías no renovables está sufriendo un progresivo descenso, situándose en un 59,2% de la producción total.



**Figura 25. Evolución de la generación renovable y no renovable 2007-2014. [35]**

El principal motivo de dicho descenso es debido a la adaptación de las instalaciones de ciclo combinado a la fuerte caída de la demanda existente, así como a la entrada de las renovables. El gran potencial de producción de las fuentes renovables, como la energía eólica y fotovoltaica, ha ocasionado una disminución del conocido hueco térmico (generación por parte de las centrales térmicas), y ha propiciado a las centrales de gas en fuentes de respaldo para garantizar el suministro cuando el recurso renovable es escaso.

La participación de las renovables en la cobertura de la demanda destaca por la elevada capacidad de generación de la eólica en España, situándose en un 19% frente al resto de tecnologías renovables. Sumado a ello, las horas donde se dan las mayores intensidades de viento coinciden frecuentemente con las horas de menor consumo de energía en las que el precio es inferior, por lo que los parques eólicos se sitúan como un pilar en el que sustentarse para el desarrollo y la implantación de los vehículos eléctricos en España. Con el cierre de 2014, la capacidad instalada en España desde 1996 ha pasado de los 164 MW a los 23.000 MW, por lo que con esta tasa de crecimiento se estaría contribuyendo con uno de los objetivos marcados por la Unión Europea: cubrir una cobertura del 20% de la demanda de energía primaria mediante fuentes renovables en el 2020.

En la siguiente Figura 26, se puede observar la participación en la generación eléctrica por tecnologías en 2014:

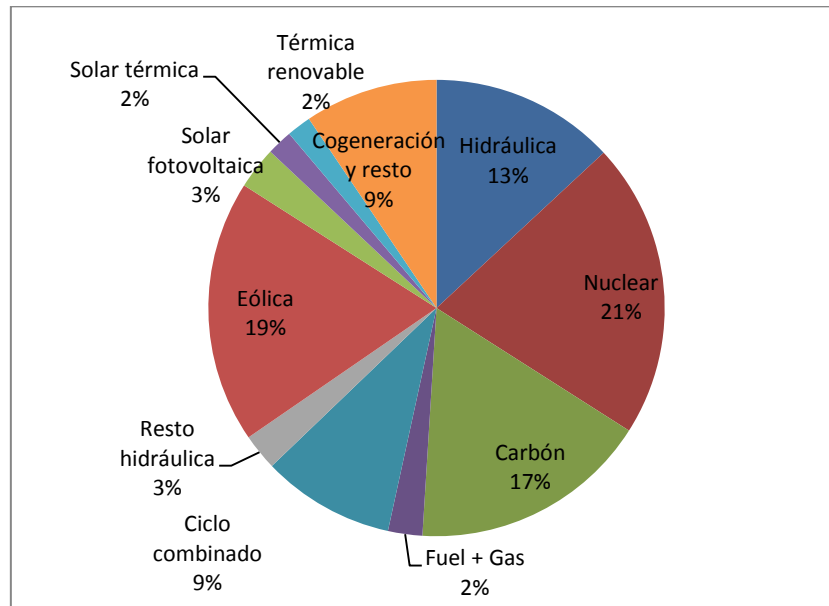


Figura 26. Reparto porcentual del mix de generación eléctrica 2014. [35]

En términos numéricos, se muestra en la Tabla 5 los valores de producción para el sistema eléctrico en 2014:

Generación eléctrica	GWh
Hidráulica	35.850
Nuclear	57.376
Carbón	46.480
Fuel/gas	6.663
Ciclo combinado	25.792
<b>Total régimen ordinario</b>	<b>172.161</b>
Resto hidráulica	7.053
Hidroeólica	1
Eólica	51.019
Solar fotovoltaica	8.183
Solar térmica	4.959
Térmica renovable	4.727
Cogeneración y resto	25.886
<b>Total régimen especial</b>	<b>101.843</b>
<b>Generación neta</b>	<b>266.719</b>

Tabla 5. Reparto numérico de la producción de energía 2014. [35]

Tras observar las Tablas 4 y 5, hay que destacar que una mayor capacidad instalada de una tecnología no determina el correspondiente aumento en la producción de energía eléctrica, como es el caso de la energía nuclear. Su potencia instalada en España no llega a los 8.000 MW, siendo inferior respecto a otras tecnologías como la hidráulica, el ciclo combinado o el carbón. Sin embargo, es la que generó mayor cantidad de energía eléctrica en España en el 2014 con 57.376 GWh, al tratarse de centrales principales o de base (centrales de gran potencia destinadas a suministrar gran parte de la energía eléctrica, siendo principalmente de origen nuclear, térmico e hidráulico), que funcionan constantemente a pleno rendimiento durante todo el año, salvo paradas por mantenimiento o por avería.





De acuerdo a las políticas medioambientales recogidas en el Protocolo de Kioto, junto con los objetivos marcados por la Unión Europea para conseguir una reducción del 20% en las emisiones de gases efecto invernadero, como promover un aumento de uso de las renovables en un 20%, han propiciado una reducción en la producción de energía procedente de los combustibles fósiles. Para ello, en España se ha impulsado el desarrollo de instalaciones de tecnología renovable sobre el resto de fuentes de energía.

Cabe decir que las centrales de generación eléctrica de origen fósil o nuclear poseen la capacidad de prever con antelación la cantidad de energía que van a generar, y por el contrario, las de origen renovable carecen de ello al depender de las condiciones climatológicas. Esto representa una contrariedad para el sistema eléctrico, al no predecir con certeza los resultados, pues un año de sequía influiría en la producción de energía hidráulica, como la escasez de viento a la generación de energía eólica.

Sin embargo, a pesar del suministro discontinuo de las renovables, destacan por ser una energía procedente de fuentes potencialmente ilimitadas y de fácil acceso, y por ser una energía limpia con cero emisiones en gases efecto invernadero, junto a la no producción de residuos.

A pesar de la amplia disponibilidad de los recursos naturales, la producción de energía eléctrica a través de las renovables no llega a cubrir todo el suministro de energía, por lo que con las particularidades propias de cada tecnología, todas las tecnologías son en parte necesarias para la obtención de un mix energético equilibrado. Además, en términos de seguridad de abastecimiento, es conveniente que no exista una penetración excesiva por cualquier tecnología. De esta manera, sería conveniente una producción compatible entre las renovables y otras tecnologías como puede ser la nuclear, para así conseguir una reducción paulatina en la dependencia de los combustibles fósiles, fuente principal de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y que en un futuro su aportación sea nula en la producción de energía eléctrica. En España, el ritmo de integración de origen renovable en los sistemas eléctricos cada vez es mayor, y para poder conseguirlo bajo unas condiciones de seguridad óptimas, Red Eléctrica de España ha creado el Cecre (Centro de Control de Energías Renovables), un centro para controlar la generación de energías renovables.

### **4.3 Redes de transporte y distribución**

El objetivo de toda red de transporte es hacer llegar la energía eléctrica desde los puntos de generación hasta las redes de distribución, a través de las cuales se suministra la energía a los consumidores finales. Toda esta actividad, a nivel nacional, es llevada a cabo por Red Eléctrica de España (REE), encargándose de la gestión y conexión de todas las infraestructuras que forman parte de la red de transporte.

Para llevar a cabo el transporte de la electricidad en España, la red está compuesta por líneas, transformadores, subestaciones y otros componentes de tensión igual o superior a 220 kV, por aquellas instalaciones donde el transporte se da a tensiones inferiores de los 220 kV (como es el caso de los sistemas Balear y Canario), y por las instalaciones de interconexión internacional con los sistemas insulares y extrapensinsulares. Para garantizar una mayor seguridad y calidad de servicio en el sistema eléctrico, es necesario



un mayor grado de interconexión con el resto de sistemas. De esta manera, ante problemas de suministro, se dispondrá de una mayor capacidad de intercambio de energía para afrontarlo con facilidad.

Según la distancia y cantidad de energía a transportar, se realiza a un nivel de tensión u otro, para conseguir que el transporte se dé bajo las mínimas pérdidas posibles y maximizando la potencia transportada. La clasificación de los distintos tipos de líneas es diversa, desde el punto de vista reglamentario como legislativo, pero la más destacada es la siguiente:

- Líneas de alta tensión (AT): comprendidas entre los 400 y 45 kV, entra las que se diferencian como de muy alta tensión (MAT), que agrupa las líneas de 400 y 220 kV, y las de alta tensión, con líneas de 132, 66 y 45 kV.
- Líneas de media tensión (MT): compuestas por líneas de 25, 20 y 15 kV que son empleadas en las redes de distribución.
- Líneas de baja tensión (BT): son las líneas de tensión 400/230 V que se utilizan para suministrar la energía eléctrica al consumidor final.

REE desempeña un papel importante en el funcionamiento del sistema eléctrico como gestor de la red de transporte, según lo establecido en la Ley 17/2007, definiéndolo como transportista único con carácter exclusivo. Años más tarde, en 2010, Red Eléctrica de España en cumplimiento de esta ley, adquirió los activos no peninsulares del sistema Balear y Canario, junto a los que faltaban por transferir de la península por parte de las empresas eléctricas. Este hecho hizo que REE se convirtiera en propietaria de toda la red de transporte en alta tensión y, por tanto, produjo su consolidación como única empresa dedicada de forma exclusiva en España a la actividad del transporte de la energía eléctrica y como operador del sistema, tanto en la península como en los sistemas extrapeninsulares.

Como operador del sistema, es responsable de todas aquellas actividades que garanticen en todo momento la seguridad y la continuidad del suministro eléctrico, al igual que lleva a cabo la adecuada coordinación entre la producción y el transporte, para así asegurar que la energía transportada desde los generadores hasta la redes de distribución se dé en unas condiciones idóneas de calidad.

Debido a la dificultad de poder almacenar la energía eléctrica en grandes cantidades, surge la necesidad de un equilibrio constante entre la producción y el consumo de energía de manera precisa e instantánea. Es aquí donde actúa la figura de REE como operador del sistema para garantizar dicho equilibrio. Para ello, se encarga de efectuar las previsiones de la demanda, así como operar en tiempo real las infraestructuras de generación y transporte eléctrico, para conseguir un ajuste continuo entre la producción programada en las centrales eléctricas y la demanda de los consumidores. En caso de no coincidir, REE comunica las órdenes precisas a las centrales para que adecuen sus generaciones con el pertinente aumento o disminución.

En cuanto al papel de REE como gestor de la red de transporte, se encarga del desarrollo y ampliación de la red, como de realizar su mantenimiento bajo criterios análogos y similares que aporten una adecuada fiabilidad y disponibilidad. De igual forma, se encarga de gestionar el flujo de electricidad entre el sistema peninsular y los sistemas exteriores, así como facilitar el acceso de terceros a la red de transporte.

Actualmente, la red de transporte está constituida por un sistema peninsular como extrapeninsular, compuesto por las Islas Baleares e Islas Canarias, y que en total está formado por más de 42.000 kilómetros de líneas de alta tensión enlazadas con más de 5.000 subestaciones, con una capacidad total de transformación de más de 84.000 MVA. El resultado a ello es una red altamente mallada, fiable, segura y en continuo aumento y mejora, con el fin de ofrecer una mejor calidad de servicio en el suministro eléctrico.

Para hacer llegar la energía eléctrica desde las redes de transporte hasta el domicilio de los usuarios en las apropiadas condiciones de calidad, se lleva a cabo a través de las redes de distribución, cuya gestión la desempeñan las compañías distribuidoras como Endesa, Iberdrola o Gas Natural Fenosa, entre las principales en España.

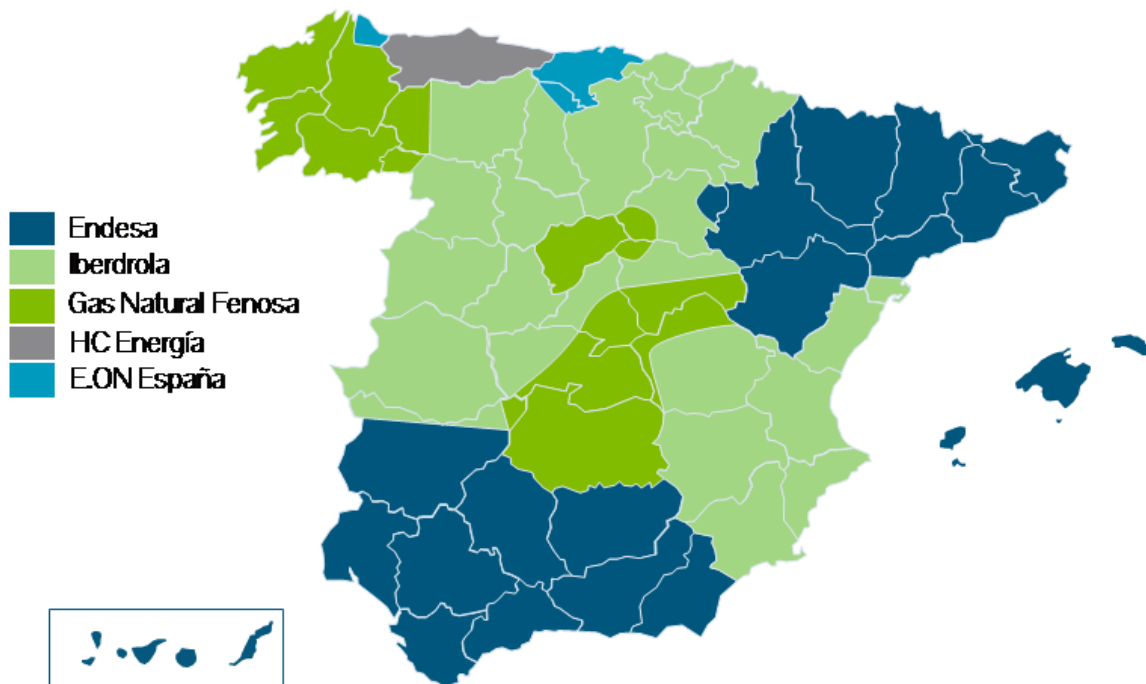


Figura 27. Distribuidores de energía eléctrica en España. [39]

En la Figura 28, se muestra el aumento progresivo de los kilómetros de circuitos de la red de transporte en el sistema peninsular como extrapeninsular, tanto en líneas de 400 kV como en redes de 220 kV o de menor tensión.

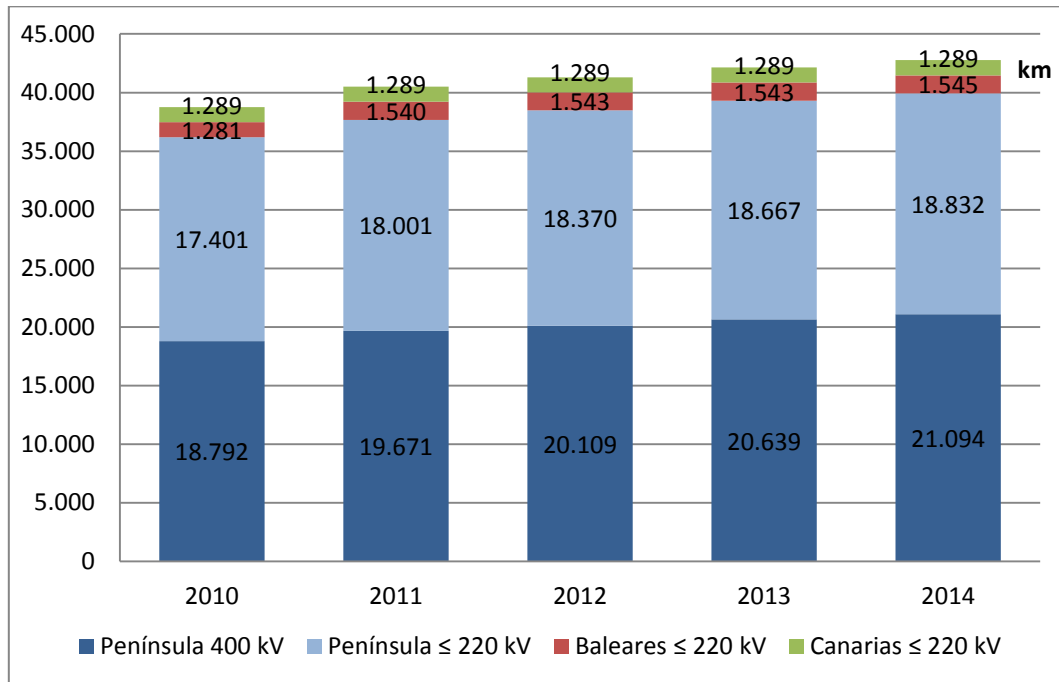


Figura 28. Kilómetros de la red de transporte instalados durante 2010-2014. [35]

Siguiendo con la tendencia creciente mostrada hasta ahora, en la Figura 29 se representa la evolución de los centros de capacidad de transformación:

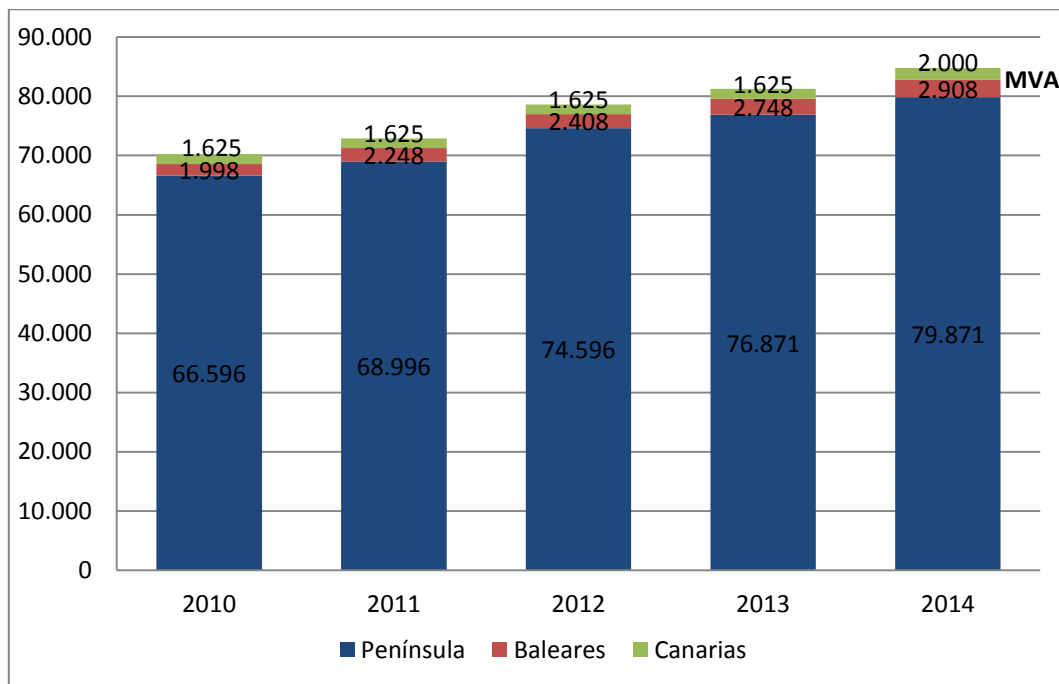


Figura 29. Evolución de la capacidad de transformación instalada durante 2010-2014. [35]



## 4.4 Demanda eléctrica

La demanda de energía eléctrica por parte de la sociedad se produce de forma continua para poder desarrollar con comodidad nuestras tareas cotidianas, obtener los bienes en las industrias o poder llevar a cabo de forma efectiva las actividades en los comercios y empresas. Esta demanda varía a lo largo del día, debido a la incapacidad del sistema eléctrico para almacenar grandes cantidades de energía eléctrica. Por ello, la curva de demanda no es idéntica a lo largo del día, produciéndose horas en las que se origine un pico de consumo (horas punta) donde la sociedad demande una mayor cantidad de energía de forma simultánea. El hecho de poder abastecernos de energía durante estas horas, se ve repercutido en un incremento del precio de la electricidad, debido a que están en funcionamiento aquellas centrales de producción más caras, conocidas como centrales de punta, las cuales emiten mayor cantidad de CO<sub>2</sub> y deben cubrir el pico de demanda trabajando en paralelo a las centrales principales.

