

Vicente Torres Sanz

Mejora del proceso de carga en vehículos eléctricos

Departamento
Informática e Ingeniería de Sistemas

Director/es
MARTÍNEZ DOMÍNGUEZ, FRANCISCO
JOSÉ
SANGÜESA ESCORIHUELA, JULIO A.

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Reconocimiento – NoComercial – SinObraDerivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606

Tesis Doctoral

MEJORA DEL PROCESO DE CARGA EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Autor

Vicente Torres Sanz

Director/es

MARTÍNEZ DOMÍNGUEZ, FRANCISCO JOSÉ
SANGÜESA ESCORIHUELA, JULIO A.

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Informática e Ingeniería de Sistemas

2018

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E INGENIERÍA
DE SISTEMAS

Mejora del proceso de carga en vehículos eléctricos

Tesis presentada para la obtención
del título de Doctor en Informática

Vicente Torres Sanz

Directores:

Dr. Francisco J. Martínez Domínguez

Dr. Julio A. Sangüesa Escorihuela

Teruel, Junio 2018

A mi familia, por su paciencia y apoyo.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer al Dr. Francisco Martínez, al Dr. Julio Sangüesa y a la Dr. Piedad Garrido por su apoyo y supervisión en la realización de esta Tesis. Después de finalizar mis títulos de grado y postgrado llegó el temido momento en el que debes de decidir qué camino elegir, salir fuera, echar curriculums y esperar. Momentos de dudas e incertidumbre. Entonces me ofrecieron la posibilidad de realizar la tesis doctoral en el seno del grupo Intelligent Networks and Information Technologies (iNiT), perteneciente a la Universidad de Zaragoza, una idea, los Vehículos Eléctricos y un camino por recorrer. Sin duda su orientación continua y valiosos consejos han contribuido fuertemente a la calidad de este trabajo y me ha enriquecido desde aspectos profesionales y personales.

Me gustaría agradecer de manera especial al Dr. Juan Carlos Cano, al Dr. Carlos T. Calafate y al Dr. Pietro Manzoni por su contribución en la realización de esta Tesis. Personas que han contribuido a mi crecimiento y al del grupo iNiT de manera desinteresada.

Estos años en el seno del grupo iNiT han sido sin duda una gran experiencia, y todas las horas juntos, trabajando codo con codo, han hecho que se conviertan en una segunda familia. Puedo decir que me siento orgulloso de haber pertenecido y luchado por esta familia. Las interesantes conversaciones, todas las horas que hemos pasado juntos, las actividades gastronómicas... siento que me han hecho evolucionar, no sólo como investigador, sino también como persona. Siempre les estaré agradecido por su contribución y ayuda en la realización de esta Tesis, y guiarme en lo personal.

Finalmente me gustaría agradecer a mis padres por toda su ayuda, comprensión y soporte. Siempre me han hecho ver que hay una meta que superar, y sin ellos no habría llegado hasta donde lo estoy haciendo.

Vicente Torres Sanz
Teruel, Junio 2018

Abstract

The transportation sector is, by far, one of the largest consumers of energy, which mostly comes from the combustion of petroleum products, with the consequent emission of greenhouse gases. This is causing the increasing levels of contamination (highly harmful for humans health), especially in the cities, and forcing the authorities to take restrictive measures to control the traffic of traditional vehicles in cities downtowns, or even prohibiting it. As a solution to this problem, the concept of electromobility, or the ability to use means of transport that rely on technologies based on electricity, has emerged, and the electric vehicle comes out as a key factor. Sales of these types of vehicles are increasing year after year, as they are beginning to represent an attractive option for many drivers.

The combination of Electric Vehicles, with information and communication technologies (ICT) and the Internet of Things (IoT), will be of great importance in future Smart Cities. One objective of this kind of cities will be the efficient use of energy, since meeting the high electricity demand that these vehicles are going to require of the electric transport network, is a challenge that we will have to face.

In the present work, we have proposed an architecture that facilitates the orderly recharging of vehicles and allows the estimation of the necessary energy in advance. We have implemented a simulator for recharging electric vehicles, which allows simulating a large number of vehicles, taking into account both the specific characteristics of these vehicles and the actual electricity rates in Spain.