A nivel nacional, las horas en las que se dispara el consumo de energía eléctrica difieren en función de la época del año en la que nos encontremos. Durante los meses de invierno las horas punta se producen, bien a media mañana entre las 11 y 12, cuando coincide la actividad tanto en empresas, servicios como en los hogares, o entre las 19 y 20 de la tarde, dada la afluencia entre la actividad comercial y las tareas del hogar. Mientras que en los meses de verano ocurre lo contrario, los picos de consumo se dan durante las horas centrales del día, cuando la temperatura es mayor. Hay que tener en cuenta que para poder satisfacer la demanda durante los picos de consumo, el sistema eléctrico tiene que estar dimensionado para abordar tal abastecimiento durante este reducido número de horas.

Pasadas estas horas, el consumo va disminuyendo hasta llegar a unas horas, conocidas como horas valle, en las que la demanda es mínima. Normalmente suelen darse durante el periodo nocturno, ya que a esas horas el consumo de energía eléctrica suele ser demandado por las grandes industrias que están en funcionamiento durante todo el día o aprovechando las horas nocturnas para beneficiarse del abaratamiento de la energía, y así conseguir un ahorro económico durante su productividad. Hay que tener en cuenta que durante esas horas se encuentra en funcionamiento servicios como el alumbrado público, hospitales, unidades informáticas, etc. Mientras que el consumo en los sectores residencial y de servicios, sí se ve reducido en comparación a la demanda originada durante el periodo diurno.

### 4.4.1 Curva de demanda eléctrica en España

La finalidad de la curva de demanda eléctrica es observar cómo varía la cantidad de potencia eléctrica demandada por el sistema eléctrico español en un periodo de tiempo establecido, normalmente de 24 horas. De esta manera, a lo largo del día se representa el sumatorio de todas las potencias instantáneas requeridas por los usuarios quedando descrita la curva de demanda, cuyo área encerrada representa la energía total consumida en dicho día.

Anteriormente se comentó que REE, como operador del sistema, se encarga de mantener el equilibrio entre generación y demanda y, para ello, necesita establecer una previsión del posible consumo que se dará a lo largo de los días. REE en su página web, representa una serie de gráficos que proporcionan la evolución de la demanda de energía eléctrica del sistema eléctrico peninsular, balear y canario en tiempo real. Estos gráficos son actualizados de forma periódica cada 10 minutos y contienen datos de la demanda real, prevista y programada, representados cada uno por curvas de distintos colores, así como los picos máximos y mínimos demandados durante todo el día.

De igual forma, se muestran otros gráficos donde se puede comprobar las distintas tecnologías de generación necesarias para cubrir la demanda (mix de generación), como notificar sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a cada fuente de generación. El consumo de un día laborable cualquiera se representa en la Figura 30:

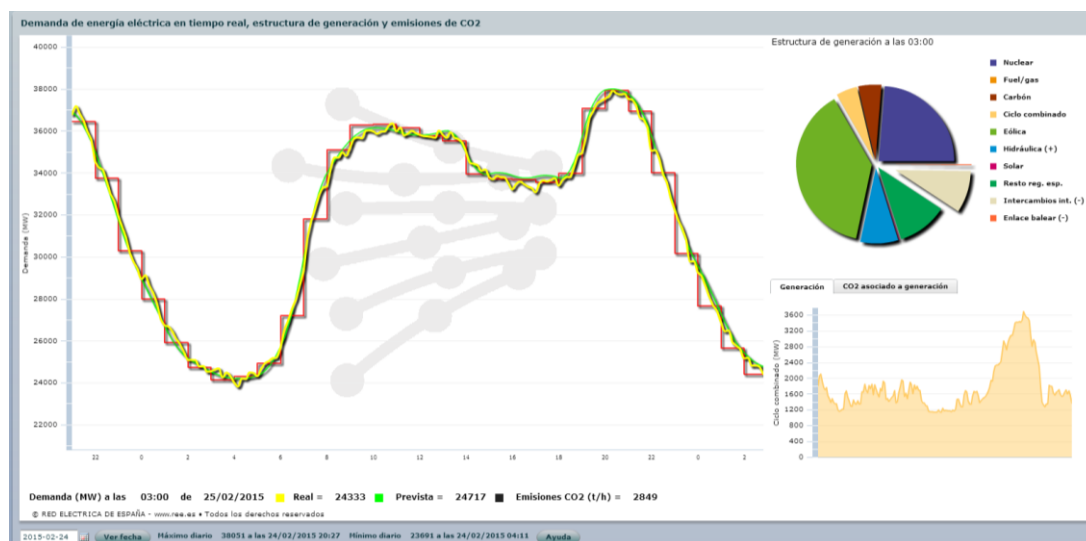


Figura 30. Evolución de la curva de demanda. [40]

La curva amarilla representa la demanda real y muestra los valores instantáneos de la demanda de energía. Durante la evolución de la misma, se puede observar las características estacionales y horarias, así como el nivel de actividad económico y social del país.

En cuanto a la curva verde, refleja la previsión de la demanda y es elaborada por REE, para la cual se basa en los valores de consumo que se dieron en periodos anteriores similares, corregidos mediante una serie de factores establecidos por aspectos como la climatología o el tipo día, ya sea laborable o festivo.

Por último, la curva escalonada roja representa la programación horaria operativa, lo cual significa la producción programada para las diferentes tecnologías de generación eléctrica a los que se les ha asignado el suministro eléctrico en la casación de los mercados diarios e intradiarios, al igual que en los mercados de gestión de desvíos y regulación terciaria, siendo gestionados estos dos últimos por REE.

Como se comentó anteriormente, la curva de demanda sufre variaciones a lo largo del día que hace que no sea idéntica durante las 24 horas del día. Esto supone una dificultad a la hora de dimensionar la capacidad de producción en base al pico de la demanda, para que de esta forma se llegue a cubrir la demanda constantemente. Ante esta situación, se ha planteado la gestión de la demanda como una solución para resolver o disminuir el problema, la cual consiste en la programación y ejecución de medidas propuestas para influir en la forma de consumir energía, con el fin de modificar el perfil de consumo. Con ello se conseguiría un aplanamiento de la curva de demanda, obteniendo una mayor flexibilidad, planificación y abaratamiento de la energía, y de esta forma contribuir en una gestión más eficiente y sostenible del sistema eléctrico. Las posibles medidas a adoptar se clasifican en 4 grupos según su impacto en la curva de demanda, tal y como se observa en la Figura 31:

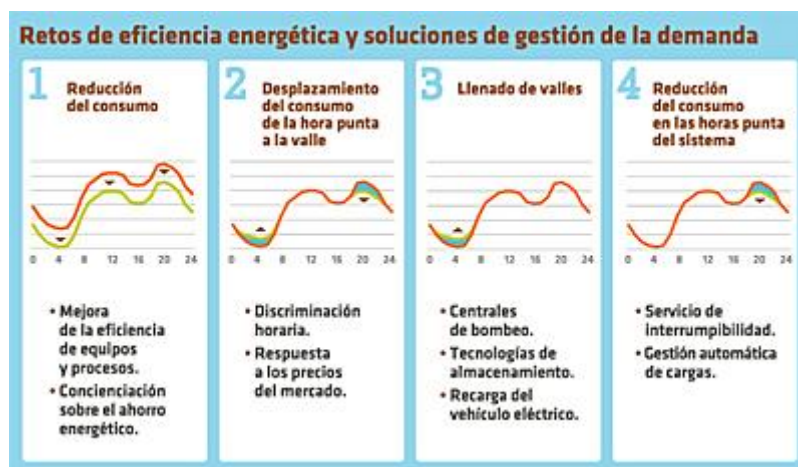


Figura 31. Soluciones a la gestión de la demanda. [41]

## 4.5 Redes inteligentes

El actual sistema eléctrico está basado en un modelo centralizado dónde la energía eléctrica se genera en los plantas de generación en media tensión (centrales hidráulicas, nucleares, carbón, ciclo combinado o energía renovable), y se distribuye en alta tensión hasta desembocar sobre las cargas finales en baja tensión, mediante el paso de la energía por las correspondientes subestaciones y centros de transformación. Esto hace que presente ciertas características, tales como la existencia de un flujo unidireccional de la energía y la dificultad para el almacenamiento de la energía en grandes cantidades.

En este contexto, la disposición de la tradicional red eléctrica permite el desarrollo asequible de las labores de monitorización y gestión. Sin embargo, la continua evolución y desarrollo de las energías renovables y de las tecnologías de la información, junto a una dependencia propia en el sector energético sin el apoyo de terceros países, ha propiciado una necesidad de progreso en el sistema eléctrico hacia las redes eléctricas inteligentes o Smart Grids.

Esta evolución significa un cambio hacia un sistema descentralizado, que permite el flujo bidireccional de la energía, y de generación distribuida, basado en la generación a



pequeña escala instalada lo más próxima al punto de consumo, con posibilidad de interactuar con la red por parte del usuario final y, por tanto, representando un nuevo activo en los mercados, ya sea comprando o vendiendo energía. Es aquí donde se manifiesta una necesidad de información sobre la red eléctrica y su gestión inteligente. La generación distribuida en este contexto, representa un nuevo ejemplo con el que obtener energía de calidad y de forma fiable en el punto de consumo. Así mismo, con la evolución hacia las Smart Grids, se conseguirá poner solución al impacto del transporte en el medio ambiente por medio de la integración del vehículo eléctrico, logrando obtener un transporte mucho más limpio y sostenible.

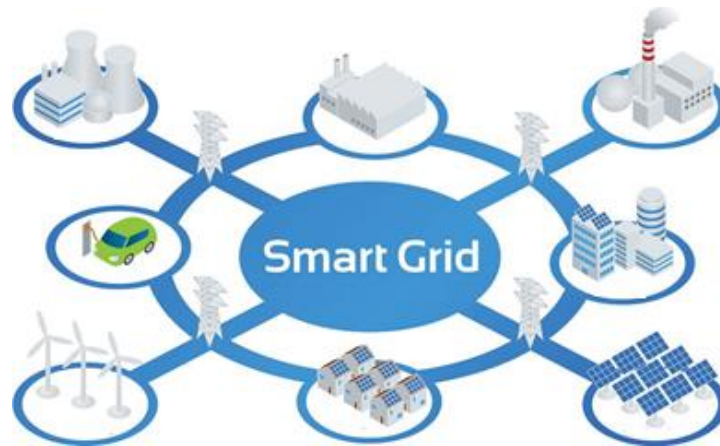


Figura 32. Esquema de una Smart Grid. [42]

Según REE, una Smart Grid queda definida como «aquella red que puede integrar de forma eficiente el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella, de tal forma que se asegure un sistema energético sostenible y eficiente, con bajas pérdidas y altos niveles de calidad y seguridad de suministro» [43]. Entre las características principales que debe presentar una red inteligente, destaca por ser:

- Bidireccional y flexible, con facilidad para adaptarse a la variabilidad de las necesidades del sistema, junto a la disposición en el uso de las infraestructuras de forma intensiva y segura.
- Inteligente, segura, con capacidad de operación y protección con seguridad y simplicidad, disponiendo de la información necesaria en tiempo real.
- Eficiente, a la hora de permitir satisfacer las necesidades energéticas con la mínima necesidad de nuevas infraestructuras.
- Abierta, permitiendo integrar de forma segura las energías renovables como crear nuevas oportunidades de negocio, a la vez que facilita el desarrollo de los mercados eléctricos.
- Sostenible, respetuosa con el medio ambiente y socialmente integrada.

Con estas premisas, se considera una Smart Grid como una red dotada de una inteligencia distribuida, capaz de integrar la gestión de tecnologías de la información y comunicación (TIC) con el fin de controlar la generación en base a la demanda de forma constante, para llegar a conseguir un mejor equilibrio entre el lado de la oferta y la demanda. Conocida esta información, posibilitará al operador del sistema y a las





distribuidoras eléctricas en la disposición del dominio sobre las redes de transporte y distribución en tiempo real.

Toda esta información es recogida mediante la incorporación en la red eléctrica de contadores inteligentes, permitiendo una facilidad en el control y la gestión de la red en ambos sentidos. Cada punto de consumo será dotado de estos contadores, a través de los cuales permitirá poner en conocimiento a los consumidores la información sobre el consumo y generación en tiempo real, consiguiendo de este modo optimizar la eficacia del sistema como la calidad del suministro. Estos contadores permitirán aplicar el precio de la energía en función de si es hora punta o valle, mediante la discriminación horaria, junto a la capacidad de telemedida y telegestión en la lectura de los contadores y el procesamiento de la información de forma remota.

Una vez recogidos los datos de consumo por los contadores, esta información se envía a través de tecnología PLC (*Power Line Communication*) llegando a los centros de transformación donde se dispone de un concentrador PLC, el cual permite la recopilación de esta información y enviarla a las distribuidoras eléctricas para su gestión. Mientras que en el caso de las plantas de generación de energía renovable, el operador del sistema será el encargado de recibir la información mediante diferentes medios de comunicación desde el parque de generación o desde un centro de control de generación puente. Por último, toda esta información es sometida en bases de gestión de datos como las MDMS (*Management Data Meter System*), mediante las cuales las distribuidoras eléctricas son capaces de notificar al usuario señales para conseguir un consumo eficiente, coordinando de esta manera la demanda del vehículo eléctrico con la capacidad de la red. Esto se basaría en consignas que informen al cliente el momento adecuado para hacer un mayor o menor consumo, dependiendo de la potencia que se esté demandando en ese momento, y de este modo compensarle por ello, lográndose un cambio de rol de los consumidores hacia usuarios responsables en el consumo de energía. A su vez, existe la posibilidad de poner en conocimiento la energía renovable disponible en la red por medio de sistemas inteligentes WIS (*Weather Intelligent System*) [44]. Una vez conocida toda esta información y la presente controlabilidad de la figura del consumidor vinculada con la red, permite al sistema la posibilidad de realizar una regulación sobre las plantas de generación. Esto significa un paso crucial para llevar a cabo la adecuada integración del vehículo eléctrico en la red.

El desarrollo de las Smart Grids está profundamente relacionado junto al del vehículo eléctrico, tal que se vinculará una interconexión entre el vehículo eléctrico y la red mediante la Smart Grid, la cual aportará soluciones de gestión de la energía mediante la planificación de las recargas. Con ello, se hará del consumo una mayor estabilidad y predicción, aportando de esta manera asistencia tanto a los encargados de las instalaciones como de las compañías eléctricas en la optimización de recursos. Por ello, con la integración del vehículo eléctrico junto a sus correspondientes infraestructuras de recarga, se conseguiría hacer de una red más flexible ante condiciones de variabilidad en la demanda, bien a través de las tarifas o la gestión de la descarga.



Este último concepto se conoce como V2G (*Vehicle-to-Grid*), el cual consiste en la cesión de energía del vehículo a la red. De esta forma, el vehículo eléctrico llegaría a actuar como un sistema de almacenamiento energético a través de las baterías, suministrando energía eléctrica a la red durante las horas pico para así suavizarlos, o cuando fuera necesario, consiguiendo así solucionar las dificultades relacionadas con la condición discontinua de las energías renovables. Para las compañías eléctricas, la posibilidad de hacer V2G serviría de gran ayuda de forma ocasional y a corto plazo ante un colapso crítico en la demanda, siendo respaldado por la energía disponible en el vehículo eléctrico para evitar caídas en el sistema, siempre y cuando no influya en las necesidades del usuario del vehículo eléctrico.

A su vez, con el V2G se conseguiría superar la barrera encontrada en las habituales redes a la hora de almacenar energía. Con una implantación a gran escala del vehículo eléctrico en España, supondría disponer de una enorme capacidad de almacenamiento de energía eléctrica, de tal manera que existiría la posibilidad de almacenar toda la demanda diaria nacional si la totalidad del parque automovilístico español fuera eléctrico. Sin embargo, ante esta situación se generarían problemas para las compañías eléctricas que dependerían de cuándo y cómo se recarguen, por lo que se necesita la regulación de la demanda mediante las Smart Grids. Su capacidad de gestión de la energía se presenta a las compañías eléctricas como una evolución en la gestión de la interfaz entre el vehículo eléctrico y la red. Con ellas se conseguiría una mayor eficiencia y operatividad del sistema, y permitir a su vez una mejor integración de las renovables, colaborando así con uno de los objetivos marcados por la Unión Europea para el 2020.

España se presenta como un buen escenario donde llevar a cabo la implantación de las Smart Grids, debido a la elevada capacidad instalada de energía renovable como a la implantación de generación distribuida, posicionándose como un óptimo candidato que reúne unas adecuadas condiciones con expectativas de futuro. Por ello, se tiene que desarrollar e incentivar a las compañías eléctricas para que apuesten por esta tecnología y garantizar la integración de nuevas demandas como la del vehículo eléctrico bajo sus curvas de carga, consiguiendo así una flexibilidad con la que se solventarían problemas en la red. En España, se están llevando a cabo proyectos piloto en las ciudades de Barcelona y Málaga por parte de la compañía eléctrica Endesa, pues son pioneras a nivel mundial en la gestión de ciudades inteligentes, suponiendo un progreso importante en las redes eléctricas en sintonía con el resto de la sociedad.

Pero, ante una integración eficiente del vehículo eléctrico, ¿cuál será la nueva demanda que se generará con su introducción?, y ¿será la red eléctrica capaz de abastecer dicha demanda? Cabe decir que la demanda del sistema eléctrico en España está comprendida en torno a los 22.000 y 46.000 MW, con una variabilidad entre los puntos de máxima demanda y el consumo durante las horas valle. Por ello, se requiere de una evolución en el sector para afrontar esta nueva demanda, que se ha conseguido mediante:

- Una adecuación del marco regulatorio que contempla la estandarización de los modos de carga y los conectores, a través de los estándares internacionales IEC 61851 e IEC 62196, como la aprobación de la ITC-BT-52 sobre instalaciones para

la carga de vehículos eléctricos. Para ello se establece el Real Decreto 647/2011, de 9 de abril (modificación de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico), para incluir en el marco normativo de dicho sector un nuevo sujeto, los gestores de carga, como la regulación de su actividad para prestar servicios de recarga energética, necesarios para un rápido desarrollo del vehículo eléctrico y mejorar la eficiencia del sistema y aplanamiento de la curva de demanda.

- Por otro lado, se introduce la nueva discriminación horaria con una tarifa súper-valle para fomentar la recarga del vehículo eléctrico en las horas de menor demanda energética, asociándose a tasas de acceso más económicas entre la 1 y la 7 de la mañana (destinada a consumidores residenciales con menos de 15 kW).
- Nuevas vinculaciones entre agentes del sistema eléctrico, como la figura del agregador [16]. El agregador será de especial importancia en la integración del vehículo eléctrico, pues realizaría la intermediación entre sus usuarios y el operador del sistema, posibilitando la participación bidireccional de los vehículos en los diversos mercados de operación.

Para una eficaz integración del vehículo eléctrico se necesita de una gestión inteligente de la recarga, de forma que dependiendo de cuándo y cómo se realice la recarga, el sistema se verá influenciado de diferente manera. El caso más desfavorable se presenta ante una recarga rápida (entre 15 y 30 minutos) de los vehículos eléctricos de forma simultánea durante las horas punta, como se puede observar en la Figura 33:

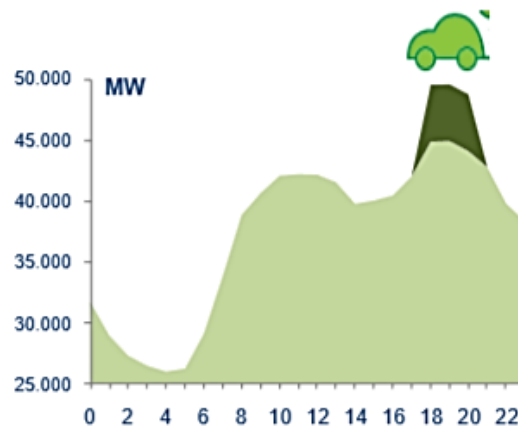
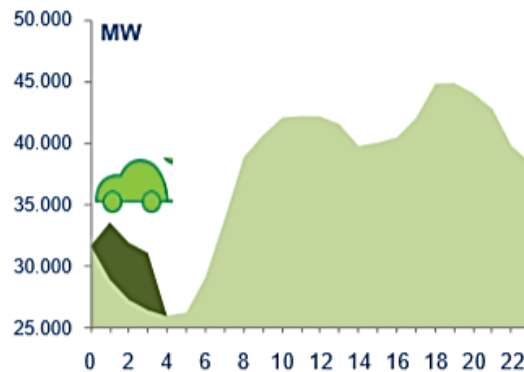


Figura 33. Recarga en horas punta. [16]

Este tipo de recarga se concentraría en el rango horario comprendido entre las 19 y las 21 horas, provocando un crecimiento en la punta de la demanda. Ante esta situación, se necesitaría hacer un sobredimensionamiento del sistema para afrontar tal pico, y por consiguiente una mayor inversión tanto en generación como en redes de transporte, al prescindir de una gestión inteligente a la hora de programar las recargas. Este hecho induciría en una ineficiencia en la operatividad del sistema, no favoreciendo de este modo la integración de las energías renovables.

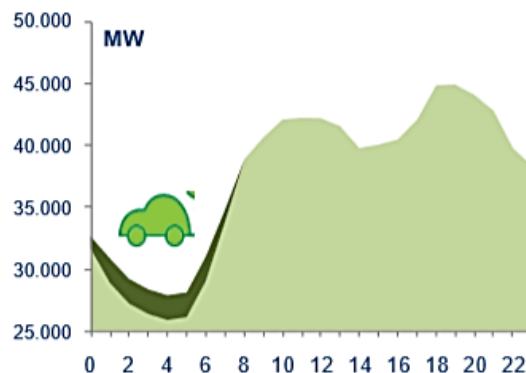
Como caso intermedio, los vehículos eléctricos se recargarían durante las horas valle sin una gestión inteligente, espaciada en un periodo de tiempo que comprenda las 4 horas, tal y como se representa en la Figura 34:



**Figura 34. Recarga en horas valle sin gestión inteligente. [16]**

En este caso, este tipo de recarga originaría un aumento en la demanda nocturna, favoreciendo en el aplanamiento en la curva de demanda y consiguiendo de las infraestructuras eléctricas una mayor rentabilidad y manejo, tanto en las redes de transporte y distribución, como en los generadores. Del mismo modo, se facilitaría un mayor acceso a las energías renovables para respaldar cierta parte de la demanda, consiguiendo así un aumento en la eficiencia del sistema. Sin embargo, cabe destacar que con esta recarga se producirían inestabilidades debido a ciertos cambios repentinos en la demanda nocturna, originando dificultades en la gestión y operación del sistema.

Por último, el caso más beneficioso para el sistema eléctrico es aquel en el que la recarga se realice durante las horas valle mediante gestión inteligente durante un periodo de tiempo que comprenda las 8 horas, tal y como se muestra en la Figura 35:



**Figura 35. Recarga en horas valle con gestión inteligente. [16]**

Entre las ventajas de este tipo de recarga en vistas al sistema eléctrico, permite una mayor integración de las energías renovables aumentando su eficiencia gracias a una gestión inteligente, no haciendo necesario un sobredimensionamiento en la capacidad de las infraestructuras de generación y transporte. Además, se lograría una mejor operación del sistema sin ser influido por desequilibrios comunes ante la integración de vehículos



eléctricos. Por último, el hecho de recargar el vehículo durante las horas valle con un alto peso de energía de origen renovable, desde el punto de vista del usuario, supondría un considerable incentivo al beneficiarse del abaratamiento de la energía durante esas horas. En este contexto, el vehículo eléctrico ha despertado una progresiva inclinación de cara al sistema eléctrico por la posibilidad de realizar un aplanamiento en la curva de carga.

Según REE, teniendo en cuenta el escenario en el que se daría este tipo de recarga, se lograría alcanzar una penetración de 6,5 millones de vehículos eléctricos en el actual sistema eléctrico español, sin necesidad de invertir en equipamientos de generación y transporte [45]. Ante esta posible incorporación, la demanda se vería afectada dependiendo del tipo de vehículo eléctrico. Para un consumo medio de 15 kWh/100 kilómetros y un recorrido de 17.000 km/año, la energía que consumiría un vehículo eléctrico será igual a:

$$E = \frac{15 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \cdot 17.000 \frac{\text{km}}{\text{año}} = 2.550 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \quad (1)$$

La integración de estos vehículos eléctricos situaría la demanda en 16,6 TWh/año. Conocida la demanda de energía eléctrica nacional del pasado año 2014, 258 TWh, y que la eólica generó 51 TWh, el consumo de esta flota supondría:

$$\% \text{ Demanda energía eléctrica} = \frac{16,6 \text{ TWh}}{258 \text{ TWh}} \cdot 100 = 6,43\% \quad (2)$$

$$\% \text{ Producción energía eólica} = \frac{16,6 \text{ TWh}}{51 \text{ TWh}} \cdot 100 = 32,55\% \quad (3)$$

Por tanto, en términos de demanda anual, tal integración sería asumida en el sistema eléctrico sin originar importantes problemas de abastecimiento. Pero para ello se deben considerar determinados parámetros durante el proceso de recarga, como en qué periodo del día se lleva a cabo, durante cuánto tiempo y bajo qué condiciones.



## Capítulo 5

### Infraestructura para la recarga

#### 5.1 Introducción a la recarga eléctrica

A la hora de adquirir un vehículo eléctrico, uno de los problemas que nos encontramos es: ¿dónde se puede recargar? Durante el comienzo de su implantación, la accesibilidad a emplazamientos como a una red de infraestructuras de recarga era escasa debido a la falta de usuarios. La continua comercialización de modelos eléctricos e híbridos enchufables está encaminando a la movilidad eléctrica hacia un futuro alentador, motivo del cual se debe a factores que han propiciado a dejar de lado los combustibles fósiles, pasando a optar por el vehículo eléctrico como la mejor elección para un desarrollo masivo en el mercado a corto y medio plazo.

El desarrollo de una infraestructura de recarga para el vehículo eléctrico representa una interfaz entre los sistemas de generación y distribución con el consumidor final, siendo un componente enlazado a la adquisición del vehículo. Se requiere de la existencia de una infraestructura que permita recargar las baterías de forma equiparable al repostaje de los vehículos convencionales, pero que implica un cambio de mentalidad en el usuario, ya que para una mayor eficiencia y sostenibilidad del sistema eléctrico, resulta más conveniente la recarga lenta del vehículo en horas valle. Por ello, se necesita una mayor programación y coordinación entre el repostaje y el uso del vehículo.

Para su desarrollo, hay que tener en cuenta factores como la potencia del vehículo, la seguridad en el suministro, el grado de comunicación entre el vehículo y la red, como la ubicación de los puntos o estaciones de recarga entre otros, para que de esta manera los usuarios puedan recargar sus vehículos de forma fiable, accesible y cómoda.

Según el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), el número de puntos de recarga de uso público en España son de 761, de los cuales 615 están destinados para turismos y comerciales. Las recargas habilitadas en ellos se distribuye en 611 para recarga convencional y 4 para recarga rápida. Sumado a todos estos puntos, 10 tienen acceso para minusválidos y 136 son de uso exclusivo para motos eléctricas [46].

La introducción del vehículo eléctrico en el mercado es lenta, pero de forma permanente, y motivo de ello es la escasez de puntos de recarga. Se necesita para ello de una Administración Pública comprometida con incentivos para la adquisición de vehículos eléctricos, como con la implantación de un mayor número de puntos de recarga en la vía pública.

Una solución ante la falta de puntos de recarga se encuentra en el nuevo Real Decreto 1053/2014 aprobado el pasado mes de Diciembre de 2014 por el Consejo de Ministros,

por el que se regula la ITC-BT-52 “Instalaciones con fines especiales. Infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos” [47]. Con esta nueva normativa desaparece la incertidumbre hacia los requerimientos mínimos para la instalación de los puntos de recarga ubicados en las viviendas, en los parkings públicos o privados y en la vía pública.

Lo recogido en esta nueva normativa aclara que en los nuevos domicilios unifamiliares se deberá instalar un punto de recarga para el vehículo eléctrico, y respecto a los aparcamientos públicos se ubicará un poste de recarga por cada 40 plazas de parking. En cuanto a las nuevas viviendas con aparcamiento común privado, se llevará a cabo una preinstalación por cuenta del edificio para que cada usuario pueda conectarse de forma más económica. El cargo de esta obra no incluirá los cables, ni los interruptores, ni el contador, sino los huecos y las canalizaciones. Por último, para las vías públicas se establece una dotación mínima que deberá fijarse según los planes de movilidad sostenible municipal o supramunicipal.

## 5.2 Arquitectura del sistema de recarga

Para llevar a cabo el proceso de repostaje se necesita conocer los componentes que intervienen en él, las funciones realizadas por cada uno de ellos y cómo interactúan entre sí. Por tanto, según el IDAE todo sistema de recarga está sujeto a los siguientes elementos:

- **Usuario** - Persona física o jurídica dada de alta en el servicio que interactúa con el sistema de recarga.
- **Vehículo Eléctrico (VE)** - Se trata del medio de transporte a recargar.
- **Punto de Recarga (PR)** - Se considera como el equipo de la infraestructura dedicado a suministrar de electricidad al vehículo eléctrico. Desde este momento es cuando comienza la comunicación con el sistema de gestión.
- **Sistema de Gestión (SG)** - Se trata de un sistema centralizado, encargado del control del sistema de recarga como de gestionar las incidencias ocurridas en los puntos de recarga. A su vez, este sistema está comunicado con los siguientes módulos:
  - Módulo de comunicación con el punto de recarga, a través del cual se da la orden de comenzar o interrumpir la carga.
  - Módulo de comunicación con el usuario, integrado en el punto de recarga mediante acceso visual por pantalla o vía móvil y se encarga de validar la conexión de un usuario.
  - Módulo de comunicación con el distribuidor de energía, el cual avisa e informa al distribuidor ante posibles incidencias en el suministro.
  - Módulo de comunicación con el Help Desk, al cual le comunica la información relativa sobre el proceso de carga para hacérselo llegar al cliente.
  - Módulo de comunicación con el Sistema de Roaming, el cual se encarga de informar a otros sistemas de gestión ante el posible uso de usuarios no dados de alta, para así asegurar la interoperabilidad entre distintos gestores de carga.



- **Help Desk** - Es el centro de atención al usuario para interactuar de forma directa con el sistema de recarga y comunicar incidencias, posibles dudas y solucionar problemas.
- **Sistema de Roaming** - Se trata del sistema que permite la interoperabilidad entre diferentes sistemas de gestión, a través del flujo de información relativo de los usuarios que estén utilizando puntos de recarga diferentes a los que estén dados de alta.

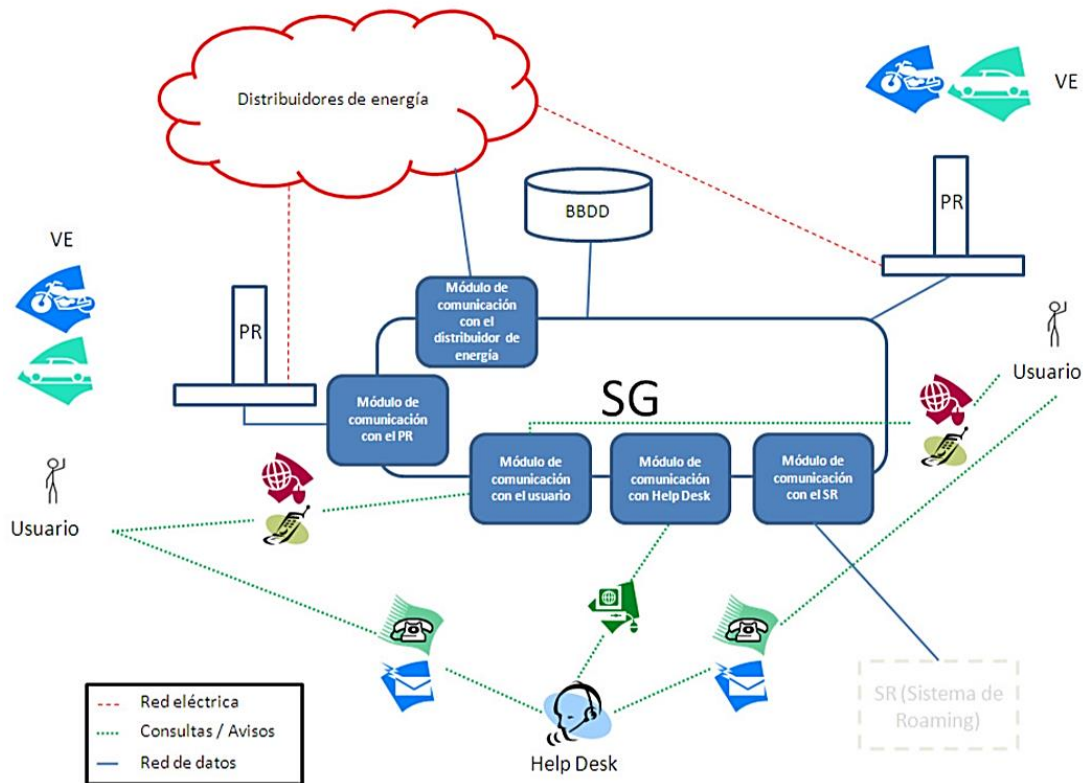


Figura 36. Arquitectura del sistema de recarga eléctrica. [48]

En la anterior Figura 36 se muestra la conexión entre todos los elementos, apreciándose las funciones relacionadas dentro del sistema de recarga. Sin embargo, existe la posibilidad de sistemas de recarga en los que disminuya la actividad del sistema, como por ejemplo sistemas en los que sea el punto de recarga el que realice su propia gestión de forma individual. Ante esta situación, para efectuar correctamente la recarga de vehículos eléctricos, es imprescindible la actuación de agentes de mercado, como pueden ser ayuntamientos, compañías eléctricas, proveedores de infraestructuras, etc., que desempeñan una función como factores implicados durante el proceso de recarga, los cuales se detallan a continuación:

#### Gestor de carga

La figura del gestor de carga está representada por sociedades mercantiles y quedó regulada por el Real Decreto 647/2011 del 9 de mayo, por el cual se presta a la reventa de electricidad para la recarga del vehículo eléctrico, con el objetivo de conseguir una mejor integración del vehículo eléctrico mediante la implantación de mayores puntos de recarga en espacios públicos. Igualmente están habilitados para almacenar energía eléctrica y





mejorar la gestión del sistema eléctrico. Con la pertinente normativa, han hecho de la recarga eléctrica una actividad liberalizada, donde los gestores de carga están capacitados para revender la energía eléctrica a sus usuarios, comprándosela a la compañías comercializadoras o directamente en el mercado de electricidad OMIE (Operador del Mercado Ibérico de Energía-Polo Español).

Todo gestor de carga se encarga de llevar a cabo la correcta recarga, como tener un control del proceso de carga, acceder a bases de datos, verificar la comunicación con los distribuidores de energía y con los puntos de recarga, etc. Para llevar a cabo su función, el gestor de carga se compone del:

- Punto de Recarga
- Sistema de Gestión
- Help Desk
- Sistema de Roaming

#### Distribuidor de energía

Se trata de sociedades mercantiles cuya finalidad es distribuir la energía eléctrica, además de construir, mantener y dirigir los servicios de distribución para poder llevar la energía a los puntos o estaciones de recarga.

#### Proveedor de infraestructura

La compañía de tal objeto se encarga de establecer y mantener los puntos de recarga, como del desarrollo de aplicaciones en las que interactúe el usuario y aplicaciones de suministro del vehículo eléctrico, como del mantenimiento y operación de los puntos de recarga.

#### Proveedor de zona de carga

Es aquella entidad autorizada para abastecer y adaptar el emplazamiento en el que se van a ubicar todos los equipos para la recarga del vehículo eléctrico, como los puntos o estaciones de recarga.

### **5.3 El punto de recarga**

El punto de recarga es la parte física y elemental del gestor de carga que lleva a cabo el suministro de energía para recargar la batería del vehículo eléctrico. A partir de este punto es donde comienza la comunicación con el sistema de gestión, y se clasifican en función si son puntos inteligentes o es una estación de recarga compuesta por varios puntos con un sistema de control. Según la posición en la que estén ubicados los puntos de recarga, se clasifican en equipos de pared (aparcamientos públicos y unifamiliares) y equipos de pie o postes (vía pública y estaciones de recarga rápida).

Todo punto de recarga está formado por:

- Tomas de corriente que suministran la electricidad a las baterías de uno o varios vehículos.

- Cuadros de señalización luminosos para comunicar al usuario el estado del proceso de carga.
- Interruptores para comenzar o detener la carga.
- Regulador electrónico de carga.

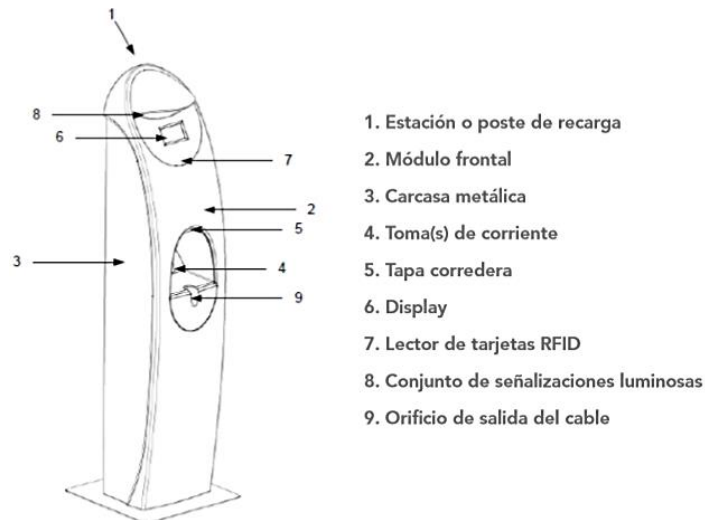


Figura 37. Componentes de un punto de recarga tipo poste. [49]

La recarga del vehículo eléctrico en cada uno de estos puntos se puede efectuar de diferentes modos y tipos, empleando los distintos tipos de conectores adecuados para cada caso. A continuación, se explicarán las distintas especificaciones relacionadas con la recarga eléctrica.