In addition, new recharging methods based on a decentralized solution and using the Internet of Things, have been proposed, with the purpose of maximizing the charging level, while highly reducing the cost of recharges. More specifically, four new methods have been proposed: the Cheapest (C), the Cheapest Starting (CS), the Low Cost (LC), and the Last Period (LP), as an alternative to the traditional Plug&Charge method. These methods allow an electricity cost reduction from up to 75.2%.

Finally, as proof of concept, a smart plug, which allows the efficient recharging of electric vehicles, has been proposed. This plug combines hardware technology with the charging methods created during the realization of this doctoral thesis, offering several ways of recharging so that users can choose the one that best suits their requirements.

Resumen

El sector del transporte es uno de los mayores consumidores de energía, que en la práctica totalidad proviene de la combustión de los derivados del petróleo, con la consiguiente emisión de gases de efecto invernadero. Esto está provocando que en las ciudades aumenten los niveles de contaminación, llegando a ser en muchos casos altamente nocivos para la salud, y obligando a que las autoridades tengan que tomar medidas restrictivas, controlando el tráfico de vehículos de combustión en el centro de las ciudades, o incluso llegándolo a prohibir. Como solución a este problema nace un concepto, la electromovilidad, o la capacidad de utilizar medios de transporte que usan tecnologías basadas en la electricidad, siendo el vehículo eléctrico su mayor referente. Las ventas de este tipo de vehículos están aumentando año tras año, ya que están comenzando a representar una opción atractiva para muchos conductores.

La combinación de Vehículos Eléctricos, con las tecnologías de la información (TIC) y el Internet de las cosas (IoT) será de gran importancia en las Smart Cities. Un objetivo de este tipo de ciudades será el uso eficiente de la energía, ya que satisfacer la gran demanda eléctrica en la red de transporte eléctrico que puede provocar estos vehículos es un reto al que nos tendremos que enfrentar.

En el presente trabajo, hemos propuesto una arquitectura que facilita la recarga ordenada de los vehículos y la estimación de la energía necesaria con cierta antelación. Hemos implementado un simulador de recarga de vehículos eléctricos, que permite simular un gran número de vehículos, teniendo en cuenta tanto las características específicas de los mismos, como las tarifas reales de la electricidad en España.

Además, se han propuesto nuevos métodos de recarga, con el propósito de maximizar el nivel de carga, reduciendo al máximo el coste de las recargas, basándonos en una solución descentralizada y haciendo uso del Internet de las Cosas. En concreto, se han propuesto cuatro nuevos métodos: (Cheapest (C), Cheapest Starting (CS), Low Cost (LC) y Last Period (LP)), como alternativa al método tradicional Plug&Charge, consiguiendo una reducción del coste de la electricidad de hasta el 75.2 %.

Finalmente, como prueba de concepto, se ha propuesto un enchufe inteligente, que permite la recarga eficiente de vehículos eléctricos. Este enchufe combina tecnología hardware con los métodos de carga creados durante la realización de esta tesis doctoral, ofreciendo varios modos de recarga para que el usuario pueda elegir aquél que mejor se adapte a sus necesidades.

Índice general

1. Motivación, Objetivos, y Organización de la Tesis	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos de la Tesis	2
1.3. Organización de la Tesis	3
2. Vehículos Eléctricos: Tecnologías y Retos	5
2.1. Introducción	5
2.2. Historia del vehículo eléctrico	8
2.3. El sector eléctrico en España	9
2.4. Estudios existentes sobre vehículos eléctricos	11
2.5. Vehículos eléctricos	13
2.5.1. Taxonomía de los vehículos eléctricos	13
2.5.2. Subvenciones y situación del mercado	14
2.6. Baterías	16
2.7. Carga de vehículos eléctricos	23
2.7.1. Modos de carga	23
2.7.2. Conectores	26
2.8. Retos de la investigación y oportunidades abiertas	30
2.8.1. Nuevos desafíos y tecnologías en baterías para EVs	30
2.8.2. Mejoras en el proceso de recarga	32
2.8.3. Comunicaciones e IA en los vehículos eléctricos	33
2.8.4. Recargas eco y sostenibilidad	34
2.9. Conclusiones	35
3. Predicción de la Demanda de Energía de Vehículos Eléctricos Mediante el Uso de Redes Vehiculares	37
3.1. Introducción	37
3.2. Trabajos relacionados	41
3.3. Arquitectura para la predicción de la demanda de energía	42
3.3.1. Lado del vehículo (Vside)	42
3.3.2. Lado del servidor (Sside)	43
3.4. Funcionamiento y protocolo	44
3.5. Aplicaciones	45
3.6. Entorno de simulación	46
3.7. Resultados de simulación	48