### 5.3.1 Tipos de recarga

En la actualidad existen diferentes tipos de recarga con los que el vehículo eléctrico puede ser recargado, utilizando diferentes tomas de corriente normalizadas. Las tomas empleadas a nivel europeo utilizan hasta 230 V y 16 o 32 A. Dependiendo de la potencia suministrada por la toma de corriente, ésta determinará la duración de la recarga. Podemos encontrarnos desde la recarga lenta, perfecta para recargar en nuestro domicilio o puestos de trabajo, hasta la más rápida, que puede llegar a realizar un recarga suficiente en 15 minutos.

#### Recarga lenta

La recarga lenta o convencional es la más extendida y estandarizada debido a su gran aceptación por parte de los fabricantes de vehículos eléctricos. Este tipo de recarga suele realizarse en corriente alterna monofásica, y es la que empleamos en los domicilios particulares a la hora de recargar diversos aparatos eléctricos de consumo. Por ello, el nivel de intensidad y voltaje eléctrico es el que se emplea en las viviendas, con 16 A y 230 V. De este modo, la potencia capaz de suministrar el punto de recarga puede llegar a los 3,7 kW.



Dado este potencial, el tiempo empleado para realizar una recarga completa de la batería oscila entre las 6 y 8 horas, variando en función de la capacidad de almacenamiento de la batería, en torno a los 24 kWh. Por ello, debido a que el vehículo deberá permanecer inactivo durante largos periodos de tiempo, este tipo de recarga se presenta como la mejor solución para realizarla durante el periodo nocturno en garajes particulares o comunitarios, o bien durante la jornada laboral del usuario donde se tenga acceso a un punto de recarga en el emplazamiento de la empresa.

En vista de la situación actual del sistema eléctrico, para una mayor eficiencia y optimización energética, los vehículos deberán ser recargados mayormente durante las horas valle, facilitando el uso diario del vehículo para el entorno urbano. De esta manera el usuario se beneficiaría de las tarifas creadas para tal objeto, además de estar cargando las baterías con energía de origen eólico y solar, que se encuentra inutilizada durante la noche al disminuir la demanda.

El coste aproximado de adquisición de un equipo para recargas lentas está en los 4.500 €, el cual no representa un precio muy encarecido para el usuario, en comparación al equipo de recarga rápida que veremos a continuación.

Estos puntos de recarga están equipados de sistemas de protección que permiten una recarga segura. Esta protección se consigue a través de interruptores diferenciales con reenganche automático, y un sistema de bloqueo para evitar el robo de electricidad si se intenta desconectar el vehículo durante la recarga.

Con el empleo de la recarga convencional, en vistas a la actual situación del sistema eléctrico, se puede llegar a abastecer de forma más eficiente grandes demandas de potencia sin necesidad de sobredimensionar la red actual, por medio de la gestión de una red inteligente.

### **Recarga semi-rápida**

Con este tipo de recarga se consiguen disminuir los tiempos de estacionamiento frente a la recarga convencional. Para ello, se emplea una corriente de 32 A y una tensión de 230V. Con estos valores, el punto de recarga es capaz de suministrar una potencia eléctrica de 7,3 kW. A través de la recarga semi-rápida, el proceso para cargar al 100% la batería del vehículo se alcanzará aproximadamente a las 4 horas, para el caso de una capacidad de almacenamiento de 24 kWh. Existe la posibilidad de disminuir el tiempo de recarga hasta 1 hora si se realiza con corriente alterna trifásica, utilizando una tensión y corriente de 400 V y 32 A, y suministrando una potencia de 22 kW.

En cualquier caso, las potencias entregadas bajo esta recarga en comparación a la recarga rápida, permite una mayor vida útil de la batería al no estar sometida a elevadas temperaturas. Al igual que ocurría con la recarga convencional, los puntos de recarga llevan incorporados un sistema de seguridad como protecciones diferenciales, al igual que sensores de conexión y bloqueo.



## Recarga rápida

Ante la limitación en la autonomía de los vehículos eléctricos, la integración de puntos de recarga rápida permite extender el número de kilómetros recorridos con recargas de 15 a 30 minutos, recargándose la batería como máximo entre un 65 y 80% de su capacidad, reservándose el porcentaje restante para asegurar un margen bajo la recarga convencional.

Para llevar a cabo este tipo de recarga, la energía se suministra en corriente continua empleando una mayor corriente eléctrica de hasta 200 A y 400 V, obteniendo de esta manera una potencia en torno a los 80 kW. Para ello, se precisaría de un rectificador para transformar la corriente alterna suministrada por la red de transporte en corriente continua para la recarga.

Este tipo de estaciones, al igual que las anteriores, estarían equipadas con las pertinentes medidas de protección, y se situarían en emplazamientos como lugares públicos, centros comerciales o zonas de trabajo, donde se tenga un acceso momentáneo a una recarga rápida durante el trayecto.

Empleando este tipo de recarga, el usuario encontraría en ella la solución a la práctica de repostaje habitual en los vehículos de combustión interna. De esta manera, los clientes se desplazarían a las estaciones de recarga rápida, conocidas como electrolinerías, de igual forma en el que lo haría a una gasolinera. Sin embargo, hay que pensar que este tipo de recarga está destinada para asegurar al usuario que va a llegar al final de su recorrido, no siendo el tipo de recarga habitual ya que generaría problemas en el sistema eléctrico español. Además, su uso de forma rutinaria impactaría en el comportamiento futuro de las baterías, al igual que conllevaría un posible envejecimiento prematuro.

Para llevar a cabo la implantación de estos puntos de recarga junto a los de oportunidad (semi-rápida), es necesario una adecuación esencial en la red eléctrica a través de una ampliación de la potencia instalada, como la adaptación de las protecciones y conexiones.

La implantación de la recarga rápida no se contempla como tipología de recarga a corto plazo en los hogares, debido principalmente a las mayores exigencias eléctricas de la red para ser capaz de absorber la demanda de todos los vehículos conectados, lo que implicaría una encarecida modificación en la instalación eléctrica de las viviendas. En comparación a la recarga convencional, la potencia que requiere este tipo de instalaciones es similar a la de un edificio de 15 viviendas, por lo que a gran escala y desde el punto de vista del suministro eléctrico podría generar problemas en el abastecimiento del sistema.

Sumado a ello, el coste de adquisición ronda los 60.000 €, por lo que la implantación de puntos de recarga rápida suele estar sustentada por grandes empresas o centros de ocio con el objetivo de satisfacer las necesidades de sus usuarios.

Los tres tipos de recarga ya comentados van a influir en la gestión de la demanda eléctrica, pues en función de la hora a la que repostemos repercutirá de forma diferente en la curva de demanda. De esta forma, el escenario que encajaría mejor con la recarga lenta

se correspondería con recargas durante las horas valle en los domicilios donde pernoctan los vehículos, para evitar saturaciones en la red y de esta forma beneficiarnos del precio más económico de la energía. Mientras que una recarga rápida será algo más inusual, sirviendo como punto de urgencia para el conductor ante la situación de quedarse parado, y que se podrá dar en la vía pública a cualquier hora del día, ya sea pico o valle.

### 5.3.2 Modos de recarga

El modo de recarga viene determinado por el nivel de comunicación entre el vehículo eléctrico y la infraestructura de recarga. Debido al amplio desarrollo del vehículo eléctrico, se ha establecido la norma IEC 61851 “Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos” que define los modelos de recarga que se emplean en España, diferenciando 4 modos estandarizados. Según aumente la numeración, los niveles más altos corresponden a infraestructuras con un nivel de protocolo de comunicación mayor, impactando en el control del proceso de carga entre la infraestructura y el vehículo. La clasificación y características de cada una de ellas se detallan a continuación.

#### Modo 1

Bajo este modo se encuentran aquellas infraestructuras en las que no existe comunicación entre el vehículo y la red, debido a que es el propio vehículo eléctrico el que cuenta con un dispositivo que controla el proceso de carga.

La conexión a la red de corriente alterna se hace a través de una toma de corriente normalizada, convencional doméstica o industrial, de uso no exclusivo como la tipo Schuko. Para ello, se emplea un cable normal que no incorpora ningún tipo de sistema de protección ni de control. En el caso de una recarga monofásica a 230 V, la potencia de carga permitida es de 3,7 kW, y 11 kW si es trifásica a 400 V, con una intensidad máxima en ambos casos de 16 A. Debido a estos limitados valores, este modo de carga se contempla para recargas de sistemas de menor potencia, como las motos y bicicletas eléctricas.

En países como EE.UU no se permite la carga en modo 1, donde las normas nacionales no aseguran la presencia de un dispositivo de corriente residual (DCR) en el lado de la alimentación.



Figura 38. Modo de carga 1. [50]

#### Modo 2

En este modo la carga también se realiza en corriente alterna y sigue sin existir un intercambio de información entre el vehículo y la red, siendo el propio vehículo el que regula la carga de las baterías. A diferencia del modo 1, el cable empleado para la conexión

del vehículo a la toma de corriente dispone de un circuito piloto de control intermedio (entre el vehículo eléctrico y la clavija) con protecciones que permite:

- Verificar la correcta conexión del vehículo a la red.
- Comprobar continuamente la conexión a tierra.
- Activar y desactivar la recarga del sistema.
- Seleccionar la velocidad de carga.

Para la conexión del vehículo eléctrico a la red, se utilizan tomas normalizadas que no necesitan estar conectadas de forma permanente a la red, y no tienen que ser de uso exclusivo para la recarga del vehículo eléctrico, existiendo la posibilidad de conexión a tomas tipo Schuko. En la mayoría de casos, en el lado de la infraestructura de recarga se sitúa un enchufe convencional y en el lado del vehículo se dispondrá de un conector específico.

Al disponer de un sistema de seguridad, este modo permite cargar a un amperaje máximo de 32 A, siendo capaz de transferir una potencia máxima de 7,3 kW para recargas monofásicas y 22 kW para trifásicas.

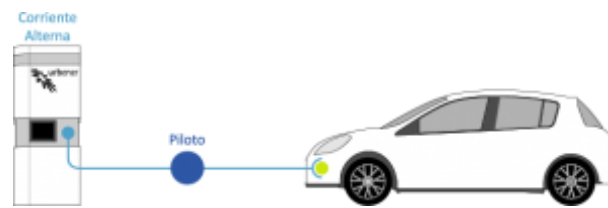


Figura 39. Modo de carga 2. [50]

### Modo 3

En este caso, existe comunicación entre el vehículo y el punto de recarga, ya que la conexión directa del vehículo a la red se realiza mediante un equipamiento dedicado en exclusiva a la recarga del vehículo eléctrico, conocido como SAVE (Sistema de Alimentación del Vehículo Eléctrico), que permite la monitorización de la carga. De esta manera, las tomas de corrientes empleadas son de uso exclusivo para recargar el vehículo eléctrico y están permanentemente unidas a la red general de distribución. La recarga se lleva a cabo mediante un cable que incorpora un hilo piloto de comunicación y dispone de conectores especiales en ambos extremos del cable, como pueden ser el Mennekes, Scame o SAE J1772, que impiden el acceso a las partes en tensión hasta que finaliza la recarga.

Los dispositivos de control y protecciones se disponen en el propio punto de recarga y no en el cable, encargándose de controlar las mismas acciones que en el anterior modo. Los valores máximos permitidos de potencia son los mismos que en el modo 2, mientras que la intensidad máxima puede ser ampliada de 32 a 64 A.

Este modo destaca por su seguridad y capacidad de carga bajo diferentes niveles, por lo que es el recomendado por los fabricantes de vehículos y gestores de carga.

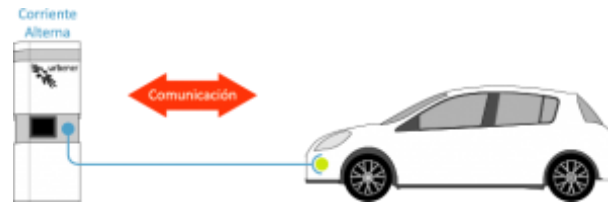


Figura 40. Modo de carga 3. [50]

#### Modo 4

Existe un grado elevado de comunicación con la red y mediante este modo se consiguen transmitir mayores cantidades de potencia de la red al vehículo, por lo que está diseñado para la recarga rápida en corriente continua, empleando como conectores el CHAdeMO.

La conexión del vehículo eléctrico a red es indirecta, y se hace a través de un SAVE dedicado con toma de recarga fija. Mediante un cargador externo se realiza la conversión de corriente alterna a continua en la instalación fija, con la ventaja de que el cliente no necesita disponer de un cable, pues está incorporado en el cargador externo. Tanto las funciones de control como de protección se encuentran en el lado de la instalación fija.

Una de las ventajas de que el convertidor se sitúe en el punto de recarga es que permite recargas de mayor potencia y tensión, reduciendo de esta manera las pérdidas y el calentamiento en el convertidor del coche.



Figura 41. Modo de carga 4. [50]

### 5.3.3 Tipos de conectores

Los tipos de conectores son un elemento importante para llevar a cabo la recarga del vehículo eléctrico. A través de las tomas de corriente se pretende que la recarga se realice con éxito, de forma cómoda y segura para el usuario. Existen conectores de todo tipo a nivel internacional, con distintos tamaños y propiedades, por lo que en la norma IEC 62196 "Bases, clavijas, conectores de vehículo y entradas de vehículo. Carga conductiva de vehículos eléctricos" se recogen los más específicos y normalizados.

#### Schuko

Es el conector más usado a nivel europeo como toma convencional monofásica y trifásica, definido en el estándar CEE 7/4 Tipo F. Dispone de dos bornes y toma de tierra, y lo podemos encontrar en diversos aparatos eléctricos de uso doméstico. La corriente admitida no supera los 16 A y, al no incorporar una comunicación con la red, están destinados a usarse para las recargas lentas.





Figura 42. Conector Schuko. [51]

### Tipo 1 - SAE J1772

El conector SAE J1772, también conocido como conector Yazaki, está estandarizado y se usa de forma específica para cargar los vehículos eléctricos. Su tamaño es de 43 mm de diámetro, en el cual se dispone el número típico de pines, dos de corriente y uno de tierra, además de dos pines complementarios. Estos últimos están diseñados para impedir el movimiento del coche mientras esté conectado y permitir un control de la comunicación con la red. Es por esto y por su forma, lo que los hace tan característicos.

Dependiendo de la corriente, el funcionamiento de este conector está dividido en dos versiones. La primera con intensidades de hasta 16 A para recargas lentas, y la segunda con mayores intensidades de hasta 80 A para recargas rápidas.



Figura 43. Conector Tipo 1. [51]

### Tipo 2 - VDE-AR-E 2623-2-2

El uso de este conector no es específico para los vehículos eléctricos, pudiendo emplearse de forma más estandarizada a nivel industrial. Conocido también como conector Mennekes, su diámetro es de 55 mm donde se disponen siete pines distribuidos, de los cuales cuatro son para corriente trifásica, uno para tierra y dos para comunicaciones. El nivel de seguridad de este tipo de conector permite bloquear la clavija, pero no la tapa de la toma.

Dispone, al igual que el conector SAE, de dos niveles de funcionamiento. Si la corriente es monofásica está destinado para recargas lentas con intensidades máxima de 16 A, mientras que si es trifásico permite que la recarga se haga de manera rápida con intensidades del orden de 63 A, suministrando una potencia de 43,8 kW.





Figura 44. Conector Tipo 2. [51]

### Tipo 3 - Scame

Popularmente llamado Scame, también se le conoce como EV Plug-in Alliance. Representa un modelo estandarizado a nivel europeo diseñado por el acuerdo entre las empresas Schneider Electric, Legrand y Scame, y que está impulsado mayormente por Francia e Italia.

Ofrece una mayor seguridad que el Tipo 2 al disponer de obturadores de protección, impidiendo el acceso de los usuarios a las partes en tensión, además de bloquear la clavija y la tapa de la toma del punto de recarga. Una de las ventajas de estos conectores es que presentan una tapa que protege los terminales mientras esté desenchufado.

En cuanto a su diseño, dispone de cinco o siete pines para emplearse tanto con red monofásica como trifásica, con disponibilidad de comunicación a red en ambas. La corriente máxima permitida es de 32 A, por lo que está diseñado para recargas semi-rápidas.



Figura 45. Conector Tipo 3. [51]

### CHAdeMO

El conector CHAdeMO representa un modelo estándar creado por diversos fabricantes de automóviles japoneses, como Mitsubishi, Nissan, Toyota y Fuji. Su uso está diseñado para recargas rápidas en corriente continua, con una capacidad admisible de corrientes de 200 A. El tamaño del diámetro, tanto del conector como del cable, es superior al resto de conectores estandarizados. Cuentan con diez pines, incluidos la toma de tierra y la comunicación con la red.



Figura 46. Conector CHAdeMO. [51]

### 5.3.4 Emplazamiento de los puntos de recarga

En función de la ubicación y el uso de los puntos de recarga, la infraestructura tiene que seguir unos requerimientos técnicos que afectan a la red, como unos criterios a tener en cuenta en la edificación y seguridad. A gran escala se pueden agrupar los puntos de recarga en públicos y privados.

En el ámbito privado, la recarga se lleva a cabo a través de módulos situados en los garajes de las empresas, de una comunidad de vecinos o domicilios unifamiliares. En dichas ubicaciones es donde los usuarios recargarán sus vehículos eléctricos de forma habitual bajo recargas lentas, debido a que el vehículo permanecerá parado durante un largo periodo de tiempo.

Por otro lado, también existe la posibilidad de llevar a cabo la recarga a través de postes situados en el entorno público, como puede ser en la vía pública, en los aparcamientos públicos o los ubicados en las grandes centros comerciales, estaciones de tren, etc. Normalmente estos puntos ofrecerán la ventaja de llevar a cabo recargas de oportunidad (semi-rápida), permitiendo que en un par de horas la recarga sea suficiente para que el vehículo llegue al punto de destino. Aparte de poder recargar el vehículo de forma oportuna, se consideraría en algunos puntos de la ciudad la disposición de estaciones de recarga rápida para así recargar las baterías en tan solo unos minutos.

Los posibles lugares donde se pueden instalar los puntos de recarga se muestran en la Figura 47, de forma que en cada uno de ellos se puede instalar un único punto de recarga o una estación de recarga compuesta por varios puntos, con la posibilidad de efectuar varios tipos de recarga en cada uno de ellos.

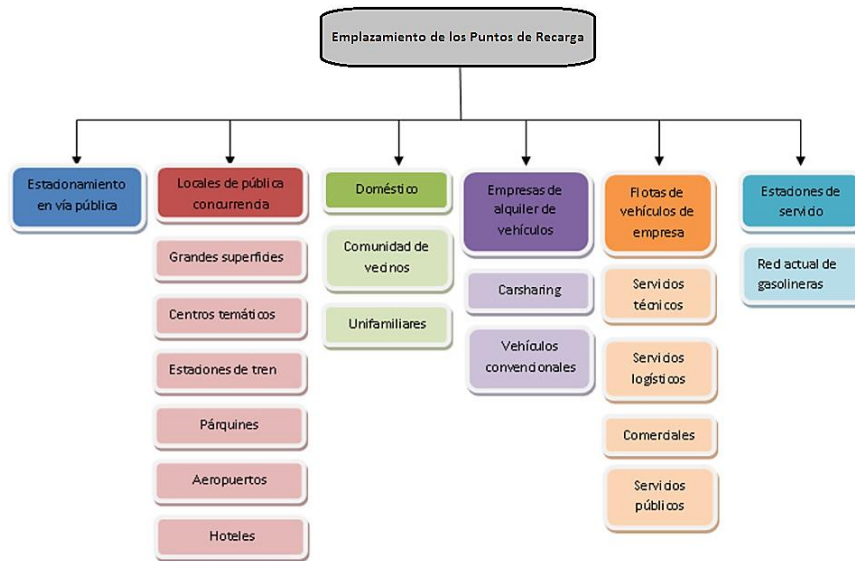


Figura 47. Posibles ubicaciones de los puntos de recarga. [48]

Cada ubicación presenta una serie de ventajas e inconvenientes que se presentan en la siguiente Tabla 6:

Ubicación	Ventajas	Inconvenientes	Tipos de recarga
<b>Estacionamiento en la vía pública</b>	Disponibilidad amplia Promoción de la utilización del vehículo eléctrico	Vandalismo Necesidad de reservar espacio Tiempo de uso inferior a tiempo de recarga Coste de implantación	Lenta Semi-rápida
<b>Locales de pública concurrencia</b>	Ubicación recomendable Promoción de la utilización del vehículo eléctrico	Necesidad de reservar espacio	Lenta
<b>Doméstico</b>	Bajo coste de implantación Habilitado para recarga nocturna Ubicación recomendable	No todos los usuarios disponen de lugar físico donde aparcar	Lenta
<b>Empresas de alquiler de vehículos</b>	Bajo coste de implantación Habilitado para recarga nocturna Ubicación recomendable	Menor disponibilidad de puntos de recarga frente a la flota de vehículos de alquiler existente	Lenta Semi-rápida
<b>Flotas de vehículos de empresa</b>	Bajo coste de implantación Habilitado para recarga nocturna Ubicación recomendable	No todos los usuarios disponen de lugar físico donde aparcar	Lenta Semi-rápida
<b>Estaciones de servicio</b>	Rapidez en la recarga	Problemas en el desarrollo de la tecnología Tiempo de carga inferior a 30min Alto coste de implantación	Rápida

Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de las ubicaciones de los puntos de recarga. [48]



## 5.4 Alternativas de recarga

Los diferentes modos de recarga comentados anteriormente, se basan en una recarga conductiva a través de la conexión del vehículo a la red mediante una serie de cables, utilizando una toma de corriente, como puede ser un enchufe doméstico o un punto de carga. Aunque este sistema de recarga es el más habitual y desarrollado, existen otras tecnologías de recarga que ya han sido puestas en marcha en determinados países, y se prevé una mayor incorporación a nivel mundial en los próximos años.

### 5.4.1 Recarga inductiva

Con la recarga inductiva, la tarea de recargar el vehículo se convertiría en algo cómodo y sencillo para el usuario, ya que bastaría con posicionar el vehículo sobre el sistema de recarga para que comience de forma automática. Este hecho representaría el futuro para los fabricantes de vehículos eléctricos.

Esta recarga se realiza de forma inalámbrica, a través de inducción o por resonancia electromagnética, desde una plataforma de transmisión situada en el suelo hasta el dispositivo de recepción que se encuentra incorporado en el interior del vehículo eléctrico. La recarga inductiva se realiza a distancias cortas, empleando un campo electromagnético para llevar a cabo el intercambio de energía. Mientras que la recarga por resonancia emplea dos bobinas de cobre, una actuando como emisora y otra como receptora, y la transferencia de energía se produce cuando ambas bobinas se encuentran cerca y funcionan con la misma frecuencia.

La principal ventaja reside en la eliminación de cables entre el vehículo y el punto de conexión, evitando así la vulnerabilidad de los cargadores por cable ante posibles robos o daños por vandalismo.

Este tipo de recarga se puede llevar a cabo bajo recargas estáticas, cuando el vehículo esté parado en nuestro domicilio y durante las paradas realizadas en la circulación, o basándose en una recarga dinámica donde el vehículo se recargaría circulando sobre sistemas integrados en el asfalto. De esta manera, permitiría una reducción en el tamaño de las baterías y, consecuentemente, en el peso total del vehículo.

Esta nueva forma de recarga se presenta como una tecnología prometedora por sus considerables ventajas, pero que necesita corregir determinados problemas antes de su integración en el mercado. Aparte de ser un sistema más caro, existe el riesgo de calentarse las partes metálicas del vehículo provocando problemas de seguridad; es una tecnología menos eficiente frente a la recarga convencional, con pérdidas en la transmisión de energía durante el proceso de carga en torno a un 5 y 10%, y afectaría a los sistemas electrónicos del vehículo, como el equipo de navegación, el cambio automático de marchas o el frenado regenerativo.

Compañías como la norteamericana HEVO Power, han diseñado un sistema de recarga inalámbrico a través de resonancia electromagnética con el aspecto de una alfombrilla, o como la compañía Evatran, la cual ya ha distribuido con popularidad este sistema de recarga que permite adaptarse a los modelos Nissan Leaf y Chevrolet Volt. A nivel

nacional, la empresa española Tecnia instauró el primer punto de recarga inalámbrica en la localidad de Vizcaya a finales de 2012 [52].



Figura 48. Primer punto de recarga inductiva en España. [52]

Se prevé que entre los años 2016 y 2020, la mayoría de fabricantes de vehículos eléctricos ofrezcan la posibilidad de recargar sus modelos con este tipo de recarga.

### 5.4.2 Intercambio de baterías

También conocido como *Battery Swapping*, esta forma de recarga consiste en la sustitución de la batería mediante un alquiler, por otra cargada completamente en un centro especializado. Se trata de una alternativa por la que se están encaminando diferentes fabricantes, como Renault, permitiendo una despreocupación por parte del usuario en cuanto a posibles averías y problemas en este componente tan encarecido. De esta manera, dispondríamos del vehículo cargado en un tiempo inferior a una recarga convencional. Entre las ventajas más características son las siguientes:

- El intercambio se realiza rápidamente, del orden de minutos.
- Se realiza automáticamente, no teniendo que bajarse el usuario del vehículo.
- La disponibilidad de centros de intercambio hace que la autonomía del vehículo no sea un inconveniente.
- Los costes relacionados con la batería son asumidos por la compañía.

La desventaja de este sistema de recarga se presenta en el precio del contrato económico durante la vida útil del vehículo, pues a la larga resulta más caro en comparación a la recarga convencional. A este inconveniente, si le sumamos la baja disponibilidad de estas estaciones de recarga, lo convierte en un hecho difícil de conseguir, pues se necesita de una gran inversión para ponerlas en marcha. Compañías como Better Place apostaron por este sistema de recarga, pero debido a su bancarrota en 2013 llevaron al intercambio de baterías al desuso [53].



**Figura 49. Sistema automático de intercambio de baterías. [54]**

Sin embargo, en estos últimos años dicha tecnología se ha convertido en punto de debate, pues la compañía Tesla Motors anunció que a principios de 2015 pondrían en marcha su proyecto piloto. El tiempo para llevar a cabo el intercambio es de 3 minutos y el coste por cada intercambio es de unos 45€ (frente a la recarga gratuita de sus supercargadores), por lo que en función de la demanda, Tesla evaluará su viabilidad y, de ser así, apostar por este sistema de recarga [55].



## Capítulo 6

### Proyectos de integración

#### 6.1 Proyecto VERDE

El Proyecto VERDE, desarrollado en España, se trata de un proyecto enmarcado en el programa CENIT (Consortios Estratégicos Nacionales de Investigación Técnica), que tras cuatro años de investigación, puso fin a su actividad en junio de 2013. Su finalidad ha sido la búsqueda y estudio de los puntos clave para el desarrollo e incorporación de la electrificación del transporte en el mercado español, por medio de los híbridos enchufables (PHEV) y los eléctricos puros (EV), así como evaluar su impacto en el sistema eléctrico. Esta iniciativa trata de conseguir una menor dependencia de los combustibles fósiles, una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte, ampliar la capacidad de integración de las energías limpias y asegurar el futuro de la industria de la automoción e I+D en España.

El proyecto, dividido en siete líneas de trabajo, ha permitido conseguir avances en múltiples campos; el estudio de los sistemas de almacenamiento y la incorporación del vehículo en el sistema eléctrico, como el análisis de la infraestructura de recarga y la comunicación del vehículo con la red eléctrica. Las áreas de trabajo para conseguirlo han sido [56]:

- Estudio de las tecnologías mecánicas y eléctricas incorporadas en el vehículo.
- Investigación y desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía.
- Investigación y desarrollo de sistemas de tracción eléctrica para el vehículo.
- Diseño y control de convertidores de carga y descarga de baterías.
- Estudio y diseño de infraestructuras locales para la recarga de energía.
- Integración del vehículo eléctrico en el sistema eléctrico: infraestructuras, redes y servicios.
- Incorporación y aprobación de las tecnologías desarrolladas para el vehículo eléctrico por medio de balances energéticos y medioambientales.

Uno de los principales resultados del proyecto ha sido el diseño y desarrollo de un prototipo de vehículo eléctrico, el Seat León VERDE, como de los correspondientes sistemas de control y gestión para llevar a cabo su correcta integración en el sistema eléctrico. De igual modo, para conseguir una vinculación entre el vehículo y la red, se ha llevado a cabo el desarrollo de un sistema inteligente, con el objetivo de obtener una optimización en la gestión de la recarga mediante la recarga inteligente durante las horas de menor demanda eléctrica.

Como respuesta a esta iniciativa, ha servido de incentivo para invertir e innovar en el desarrollo de la movilidad eléctrica, y de esta forma convertir a España en un pilar





fundamental en la investigación del vehículo eléctrico. Además, ha representado una oportunidad para estudiar en profundidad esta nueva carga, de la cual se concluye su flexibilidad en la operación del sistema eléctrico para llevar a cabo su eficiente integración.

El proyecto ha estado dirigido por el Centro Técnico de SEAT y coordinado administrativa, técnica y científicamente por el CTM Centre Tecnològic. Ha contado con la participación de 15 empresas de diferentes sectores, tales como AIA, Cegasa, Circutor, Cobra, Endesa, Ficosa, Green Power, Iberdrola, Infranor, Lear, Mapro, Red Eléctrica de España, Siemens, Rovalma y Técnicas Reunidas, además de 13 centros entre Universidades y Organismos Públicos de Investigación, como AICIA, ASCAMM, CIDETEC, CIRCE, CNM del CSIC, CTM Centre Tecnològic, IIC, IIT de la Universidad Pontificia de Comillas, IREC, Leitat, Tecnalia, la Universitat Politècnica de Catalunya y la Universidad Carlos III de Madrid.

El proyecto, desarrollado en seis comunidades autónomas (Andalucía, Aragón, Cataluña, C. de Madrid, País Vasco y C. Valenciana), ha contado con un presupuesto total de 34 millones de euros y con el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad, por medio del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI).

## 6.2 Proyecto TECMUSA

El proyecto TECMUSA (Tecnologías para la Movilidad Urbana Sostenible y Accesible), liderado por investigadores del INSIA (Instituto Universitario de Investigación del Automóvil) de la Universidad Politécnica de Madrid y tras dos años de actividad en España, puso fin a su investigación el pasado mes de octubre de 2011. El objetivo del proyecto ha consistido en el estudio y diseño de vehículos voluminosos de propulsión híbrida y eléctrica para el transporte colectivo de personas y mercancías. Este hecho ha conseguido aportar soluciones de sostenibilidad en el transporte urbano de manera eficaz, con un bajo o nulo impacto medioambiental y asegurando una plena accesibilidad a todos los usuarios.

La actividad del proyecto ha abarcado una primera fase, que consiste en un diseño constructivo de las plataformas a desarrollar, para después llevar a cabo su incorporación en una segunda fase sobre modelos industriales, los cuales han sido un autobús eléctrico, otro híbrido y un vehículo híbrido.

La idea es tratar de identificar los requisitos necesarios para el desarrollo de estos vehículos de grandes dimensiones y así llegar a unas soluciones óptimas en el conjunto del vehículo y sus prestaciones, por medio de la pérdida de peso, una menor oposición al movimiento, una adecuación a recorridos urbanos como una gestión de la energía durante el trayecto. Entre los resultados del proyecto, cabe destacar los siguientes [57]:

- Se han identificado los requisitos energéticos por medio de un sistema de modelado para vehículos *Heavy-Duty*, en el que se ha partido de diferentes condiciones de conducción y modelos de servicio.





- Debido a la reducción de peso conseguida en estos vehículos de gran tamaño, se ha podido aplicar a ellos nuevos conceptos estructurales definidos para los vehículos urbanos.
- Se han expuesto dos vías de trabajo; la primera, basada en el empleo de conceptos multi-material, con interés en los materiales compuestos, y la segunda en concepto de una optimización estructural, buscando la sistematización del proceso a través de las mejores soluciones topológicas y paramétricas.
- Se ha llevado a cabo el diseño y desarrollo de un banco de pruebas para sistemas de propulsión de tecnología híbrida y eléctrica.

TECMUSA ha estado financiado por el Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011 del Ministerio de Ciencia e Innovación, y cofinanciado por el FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional) de la Unión Europea. El proyecto ha contado con un presupuesto de 2,9 millones de euros, y en él han participado un total de 15 empresas del sector industrial y transporte, tales como EMT Madrid, AVIA Ingeniería, IVECO, SIEMENS, Endesa, Grupo ETRA, CEMUSA, CASTROSUA, SAFT, ALSA, SEUR, BOYACA, AZKAR, FCC, CITET, junto con la colaboración de 10 grupos de investigación de la Universidad Politécnica de Madrid.

### 6.3 Proyecto ELVIRE

ELVIRE (*Electric Vehicle Communication to Infrastructure, Road Services and Electricity Supply*) es un proyecto de ámbito europeo que pretende vencer lo que se conoce como “ansiedad de autonomía”, esto es garantizar a los usuarios de los vehículos eléctricos que van a llegar a su destino, con la seguridad de que podrán recargar la batería antes de producirse su descarga total. Con un presupuesto de 10 de millones de euros, el proyecto se comenzó en octubre de 2010 y su actividad se ha desarrollado durante tres años.

Para conseguir este propósito, se requiere de un progreso orientado al consumidor, de tal forma que mediante un centro de servicios, se optimice la comunicación entre el vehículo y el usuario, consiguiendo a su vez una efectiva comunicación entre el vehículo y el proveedor de servicios, y entre el proveedor de servicios y el de energía eléctrica. Para ello, la actividad principal que se ha llevado a cabo ha sido el diseño e implementación de dos sistemas con interacción mutua:

- Un sistema de a bordo, el cual se encarga de dar soporte al usuario del vehículo mediante su comunicación con la red, compuesta por los proveedores de recarga. A través de un dispositivo, se monitoriza el estado de carga de la batería y se comprueba la energía necesaria para llegar al destino final. A su vez, este sistema proporciona al conductor la ubicación de los puntos situados en todo trayecto en los que podrá recargar la batería del vehículo.
- Un sistema proveedor de servicio, a través del cual se recopila la información de las estaciones de recarga disponibles en la red y de los vehículos que se encuentran conectados a ellas. Una vez procesados los datos obtenidos, se le comunica al usuario del vehículo la información necesaria, permitiéndole elegir entre las diferentes opciones disponibles de recarga que se encuentren a su alcance.



Como resultado final a este trabajo, el usuario podrá conocer en tiempo real desde el panel de control del vehículo el estado de carga de la batería, los kilómetros disponibles a recorrer y la ubicación de los puntos de recarga más próximos en el trayecto. Además, permitirá informar al usuario de la disponibilidad de los puntos de recarga en función de la demanda que genere la conexión a red el resto de vehículos eléctricos, como estimar el tiempo de carga necesario para llegar a su destino o establecer una comparación en la tarificación de la recarga [58].

El proyecto, encabezado por Continental, ha contado con la participación de un total de 13 empresas, entre las cuales se encuentra Endesa como la única empresa española, junto a SAP, Better Place, Renault y Volkswagen, entre otras.

## 6.4 Proyecto ZEM2ALL

El proyecto internacional ZEM2ALL (*Zero Emissions Mobility to All*), es un programa de cuatro años de duración y que cuenta con un presupuesto de 60 millones de euros, el cual busca conseguir una introducción masiva de las nuevas prestaciones y ventajas de la movilidad eléctrica, como facilitar su acceso a los ciudadanos.

El comienzo de su actividad tuvo lugar durante el segundo semestre de 2012 en la ciudad de Málaga, por ser pionera en la implantación del concepto de ciudad inteligente. El objetivo que tiene ZEM2ALL es recrear un escenario de movilidad eléctrica donde se permita efectuar una gestión de la recarga, realizar V2G bidireccionalmente, como tener acceso a las estaciones de recarga rápida. Para su ejecución, se ha llevado a cabo la introducción de una flota próxima a los 200 vehículos eléctricos, junto a la incorporación de los pertinentes sistemas de comunicación que permitan la monitorización del comportamiento del vehículo, para así efectuar con éxito la recarga de las baterías cuando se requiera.

Gracias a esta iniciativa, cada usuario tiene acceso a realizar una recarga convencional en sus aparcamientos particulares como en determinados emplazamientos distribuidos estratégicamente por la ciudad. A su vez, tienen a su disposición un total de 23 puntos para efectuar una recarga rápida, representando una de las más amplias redes desarrolladas en una ciudad europea. Durante la primera fase del proyecto, el acceso a estas estaciones de recarga rápida estaba restringido a los usuarios participantes del proyecto, pero desde ahora todo usuario en posesión de un vehículo eléctrico puede acceder a esta infraestructura.

Tanto el vehículo como la infraestructura de recarga, están vinculados a un centro de control encargado de transmitir al usuario en todo momento la información necesaria para hacer más efectiva y cómoda su conducción, como puede ser la ubicación del punto de recarga rápida más próximo o calcular el itinerario más corto para llegar a él. De igual modo, se han creado una serie de aplicaciones con el fin de gestionar y mantener informado al usuario sobre el estado del vehículo y la carga desde su Smartphone.