ÍNDICE GENERAL

3.8. Conclusiones	49
4. Mejora de la Recarga de Vehículos Eléctricos en los Puntos de Recarga Domésticos	51
4.1. Introducción	52
4.2. Trabajos relacionados con las estrategias de recarga de EVs	54
4.3. Mejorando la recarga de vehículos eléctricos	57
4.3.1. Contexto eléctrico	57
4.3.2. Estrategias de recarga propuestas	58
4.4. Entorno de simulación	61
4.5. Resultados de la simulación	64
4.5.1. Primer escenario: demanda habitual	64
4.5.2. Segundo escenario: alta demanda	65
4.5.3. Tercer escenario: demanda extra	66
4.5.4. Comparación global de los métodos de recarga propuestos	68
4.6. Conclusiones	70
5. Enchufe Inteligente para la Recarga de Vehículos Eléctricos	73
5.1. Introducción	73
5.2. Trabajos relacionados	76
5.2.1. Sistemas basados en Raspberry Pi	76
5.2.2. Enchufes Inteligentes	78
5.3. Arquitectura del sistema de recarga de EVs	79
5.3.1. Hardware	81
5.3.2. Software	82
5.4. Evaluación de las prestaciones del enchufe inteligente	85
5.5. Conclusiones	89
6. Conclusiones, Publicaciones y Trabajo futuro	91
6.1. Publicaciones relacionadas con la Tesis	92
6.1.1. Revistas	92
6.1.2. Congresos internacionales	95
6.1.3. Congresos nacionales	95
6.1.4. Patentes	96
6.1.5. Otros méritos	96
6.2. Trabajo Futuro	97

Lista de Figuras

2.1. Comparativa de ahorro en coste por kilómetro ofrecida por vehículos propulsados por Gasolina, Etanol (E85), híbridos, Diésel, Biodiésel, Gas licuado (LPG), Gas Natural (GNV), y eléctricos [BM10].	7
2.2. Tipos de tarifas existentes en el mercado español.	10
2.3. Clasificación de los vehículos eléctricos en función de la tecnología y configuración de su motor.	13
2.4. Evolución del número de vehículos eléctricos a nivel mundial, 2010-16 [Int17a].	16
2.5. Evolución de la capacidad de las baterías.	20
2.6. Conectores para EVs.	29
3.1. Previsión de ventas de vehículos eléctricos [Int].	40
3.2. Arquitectura del sistema de predicción de la demanda de energía.	43
3.3. Diagrama de flujo del protocolo.	44
3.4. Electricidad recargada (en MW) y minutos de antelación en la previsión de la electricidad requerida.	49
4.1. Escenario de despliegue de EVs en el futuro [Int17a].	53
4.2. Ejemplo del precio de la electricidad en España el 31 de octubre de 2017 [Red17].	58
4.3. Ejemplo que incluye el precio de la electricidad y el punto de partida de carga de los diferentes métodos (Precio de la electricidad en España para vehículos eléctricos el 1 de enero de 2018).	61
4.4. Promedio total de euros gastados para cargar un EV durante un año completo por cada método de carga en los tres escenarios de demanda de energía.	68
4.5. Porcentaje de nivel de batería después de recargar el vehículo para cada método de carga en los tres escenarios de demanda de energía.	69
4.6. Promedio de euros/kWh para cada método de carga en los tres escenarios de demanda de energía.	70
5.1. Cuota de mercado prevista en USA en base a la evolución del precio de los combustibles [Ene17]. (LDVs se refiere a coches y vehículos similares).	75
5.2. Arquitectura general del sistema de recarga inteligente.	81
5.3. Diagrama de componentes del enchufe inteligente.	82

LISTA DE FIGURAS

5.4. Primer prototipo del enchufe inteligente.	83
5.5. Arquitectura Software del enchufe inteligente.	83
5.6. Diagrama de secuencia que refleja el funcionamiento del sistema. .	85
5.7. Coste de la recarga para un año para cada modo de carga con las dos tarifas analizadas.	87
5.8. Porcentaje del nivel de la batería medio después de recargar el vehículo para cada modo de carga con las dos tarifas analizadas. .	88
5.9. Promedio de euros/kWh para cada modo de carga con las dos tarifas analizadas.	88