Desde que se comenzó el proyecto, la introducción de estos vehículos ha permitido conocer con detalle su impacto en el entorno del sistema eléctrico y la sociedad, como



ofrecer una serie de conocimientos que permita analizar los requerimientos necesarios para una futura implantación del vehículo eléctrico a gran escala. Los hitos conseguidos durante estos dos años de actividad han sido los siguientes [59]:

- Gracias a esta flota de vehículos eléctricos, se han recorrido más de tres millones de kilómetros con cero emisiones contaminantes al medio ambiente. Mientras que esta distancia, en el caso de haber sido recorrida por vehículos convencionales, hubiera contaminado la atmosfera con más de 200 toneladas de CO<sub>2</sub>.
- Otro de los objetivos conseguidos ha sido el desarrollo e implantación de un sistema eléctrico centralizado a pequeña escala. Esta micro red permite incorporar cargas que van a operar acopladas a la red como sistemas de energía autosuficientes. Con estas micro redes se pretende conseguir que la red eléctrica esté compuesta por una interconexión entre ellas y gestionadas de forma inteligente, pues representan un punto clave para conseguir un sistema eléctrico mucho más sólido y eficaz. Como ejemplo a ello, se ha implantado una micro red en las instalaciones de la Tabacalera de Málaga, en la cual se han incorporado un total de 6 puntos con posibilidad de realizar V2G.

ZEM2ALL es un proyecto que surge en colaboración entre España y Japón, contando con el apoyo de los centros tecnológicos NEDO y CDTI, junto al Ayuntamiento de Málaga. La parte española está encabezada por Endesa, y cuenta también con la participación de empresas como Telefónica y Ayesa. La parte japonesa la dirige Mitsubishi Heavy Industries, junto a Mitsubishi Corporation e Hitachi como afiliados.



## Capítulo 7

# Impacto del vehículo eléctrico en un sistema de potencia

### 7.1 Planteamiento del análisis

Los vehículos eléctricos suponen una oportunidad para optimizar la eficiencia del sistema eléctrico, ya que la recarga puede amoldarse a las necesidades de cada uno de los usuarios por medio de una gestión inteligente que fomentaría recargar el vehículo eléctrico durante las horas de menor demanda, lo cual no ocurre en gran parte de los consumos eléctricos. Estas recargas suponen un importante factor integrador al habilitar al vehículo como almacenador de energía mediante la tecnología V2G, es decir, un intercambio bidireccional de la energía entre el vehículo eléctrico y la red. Con esta práctica se estaría contribuyendo en la estabilidad de la curva de carga para hacer que se gestionen los requisitos de producción durante las horas valle y pico de forma más equilibrada. De este modo, las redes del sistema eléctrico se dotarían de una flexibilidad que aumentaría la integridad y calidad en el suministro a los usuarios.

El estudio de la incorporación de la demanda del vehículo eléctrico se va a llevar a cabo en una red estandarizada como la IEEE de 34 nudos [60], la cual va a representar a una red de MT. Esta red será conectada a una red de potencia infinita representada por un generador de 100 MVA, cuya conexión se realiza mediante un transformador de 33/15 kV con una potencia de 100 MVA y una impedancia de valor  $x=0,1$  p.u, conectando de esta manera el nudo 1 con dicha red.

A este sistema se le incluirá la conexión de cinco redes de BT con diferentes tipologías de consumo representadas por sus cargas equivalentes, y cuyo factor de potencia es de 0,9 inductivo. La conexión de estas redes al conjunto de la red se realiza por medio de sus respectivos transformadores de 15 kV/380 V con una impedancia  $x=0,1$  p.u.

A continuación, se presenta un esquema del sistema con los niveles de tensión y potencias de los transformadores implicados en el mismo.

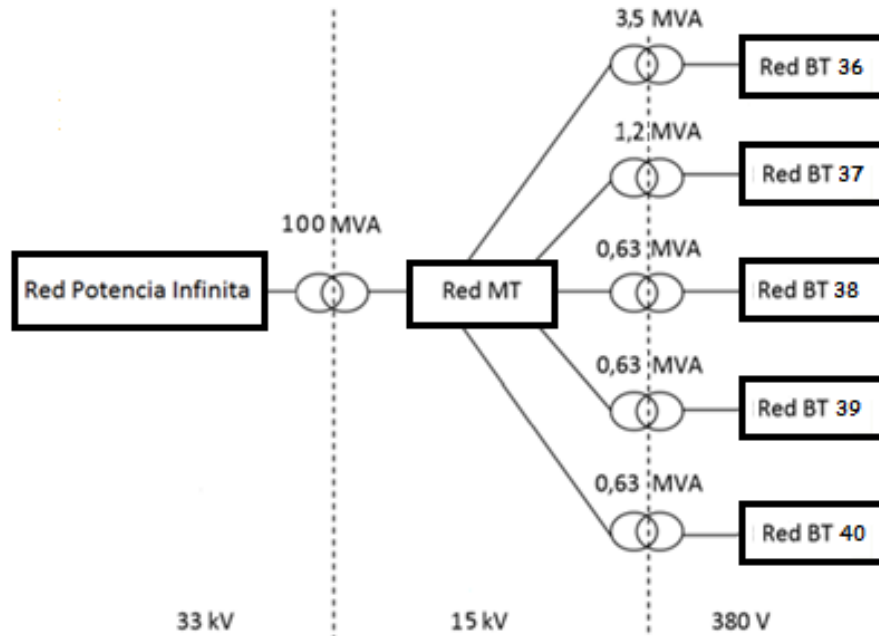


Figura 50. Niveles de tensión y potencia de los transformadores del sistema. Fuente propia

En cuanto a los puntos de conexión de las diferentes redes de BT a la red de MT, se detalla a continuación en un esquema en el que queda representada la topología de la red IEEE de 34 nudos.

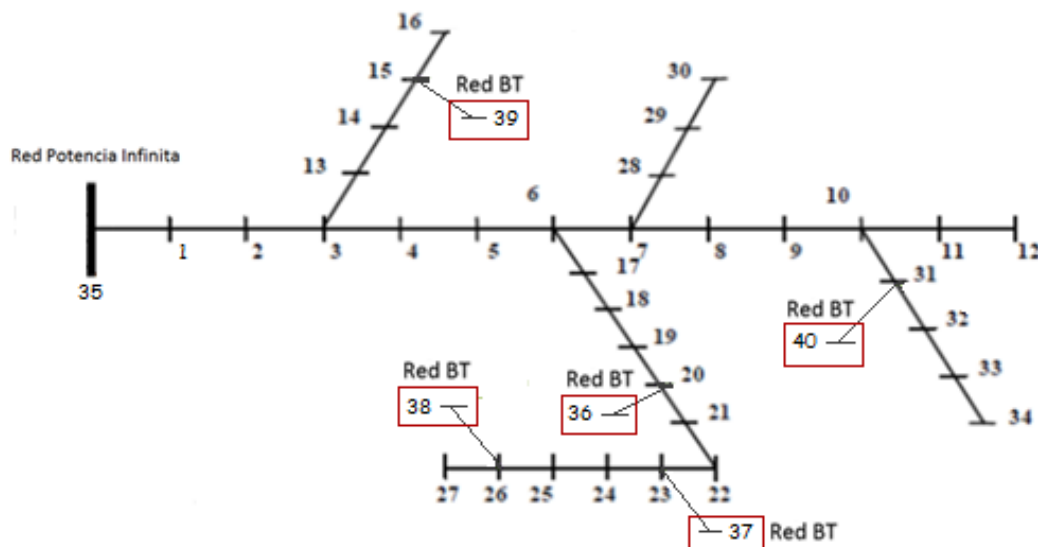


Figura 51. Puntos de conexión de las redes de BT a la red de MT. Fuente propia

Por último, a la red en conjunto se le van a conectar varias unidades generadoras de pequeña potencia que van a trabajar con un factor de potencia de 0,9. Estos nudos de generación van a representar distintas centrales de Régimen Especial, cuyos datos han sido adquiridos del Ministerio de Industria [61], seleccionándose como ejemplo la provincia de Guipúzcoa por su amplia capacidad instalada en este tipo de centrales. En la siguiente tabla se recoge la información de dichas unidades generadoras:

Nudo MT		P <sub>gen</sub> (MW)	Q <sub>gen</sub> (MVar)
21	Biomasa	1,2	0,5808
25	Biomasa	1,2	0,5808
22	Biogás	0,9	0,4356
10	Minihidráulica	4,8	2,3232
<b>Total</b>		<b>8,1</b>	<b>3,9204</b>

Tabla 7. Potencia de los generadores distribuidos. [61]

Por tanto, el reparto de la red por nudos queda distribuido de la siguiente manera:

- Red de potencia infinita – Nudo 35
- Red de MT – Nudos 1 a 34
- Redes de BT – Nudos 36, 37, 38, 39 y 40

Una vez planteado el sistema a analizar faltaría determinar el tipo de día a estudiar. Se va a suponer que los perfiles de demanda a nivel nacional son extrapolables a la red estandarizada de IEEE debido a que no se tienen datos de sus perfiles de consumo. Para ello se escogerá aquel día que presentó mayor demanda en el pasado año 2014. Según se estudió en el Capítulo 4, tuvo lugar el 4 de febrero (invierno laborable) en torno a las 20 horas con un pico de 38.948 MW. Una vez conocido el perfil de consumo del día a estudiar se extrapolaría a la red del sistema teniendo en cuenta la máxima carga como su reparto en la red de 34 nudos de IEEE. Mientras que el perfil de consumo del conjunto de las cinco redes de BT ha sido obtenido de REE [62]. Como resultado se obtendrían la suma de las curvas de demanda horarias de ambas redes, tal y como se representa en la Figura 52:

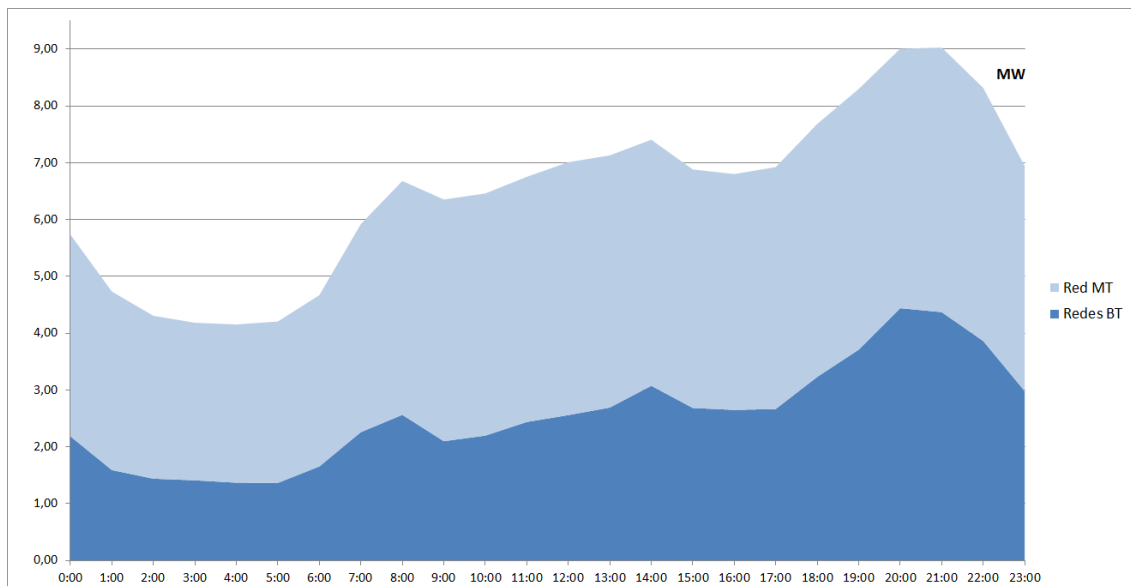


Figura 52. Curvas de carga red MT y BT. Fuente propia

## 7.2 Escenarios de estudio

Durante todo el análisis se plantean diferentes escenarios de estudio en los que se van a tener en cuenta diferentes variables, con el objetivo de determinar las condiciones idóneas en las que se tiene que dar la recarga:

- Porcentaje de penetración del vehículo eléctrico: 20% y 100%
- Estrategia de recarga del vehículo eléctrico: Gestión Inteligente y V2G
- Características de la carga: invierno laborable

Cada combinación de variables dará lugar a un escenario de estudio en el que se tendrá que analizar el impacto del vehículo eléctrico para las 24 horas del día de estudio por medio de la evaluación de los perfiles de tensión y las sobrecargas en las líneas. Los escenarios de estudio son:

- **Escenario 1:** penetración del 20% con GI
- **Escenario 2:** penetración del 20% con GI y V2G
- **Escenario 3:** penetración del 100% con GI
- **Escenario 4:** penetración del 100% con GI y V2G

Para determinar la distribución del número de vehículos eléctricos a recargar de forma horaria, como las horas en las que se realiza V2G, se ha partido de los datos obtenidos en un previo Proyecto Fin de Carrera por medio de la implementación del método de Optimización por enjambre de partículas, o bien PSO (*Particle Swarm Optimization*)[63]. Se ha definido una ciudad con una flota de 3144 vehículos, de los cuales hay un porcentaje de los mismos que son eléctricos y son los que van a demandar ser recargados. Hay que tener en cuenta que la conexión de cada vehículo eléctrico se dará en las redes de BT, representando una carga de 3,7 kW durante una recarga de 3 horas. Por tanto, en función del nivel de penetración, la distribución del número de vehículos a recargar queda de la siguiente manera:

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nº VE	0	187	302	335	343	328	203	62	1	62	61	0
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Nº VE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 8. Distribución nº VE a recargar para una integración del 20% de la flota. [63]**

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nº VE	775	1046	1161	1194	1202	1188	1063	300	95	183	155	75
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Nº VE	6	0	0	40	62	29	249	82	0	0	77	449

**Tabla 9. Distribución nº VE a recargar para una integración del 100% de la flota. [63]**

En cuanto al intercambio de energía con la red, hay que tener en cuenta que se puede realizar siempre y cuando el vehículo esté conectado a la red, pero para este caso se

establece entre las 09:00 y 17:59 horas como tramo horario para realizar V2G, durante el cual la energía es cedida a razón de 2,2 kW:

Hora	9	10	11	12	13	14	15	16	17
V2G (kW)	0	0	0	85	140	266	28	0	48

Tabla 10. Energía cedida mediante V2G para una integración del 20% de la flota. [63]

Hora	9	10	11	12	13	14	15	16	17
V2G (kW)	290	292	290	291	336	461	290	290	291

Tabla 11. Energía cedida mediante V2G para una integración del 100% de la flota. [63]

### 7.3 Resultados

Según las premisas anteriormente planteadas, se ha procedido a obtener los resultados siguientes por medio del software PSS/E (*Power System Simulator for Engineering*), que permite el modelado y simulación de todo sistema de transmisión eléctrica.

#### Perfiles de demanda

Para la obtención de los perfiles de demanda se ha partido de la curva de carga de estudio que resultó de la suma de la red de MT y BT, a la cual se le ha añadido la demanda exigida por los vehículos eléctricos a recargar, como la opción de ceder energía en los casos de estudio con V2G. Los perfiles de consumo para los 4 escenarios son los siguientes:

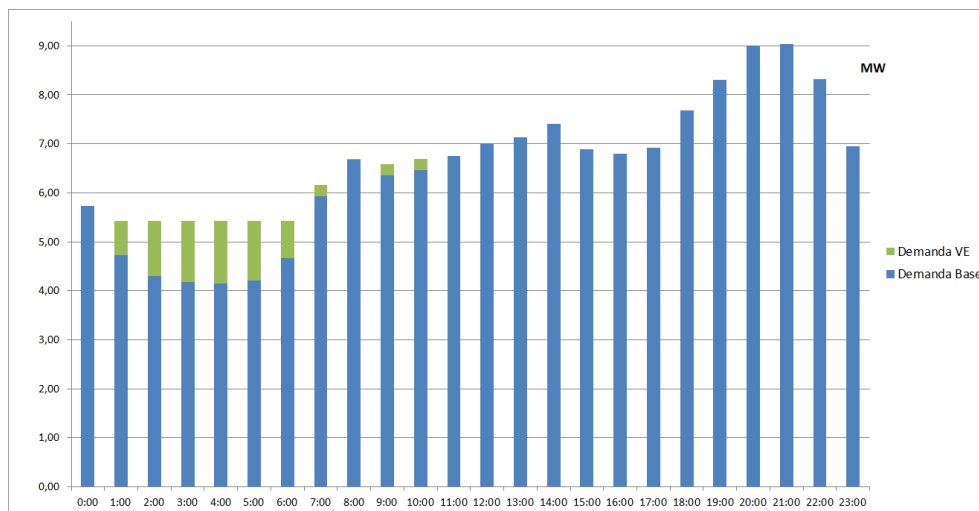


Figura 53. Distribución horaria de potencias demandadas del Escenario 1. Fuente propia



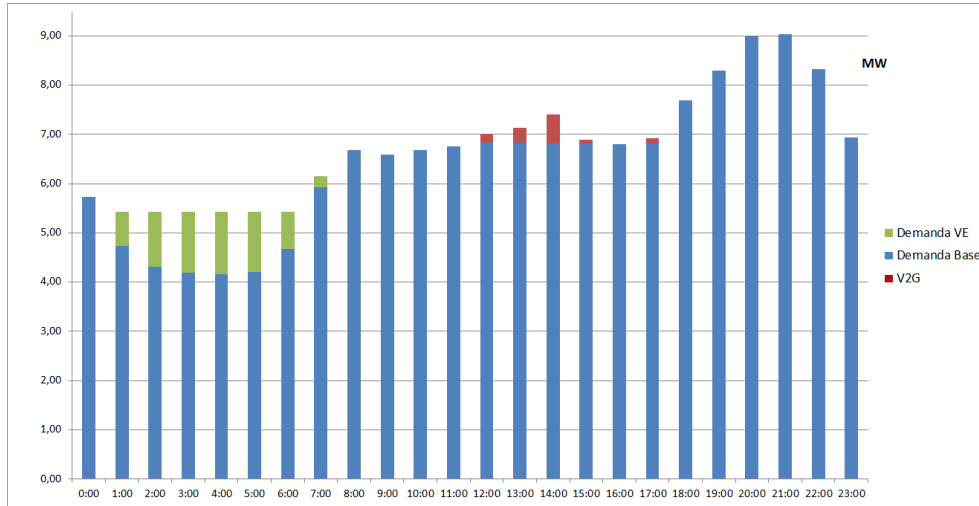


Figura 54. Distribución horaria de potencias demandadas del Escenario 2. Fuente propia

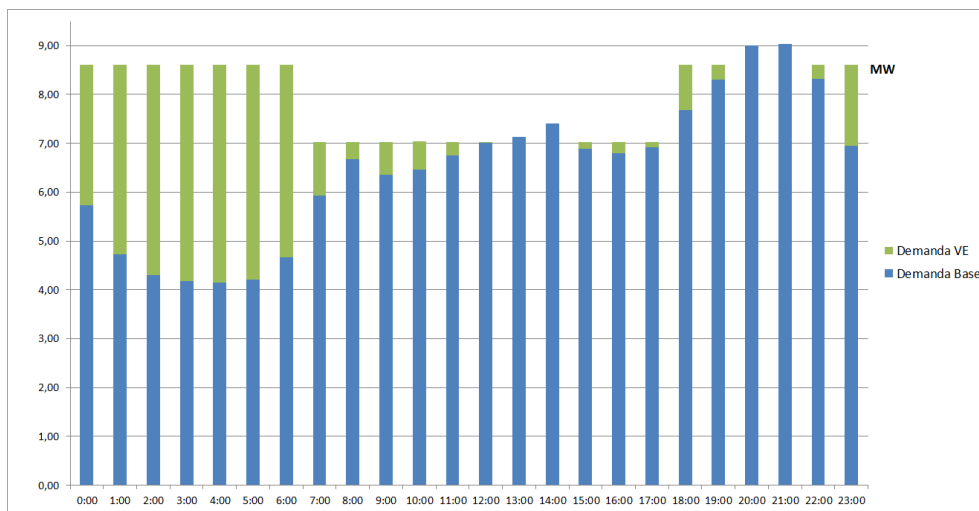


Figura 55. Distribución horaria de potencias demandadas del Escenario 3. Fuente propia

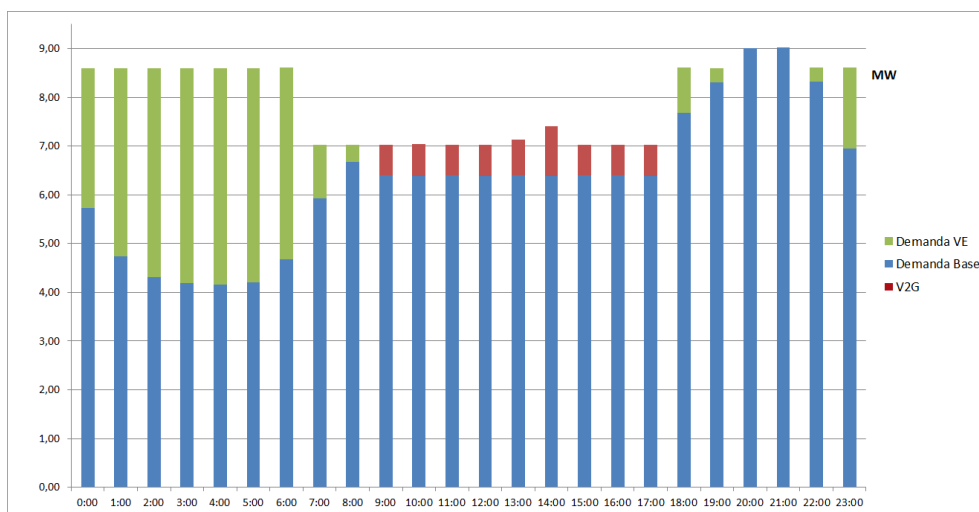


Figura 56. Distribución horaria de potencias demandadas del Escenario 4. Fuente propia

En el caso de un bajo nivel de penetración, se consigue un ligero aplanamiento en la curva de demanda al disponer de menos vehículo eléctricos a integrar y por ello la capacidad para realizar V2G es mínima, tal y como se observa en los Escenarios 1 y 2.

Mientras que para una supuesta integración de toda la flota, se aprecia en la curva del Escenario 3 cómo se incrementa la demanda durante las horas de bajo consumo en las que se integra la demanda de los vehículos eléctricos al no existir ningún tipo de restricción durante su pernoctación. Este hecho beneficiaría en un mayor equilibrio entre los picos de mayor y menor consumo por medio de la gestión inteligente, que distribuye la mayoría de recargas durante los periodos valle para provechar la energía que se vierte durante esas horas (entre las renovables como la energía eólica), consiguiendo así su integración en el sistema.

Se puede observar cómo se denota un salto en la curva de demanda entre las 09:00 y 17:59 en la curva del Escenario 4 al quedar limitado el número de vehículos a recargar al coincidir con la realización de V2G, ya que se debe garantizar al usuario que va a regresar a su domicilio sin ningún obstáculo.

### Perfiles de tensión

En todo sistema eléctrico se desea que su perfil de tensión se aplane en 1 p.u para así obtener el mayor rendimiento durante su operación. A continuación, se muestra cómo repercute la incorporación del vehículo a los niveles de tensión de cada nudo.

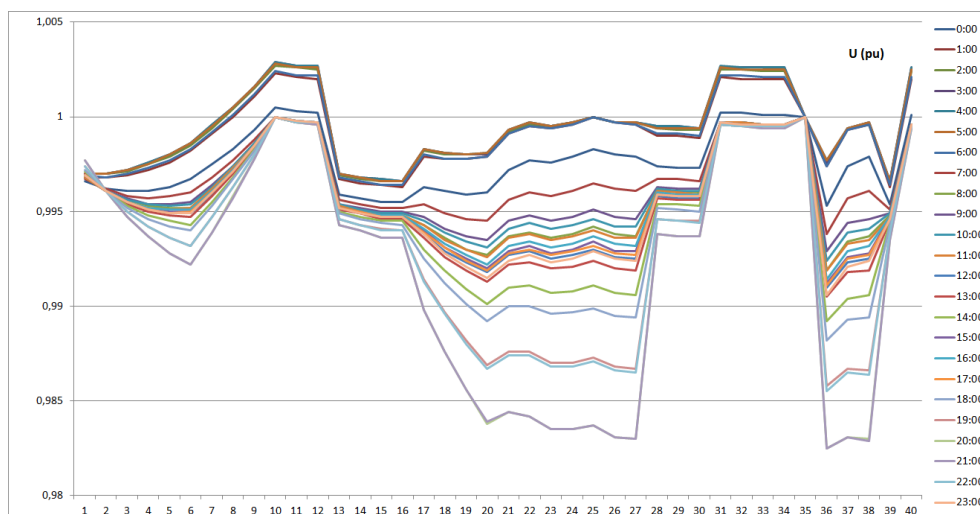


Figura 57. Perfil de tensión horario para cada nudo del Escenario 1. Fuente propia

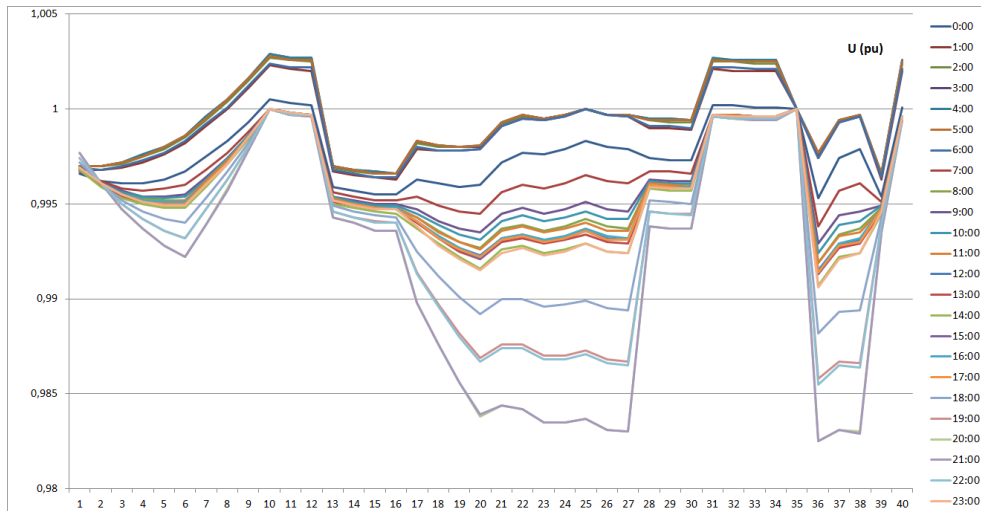


Figura 58. Perfil de tensión horario para cada nudo del Escenario 2. Fuente propia

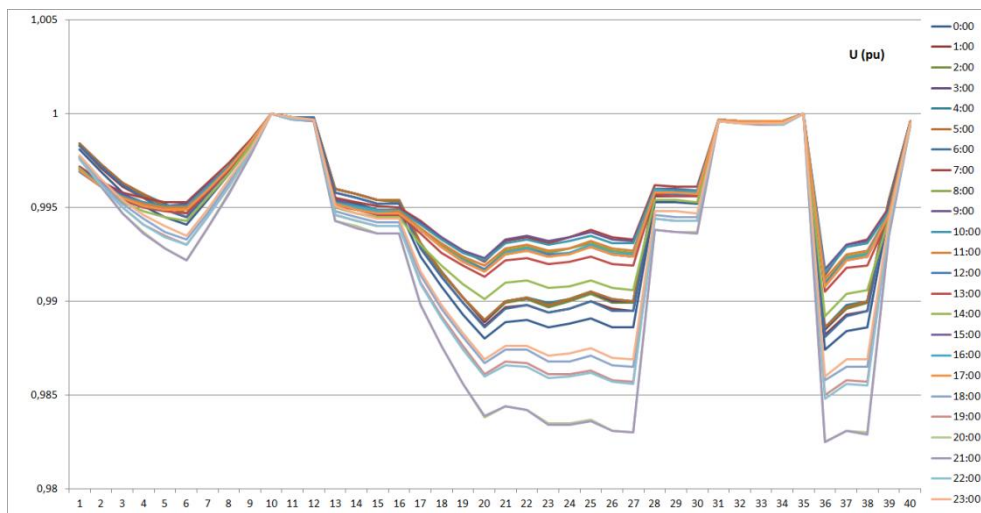


Figura 59. Perfil de tensión horario para cada nudo del Escenario 3. Fuente propia

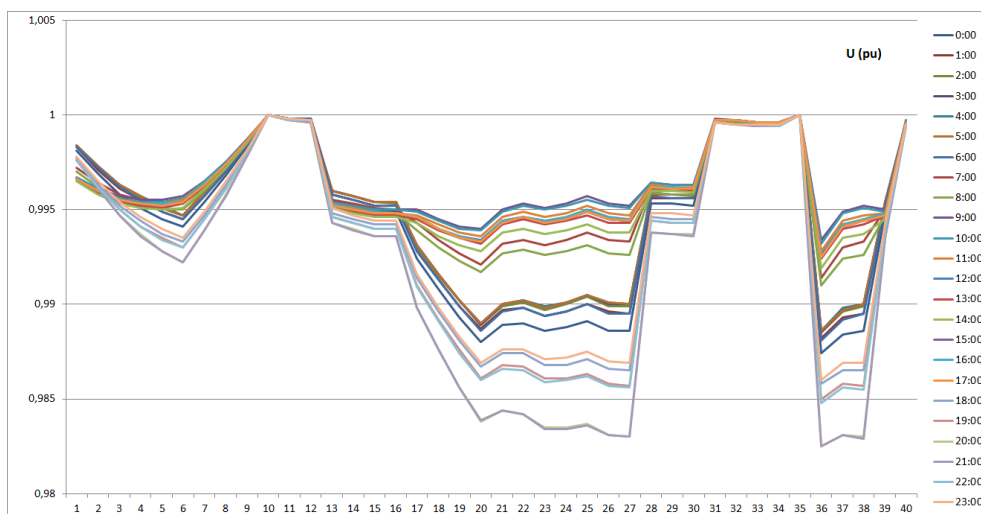


Figura 60. Perfil de tensión horario para cada nudo del Escenario 4. Fuente propia

En cada escenario la tensión sigue un mismo comportamiento, a través del cual se hace notar unos valles en los perfiles horarios de los nudos de BT y, por tanto, en sus respectivos nudos de MT a los que están conectados.

Se puede apreciar como las mayores caídas de tensión se originan en las horas de mayor demanda, comprendidas entre las 19:00 y 22:00. Por consiguiente, la integración de vehículos eléctricos repercute en un descenso durante las horas valle, tal y como se aprecia entre los Escenarios 1 y 3. A pesar de esta caída, se origina una uniformidad en la forma de las curvas de tensión a medida que se integra la demanda de los vehículos eléctricos, aproximando la tensión a 1 p.u. durante las horas en las que se lleva a cabo la realización de V2G.

Para los 4 escenarios, la mayor caída se origina en la red de BT representado por el nudo 36 con una tensión de 0,9825 p.u., la cual permanece dentro de los límites admisibles según lo establecido por la norma (0,93-1,07 p.u.) [64].

### Estado de carga de las líneas

Para estudiar el nivel de sobrecarga de las líneas, se ha procedido previamente a analizar qué línea del sistema es la que se encuentra mayor tiempo cargada. Para su comprobación se ha partido del caso inicial, al que no se ha incorporado la demanda del vehículo eléctrico, y como resultado se obtiene la línea 9-10 con unos niveles de carga comprendidos entre 30 y 43% durante las 24 horas del día. En la siguiente Figura 61 se puede observar la evolución del nivel de carga de dicha línea para los diferentes escenarios respecto al caso inicial.

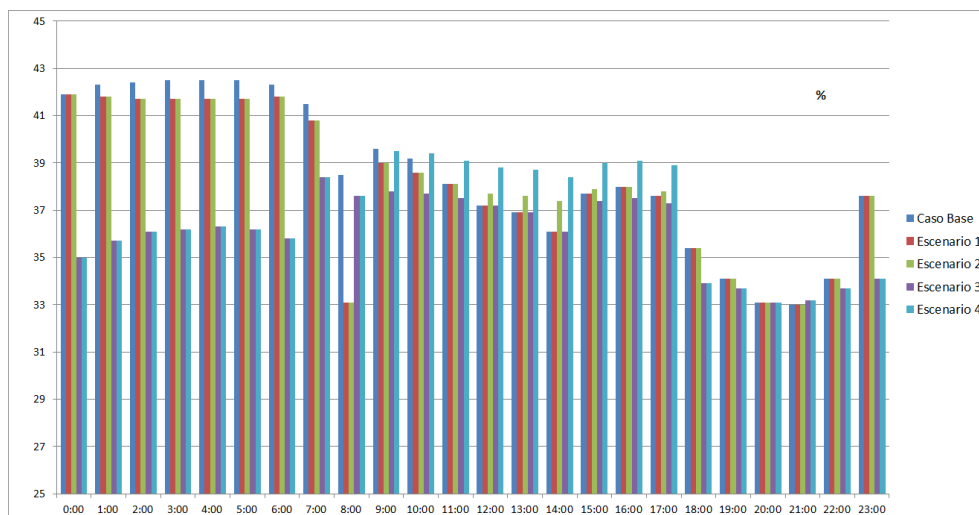


Figura 61. Nivel de sobrecarga de la línea 9-10 en los diferentes escenarios. Fuente propia

Se puede apreciar un menor estado de carga para el Escenario 4 como consecuencia del incremento en la penetración de vehículos eléctricos para reforzar el sistema con su actuación como almacenador de energía, mientras que en las horas centrales se demanda una mayor actividad de la línea al proceder con la cesión de energía a la red. Aun teniendo en cuenta esta leve elevación de carga entre las 9:00 y 17:59, cabe concluir que la línea no llega a alcanzar la sobrecarga del 100% durante las 24 horas del día.



## Conclusiones

El desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado ha permitido analizar e identificar los factores más importantes para llevar a cabo la integración del vehículo eléctrico en los sistemas eléctricos, al igual que evaluar su impacto tras su incorporación.

Para su alcance se precisa disponer de un sistema de almacenamiento que permita grandes autonomías. Ante esta necesidad, se plantean las baterías recargables como la mejor solución por su madurez tecnológica y sus continuas mejoras en tamaño y peso. Una vez agotada su energía, estas baterías precisan ser recargadas por medio de una infraestructura que permita su conexión a la red, ya que se trata de la modalidad de recarga de uso más extendida. Aspectos como el tiempo de recarga, cuándo y dónde se lleve a cabo son fundamentales en la gestión del sistema eléctrico. De esta forma, se debe concienciar socialmente que una recarga lenta durante las horas valle se presenta como la mejor solución desde el punto de vista del usuario, como del gestor de la red eléctrica.

Por consiguiente, el desarrollo de las Smart Grids permitiría una continua y efectiva integración del vehículo eléctrico en el sistema eléctrico gracias a una gestión inteligente de las recargas, sin necesidad de invertir en sistemas de generación y redes de transporte. La implementación de las redes inteligentes facilitaría una mejor integración de las energías renovables al emplearse la producción energética sobrante, como ocurre con la energía eólica, para recargar los vehículos eléctricos durante las horas valle y evitar su vertido a la red. Con ello, se conseguiría reportar beneficios al sistema eléctrico por medio de un aplanamiento en la curva de carga, como al usuario al obtenerse precios más competitivos para la recarga del vehículo. Gracias a estas redes, se incrementaría la eficiencia en la operatividad del sistema eléctrico al predecir las necesidades de generación y demanda con mayor exactitud, consiguiendo así una optimización en el consumo de los vehículos eléctricos, al igual que actuarían como respaldo de la red durante los picos de mayor demanda al facilitar una energía acumulada por medio del V2G.

Una vez realizado el impacto del vehículo eléctrico, cabe decir que su análisis ha permitido dar a conocer su incidencia sobre un sistema de potencia, el cual sirve de planteamiento para poder llevarse a cabo a gran escala, como en el actual sistema eléctrico. Tras una progresiva integración del vehículo eléctrico, se han obtenido unos perfiles de tensión uniformes dentro de los límites de operatividad sin ocasionar una sobrecarga del sistema, al igual que se ha comprobado la obtención de un aplanamiento en la curva de demanda.

Por tanto, tras los objetivos alcanzados, se puede concluir que el vehículo eléctrico es una opción de futuro en los sistemas eléctricos.



## Bibliografía

- [1]J. Costas. “Historia de los coches eléctricos”, motorpasion futuro, 2010 [en línea]. Disponible en: <http://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-de-los-coches-electricos> [última consulta: 24 noviembre 2014]
- [2]D. Feijoo. “Historia de los coches eléctricos. Los orígenes”, Europcar, 2014 [en línea]. Disponible en: <http://blog.europcar.es/2014/02/05/historia-de-los-coches-electricos-i-los-origenes/> [última consulta: 24 noviembre 2014]
- [3]R. Estévez. “El primer coche de la historia fue eléctrico”, eco inteligencia, 2011 [en línea]. Disponible en: <http://www.ecointeligencia.com/2011/09/el-primer-coche-de-la-historia-fue-electrico/> [última consulta: 24 noviembre 2014]
- [4]M. Bellis. “History of Electric Vehicles”, Inventors about, 2014 [en línea]. Disponible en: <http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/History-Of-Electric-Vehicles.htm> [última consulta: 25 noviembre 2014]
- [5]J. Gil. “Hitos del vehículo híbrido y eléctrico”, Híbridos y Eléctricos, 2012 [en línea]. Disponible en: <http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/hitos-del-vehiculo-hbrido-y-elctrico/20100510091152002208.html> [última consulta: 25 noviembre 2014]
- [6]J. Camós. “California contraataca: nuevo paquete de medidas para impulsar el uso de vehículos con menos emisiones”, motorpasion futuro, 2011 [en línea]. Disponible en: <http://www.motorpasionfuturo.com/industria/california-contraataca-nuevo-paquete-de-medidas-para-impulsar-el-uso-de-vehiculos-con-menos-emisiones> [última consulta: 25 noviembre 2014]
- [7]Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid, “Retos para la implantación del Vehículo Eléctrico” [en línea]. Disponible en: [http://www.coiim.es/revista/Articulos/48\\_Art07.aspx](http://www.coiim.es/revista/Articulos/48_Art07.aspx) [última consulta: 27 noviembre 2014]
- [8]Endesa, “Vehículo eléctrico” [en línea]. Disponible en: <https://www.endsavehiculoelectrico.com/vehiculo-electrico/el-vehiculo/tipos> [última consulta: 27 noviembre 2014]
- [9]Aficionados a la Mecánica, “Vehículos híbridos” [en línea]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos.htm> [última consulta: 27 noviembre 2014]
- [10]Energía y Realidad, “¿Qué es un vehículo híbrido?” [en línea]. Disponible en: <http://energiayrealidad.blogspot.com.es/2013/11/que-es-un-vehiculo-hibrido.html> [última consulta: 30 noviembre 2014]



- [11]Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico, “Redes V2G” [en línea]. Disponible en: <http://www.evwind.com/sobre-el-vehiculo-electrico/redes-v2g/> [última consulta: 30 noviembre 2014]
- [12]Battery University, “Batteries against Fossil Fuel” [en línea]. Disponible en: <http://batteryuniversity.com/learn/article/batteries-against-fossil-fuel> [última consulta: 01 diciembre 2014]
- [13]Energía y sociedad, “El vehículo eléctrico. ¿Por qué el vehículo eléctrico?” [en línea]. Disponible en: <http://www.energiaysociedad.es/ficha/4-1-por-que-el-vehiculo-electrico> [última consulta: 1 diciembre 2014]
- [14]Endesa, “Vehículo eléctrico” [en línea]. Disponible en: <https://www.endsavehiculoelectrico.com/vehiculo-electrico/beneficios/emisiones-co2> [última consulta: 4 diciembre 2014]
- [15]Endesa, “Vehículo eléctrico” [en línea]. Disponible en: <https://www.endsavehiculoelectrico.com/vehiculo-electrico/beneficios/economicos> [última consulta: 4 diciembre 2014]
- [16]A. Moltó y M. Ordiales. “El vehículo eléctrico. Visión del operador del sistema”, Red Eléctrica de España, 2011 [en línea]. Disponible en: <http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/genera2011.pdf> [última consulta: 12 febrero 2015]
- [17]Red Eléctrica de España, “Almacenamiento energético” [en línea]. Disponible en: <http://www.ree.es/es/red21/almacenamiento-energetico> [última consulta: 08 diciembre 2014]
- [18]Electropaedia, “Alternative Energy Storage Methods” [en línea]. Disponible en: <http://www.mpoweruk.com/alternatives.htm> [última consulta: 8 diciembre 2014]
- [19]Motorpasion futuro, “Cómo funciona una batería” [en línea]. Disponible en: <http://www.motorpasionfuturo.com/industria/como-funciona-una-bateria> [última consulta: 10 diciembre 2014]
- [20]Battery University, “Can the Lead-acid Battery Compete in Modern Times?” [en línea]. Disponible en: <http://batteryuniversity.com/learn/article/can-the-lead-acid-battery-compete-in-modern-times> [última consulta: 10 diciembre 2014]
- [21]Electropaedia, “Nickel Cadmium Batteries” [en línea]. Disponible en: <http://www.mpoweruk.com/nicad.htm> [última consulta: 13 diciembre 2014]
- [22]Electropaedia, “Nickel Metal Hydride Batteries” [en línea]. Disponible en: <http://www.mpoweruk.com/nimh.htm> [última consulta: 13 diciembre 2014]
- [23]Battery University, “Is Lithium-ion the Ideal Battery?” [en línea]. Disponible en: <http://batteryuniversity.com/learn/article/is-lithium-ion-the-ideal-battery> [última consulta: 15 diciembre 2014]





- [24] Recharge, “Other Battery Technologies” [en línea]. Disponible en: <http://www.rechargebatteries.org/knowledge-base/batteries/other-technologies/> [última consulta: 15 diciembre 2014]
- [25] Batteries, “Chemistry Comparison” [en línea]. Disponible en: <http://www.buchmann.ca/chap2-page2.asp> [última consulta: 15 diciembre 2014]
- [26] Wikipedia, “Electric double-layer capacitor” [en línea]. Disponible en: [http://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_double-layer\\_capacitor](http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_double-layer_capacitor) [última consulta: 17 diciembre 2014]
- [27] Battery University, “How does a Supercapacitor Work?” [en línea]. Disponible en: [http://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_role\\_of\\_the\\_supercapacitor](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor) [última consulta: 17 diciembre 2014]
- [28] P. Ibáñez. “El supercondensador de grafeno, o cómo tener un coche eléctrico que se recargue en unos minutos”, motorpasion futuro [en línea]. Disponible en: <http://www.motorpasionfuturo.com/industria/el-supercondensador-de-grafeno> [última consulta: 17 diciembre 2014]
- [29] Universidad de Zaragoza, “Pilas de combustible: La Energía del Futuro” [en línea]. Disponible en: <http://www.unizar.es/icma/divulgacion/celdascomb.html> [última consulta: 20 diciembre 2014]
- [30] Fuel Cell Today, “About fuel cells. Benefits” [en línea]. Disponible en: <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/benefits> [última consulta: 20 diciembre 2014]
- [31] Centro Nacional del Hidrógeno, “Pilas de combustible” [en línea]. Disponible en: <http://www.cnh2.es/info-h2/pilas-de-combustible/> [última consulta: 22 diciembre 2014]
- [32] P. Asensio. “Hidrógeno y pila de combustible”, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid [en línea]. Disponible en: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-para-todos-hidrogeno-y-pila-de-combustible.pdf> [última consulta: 22 diciembre 2014]
- [33] Red Eléctrica de España, “Esquema básico del sistema eléctrico” [en línea]. Disponible en: [http://www.ree.es/sites/default/files/esquema\\_basico.pdf](http://www.ree.es/sites/default/files/esquema_basico.pdf) [última consulta: 12 enero 2015]
- [34] J. González. “España tiene 107.615 MW de potencia eléctrica y solo necesita la mitad”, ABC, 2013 [en línea]. Disponible en: <http://www.abc.es/economia/20131021/abci-espana-tiene-potencia-electrica-201310211202.html> [última consulta: 12 enero 2015]
- [35] Red Eléctrica de España, “El sistema eléctrico español. Avance del informe” [en línea]. Disponible en: [http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance\\_informe\\_sistema\\_electrico\\_2014b.pdf](http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_electrico_2014b.pdf) [última consulta: 12 enero 2015]
- [36] Endesa, “Régimen especial” [en línea]. Disponible en: [http://www.endesadistribucion.es/es/oficinaOnline/RegimenEspecial/Paginas/regimene\\_special.aspx](http://www.endesadistribucion.es/es/oficinaOnline/RegimenEspecial/Paginas/regimene_special.aspx) [última consulta: 16 enero 2015]





- [37] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, “El Gobierno suspende de forma temporal las primas de nuevas instalaciones de régimen especial” [en línea]. Disponible en: <http://www.idae.es/index.php/relcategoria.121/id.187/mod.noticias/mem.detalle> [última consulta: 18 enero 2015]
- [38] R. Esteller. “Iberdrola presiona para cerrar el primer ciclo combinado de gas en España”, *el Economista*, 2014 [en línea]. Disponible en: <http://www.economista.es/energia/noticias/6266204/11/14/Iberdrola-presiona-para-cerrar-el-primer-ciclo-combinado-de-gas-en-Espana.html#.Kku8lAEUCQrZ5y9> [última consulta: 18 enero 2015]
- [39] Energía y sociedad, “Actividades reguladas en el sector eléctrico. Distribución” [en línea]. Disponible en: <http://www.energiaysociedad.es/ficha/4-3-distribucion> [última consulta: 21 enero 2015]
- [40] Red Eléctrica de España, “Demanda y producción en tiempo real” [en línea]. Disponible en: <http://www.ree.es/es/actividades/demanda-y-produccion-en-tiempo-real> [última consulta: 24 enero 2015]
- [41] Red Eléctrica de España, “Operación del sistema. Gestión de demanda” [en línea]. Disponible en: <http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema/gestion-de-demanda> [última consulta: 26 enero 2015]
- [42] Smartgridsinfo, “Certificación de seguridad de las redes inteligentes en Europa” [en línea]. Disponible en: <https://www.smartgridsinfo.es/articulos/certificacion-de-seguridad-de-las-redes-inteligentes-en-europa> [última consulta: 2 febrero 2015]
- [43] Red Eléctrica de España, “¿Qué son las Smartgrid?” [en línea]. Disponible en: <http://www.ree.es/es/red21/redes-inteligentes/que-son-las-smartgrid> [última consulta: 04 febrero 2015]
- [44] A. Silos. “Smart Grid: El paso inicial para la integración del vehículo eléctrico en la red”, *Voltimum*, 2013 [en línea]. Disponible en: <http://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/smart-grid-paso-inicial-integracion-del-vehiculo-electrico-red> [última consulta: 09 febrero 2015]
- [45] Red Eléctrica de España, “Red Eléctrica apuesta por el vehículo eléctrico”, 2010 [en línea]. Disponible en: [http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/vehic\\_elect.pdf](http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/vehic_elect.pdf) [última consulta: 12 febrero 2015]
- [46] Movele, “Puntos de Recarga Públicos” [en línea]. Disponible en: <http://www.movele.es/index.php/mod.puntos/mem.mapa/reلمenu.20> [última consulta: 23 febrero 2015]
- [47] Movele, “Se ha publicado la ITC BT52” [en línea]. Disponible en: <http://www.movele.es/index.php/mod.noticias/mem.detalle/idnoticias.93/relcategoria.206/reلمenu.7> [última consulta: 23 febrero 2015]
- [48] Movele, “Análisis e identificación de la información a registrar en el sistema de recarga para el vehículo eléctrico y de los procesos TIC asociados” [en línea]. Disponible en:



[http://www.movele.es/uploads/documentos/documentos\\_Analisis\\_e\\_identificacion\\_de\\_la\\_informacion\\_a\\_registrar\\_en\\_el\\_sistema\\_de\\_recarga\\_para\\_el\\_vehiculo\\_electrico\\_y\\_de\\_los\\_procesos\\_TIC\\_asociados\\_v4\\_2\\_bf486c94.pdf](http://www.movele.es/uploads/documentos/documentos_Analisis_e_identificacion_de_la_informacion_a_registrar_en_el_sistema_de_recarga_para_el_vehiculo_electrico_y_de_los_procesos_TIC_asociados_v4_2_bf486c94.pdf) [última consulta: 26 febrero 2015]

[49]Ingeteam, “Estación de Carga de VE” [en línea]. Disponible en: [http://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Producto/Documento/PRD\\_232\\_Archivo\\_116bb04d-4cf0-440e-b0df-14e96ccceed.pdf](http://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Producto/Documento/PRD_232_Archivo_116bb04d-4cf0-440e-b0df-14e96ccceed.pdf) [última consulta: 2 marzo 2015]

[50]Urbener, “Modos de carga” [en línea]. Disponible en: <http://www.urbener.com/recarga-vehiculos-electricos/modos-de-carga/> [última consulta: 10 marzo 2015]

[51]Fundación Asturiana de la Energía, “Recarga del Vehículo Eléctrico” [en línea]. Disponible en: [http://www.faen.es/batterie/Recarga\\_vehiculo\\_electrico.pdf](http://www.faen.es/batterie/Recarga_vehiculo_electrico.pdf) [última consulta: 12 marzo 2015]

[52]Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico, “Tecnalia desarrolla un sistema de recarga inalámbrica para el vehículo eléctrico”, 2012 [en línea]. Disponible en: <http://www.evwind.com/2012/11/21/tecnalia-desarrolla-un-sistema-de-recarga-inalambrica-para-el-vehiculo-electrico/> [última consulta: 17 marzo 2015]

[53]D. Clavero. “Better Place: muy cerca de la bancarrota y el cese de su actividad”, diariomotor, 2013 [en línea]. Disponible en: <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2013/05/26/better-place-muy-cerca-de-la-bancarrota-y-el-cese-de-su-actividad/> [última consulta: 21 marzo 2015]

[54]Green Car Reports, “Standardized Electric-Car Battery Swapping Won't Happen: Here's Why” [en línea]. Disponible en: [http://www.greencarreports.com/news/1090933\\_standardized-electric-car-battery-swapping-wont-happen-heres-why](http://www.greencarreports.com/news/1090933_standardized-electric-car-battery-swapping-wont-happen-heres-why) [última consulta: 21 marzo 2015]

[55]G. García. “Tesla inaugura su programa de intercambio de baterías”, movilidadelectrica, 2014 [en línea]. Disponible en: <http://www.movilidadelectrica.com/index.php/infraestructura-de-recarga/baterias/1303-tesla-intercambio-baterias> [última consulta: 23 marzo 2015]

[56]Proyecto VERDE [en línea]. Disponible en: <http://cenitverde.ctm.com.es/> [última consulta: 06 abril 2015]

[57]Instituto Universitario de Investigación del Automóvil, “Proyecto TECMUSA” [en línea]. Disponible en: <http://insia-upm.es/portfolio-items/proyecto-tecmusa/> [última consulta: 06 abril 2015]

[58]Proyecto ELVIRE [en línea]. Disponible en: <http://www.elvire.eu/?-Project-> [última consulta: 09 abril 2015]

[59]Endesa, “El proyecto Zem2All recorre tres millones de kilómetros con cero emisiones”, 2015 [en línea]. Disponible en: <http://www.endesa.com/ES/SALADEPRENSA/NOTICIAS/Zem2All-tres-millones-kilometros-cero-emisiones> [última consulta: 09 abril 2015]



- [60]IEEE PES, “Distribution Test Feeders” [en línea]. Disponible en: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/> [última consulta: 27 abril 2015]
- [61]Ministerio de Industria, Energía y Turismo [en línea]. Disponible en: <http://www.minetur.gob.es/> [última consulta: 27 abril 2015]
- [62]Red Eléctrica de España, “Operación del sistema. Medidas eléctricas” [en línea]. Disponible en: <http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema/medidas-electricas> [última consulta: 30 abril 2015]
- [63]Proyecto Fin de Carrera: “Gestión de demanda en una Smart-Grid con vehículos eléctricos”, Sergio Bertolín Corisco. Universidad Carlos III de Madrid, 2014
- [64]UNE 21301-1991. “Tensiones nominales de las redes eléctricas de distribución pública de baja tensión”

## Anexo

### A1. Catálogo de vehículos híbridos enchufables

Fabricante	Modelo	Características
Audi	Sportback e-tron	<a href="http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/audi/sportback-e-tron">http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/audi/sportback-e-tron</a>
BMW	i8	<a href="http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/bmw/i8">http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/bmw/i8</a>
Ford	C-MAX Energi	<a href="http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/ford/c-max-energi">http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/ford/c-max-energi</a>
Mitsubishi	Outlander PHEV	<a href="http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/mitsubishi/outlander-phev">http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/mitsubishi/outlander-phev</a>
Porsche	Panamera S E-Hybrid	<a href="http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/porsche/panamera-s-e-hybrid">http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/porsche/panamera-s-e-hybrid</a>
Toyota	Prius plug-in hybrid	<a href="http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/toyota/prius-plug-in-hybrid">http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/toyota/prius-plug-in-hybrid</a>
Volkswagen	Golf GTE	<a href="http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/volkswagen/golf-gte">http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/volkswagen/golf-gte</a>
	Passat GTE	<a href="http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/volkswagen/passat-gte">http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/volkswagen/passat-gte</a>
Volvo	V60 Plug-in Hybrid	<a href="http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/volvo/V60">http://www.electromaps.com/hibridos-enchufables/volvo/V60</a>

Tabla 12. Fabricantes y características de vehículos híbridos enchufables.

### A2. Catálogo de vehículos eléctricos

Fabricante	Modelo	Características
Aixam	Mega e-City	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/aixam/mega-e-city">http://www.electromaps.com/coches-electricos/aixam/mega-e-city</a>
BMW	i3	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/bmw/i3">http://www.electromaps.com/coches-electricos/bmw/i3</a>
BYD	E6	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/byd/e6">http://www.electromaps.com/coches-electricos/byd/e6</a>
Chevrolet	Volt	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/chevrolet/volt">http://www.electromaps.com/coches-electricos/chevrolet/volt</a>
Citroën	Berlingo Electric	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/citroen/berlingo-electric">http://www.electromaps.com/coches-electricos/citroen/berlingo-electric</a>
	C-Zero	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/citroen/c-zero">http://www.electromaps.com/coches-electricos/citroen/c-zero</a>
Eve	M1.lle	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/Eve/m1-lle">http://www.electromaps.com/coches-electricos/Eve/m1-lle</a>
Ford	Focus Electric	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/ford/focus-electric">http://www.electromaps.com/coches-electricos/ford/focus-electric</a>
KIA	Soul EV	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/kia/soul-ev">http://www.electromaps.com/coches-electricos/kia/soul-ev</a>
Mahindra Reva	REVAi	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/mahindra-reva/REVAi">http://www.electromaps.com/coches-electricos/mahindra-reva/REVAi</a>
Mercedes-Benz	Clase B ED	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/mercedes-benz/clase-b-ed">http://www.electromaps.com/coches-electricos/mercedes-benz/clase-b-ed</a>
	SLS AMG Electric Drive	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/mercedes-benz/sls-amg">http://www.electromaps.com/coches-electricos/mercedes-benz/sls-amg</a>



		electric-drive
Mitsubishi	i-MiEV	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/mitsubishi/miev">http://www.electromaps.com/coches-electricos/mitsubishi/miev</a>
Nissan	e-NV200	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/nissan/e-nv200">http://www.electromaps.com/coches-electricos/nissan/e-nv200</a>
	Leaf	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/nissan/leaf">http://www.electromaps.com/coches-electricos/nissan/leaf</a>
Opel	Ampera	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/opel/ampera">http://www.electromaps.com/coches-electricos/opel/ampera</a>
Peugeot	iOn	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/peugeot/ion">http://www.electromaps.com/coches-electricos/peugeot/ion</a>
	Partner Electric	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/peugeot/partner-electric">http://www.electromaps.com/coches-electricos/peugeot/partner-electric</a>
Renault	Fluence Z.E	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/renault/fluence-ze">http://www.electromaps.com/coches-electricos/renault/fluence-ze</a>
	Kangoo Z.E	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/renault/kangoo-ze">http://www.electromaps.com/coches-electricos/renault/kangoo-ze</a>
	Twizy	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/renault/twizy">http://www.electromaps.com/coches-electricos/renault/twizy</a>
	Zoe	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/renault/zoe">http://www.electromaps.com/coches-electricos/renault/zoe</a>
Smart	Fortwo electric drive	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/smart/smart-fortwo-electric-drive">http://www.electromaps.com/coches-electricos/smart/smart-fortwo-electric-drive</a>
Tazzari	Zero Classic	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/tazzari/zero-classic">http://www.electromaps.com/coches-electricos/tazzari/zero-classic</a>
	Zero Evo	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/tazzari/zero-evo">http://www.electromaps.com/coches-electricos/tazzari/zero-evo</a>
Tesla	Model S	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/tesla/model-s">http://www.electromaps.com/coches-electricos/tesla/model-s</a>
	Roadster	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/tesla/roadster">http://www.electromaps.com/coches-electricos/tesla/roadster</a>
Think	Think City	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/think/think-city">http://www.electromaps.com/coches-electricos/think/think-city</a>
Twike	Active	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/twike/active">http://www.electromaps.com/coches-electricos/twike/active</a>
Volkswagen	e-Golf	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/volkswagen/e-golf">http://www.electromaps.com/coches-electricos/volkswagen/e-golf</a>
	e-UP	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/volkswagen/e-up">http://www.electromaps.com/coches-electricos/volkswagen/e-up</a>
Zytel	Cuatro	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/zytel/cuatro">http://www.electromaps.com/coches-electricos/zytel/cuatro</a>
	Gorila EV	<a href="http://www.electromaps.com/coches-electricos/zytel/gorila-ev">http://www.electromaps.com/coches-electricos/zytel/gorila-ev</a>

Tabla 13. Fabricantes y características de vehículos eléctricos.