Lista de Tablas

2.1. Cuota de mercado del EV sobre el total de ventas de automóviles nuevos entre 2013 y 2016 [Ins, Elea, Eur, Eleb, Sta, Hon]	16
2.2. Capacidad de las baterías de algunos vehículos eléctricos	18
2.3. Características de las baterías de EVs	23
2.4. Clasificaciones de carga de SAE-J1772 [SAE09]	24
2.5. Clasificaciones de carga de la IEC-62196 [SAR, IEC]	25
2.6. Clasificación de carga del GB/T-20234 [Chi]	26
3.1. Parámetros de entrada del simulador	47
4.1. Parámetros de carga	59
4.2. Ventas de vehículos eléctricos durante 2016 en España [ANF17] . .	62
4.3. Parámetros de simulación	63
4.4. Resultados obtenidos en el escenario de demanda habitual	64
4.5. Resultados obtenidos en el escenario de alta demanda	66
4.6. Resultados obtenidos en el escenario de demanda extra	67
5.1. Nuevas matriculaciones de EVs por país (en miles) [Int17a]	74
5.2. Datos de los EVs utilizados en la simulación (España, 2015)	86
5.3. Parámetros de simulación	86
5.4. Resultados obtenidos aplicando la tarifa eléctrica "PVPC"	86
5.5. Resultados obtenidos aplicando la tarifa eléctrica "libre mercado" .	86

Capítulo 1

Motivación, Objetivos, y Organización de la Tesis

1.1. Motivación

Debido al aumento de los niveles de contaminación atmosférica, los gobiernos de numerosos países están promulgando estrictas leyes de contaminación que afectan en gran medida a los motores de combustión basados en combustibles fósiles. El transporte vehicular sigue siendo en la actualidad el más utilizado para los desplazamientos de personas, por lo que desarrollar herramientas capaces de gestionar y mejorar dicho medio supone un gran avance.

Hoy en día, el sector del transporte se considera responsable del 25 % de las emisiones de CO₂, y de un consumo total de energía de entre un 36 % y un 40 % en España [Obs12, dE09], siendo estas cifras de un 28 % de emisiones de CO₂ en la Unión Europea. Es por esto que en los últimos años, está cobrando fuerza la utilización de otros tipos de combustibles y de tecnologías que permitan reducir las emisiones, y por tanto la contaminación.

Un aspecto determinante es la introducción del vehículo eléctrico, cuyas ventas están aumentando en prácticamente todos los países desarrollados y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), esperándose que esta tendencia continúe en los próximos años. Desde la Unión Europea también se está potenciando la introducción de este tipo de vehículos, estableciéndose como un objetivo prioritario que el 20 % de los vehículos europeos sean eléctricos o híbridos para el año 2020 [Obs12].

Por otro lado las redes inalámbricas de comunicación entre vehículos se consideran en la actualidad una tecnología prometedora para su uso en los *Sistemas Inteligentes de Transporte* (ITS) [HL08], facilitando la comunicación entre vehículos (comunicación V2V), así como entre los vehículos y la infraestructura de soporte (comunicación V2I). En general, el objetivo que persigue este tipo de tecnologías es que el propio vehículo disponga de un sistema de comunicación que realice una integración de las diferentes tecnologías y paradigmas de red, siendo capaz de sugerir al conductor nuevas rutas para que el desplazamiento sea lo más rápido y seguro

posible, obtener una mejor eficiencia mediante la reducción del consumo de combustible y por lo tanto de las emisiones de contaminantes, así como la de facilitar la asistencia en carretera en caso de accidente [FGM⁺12, BGF⁺14, FSN⁺16].

Es evidente que el vehículo eléctrico no puede desarrollarse sin tener en cuenta el resto de vehículos. Para su correcta implantación deberán tenerse en cuenta su utilidad y funcionalidad en las ciudades del futuro (Smart Cities) y dentro de los futuros Sistemas Inteligentes de Transporte. Además, mediante el uso de las Redes Vehiculares, no sólo se tendrán en cuenta los aspectos más "clásicos" de la movilidad, como son la seguridad vial (aspecto que por supuesto debe de tenerse en vital consideración) y la gestión avanzada del tráfico (teniendo en cuenta la topología ofreciendo una movilidad más eficiente y sostenible [SNTS⁺16]), sino que podrán aparecer nuevas soluciones que faciliten el proceso de recarga de baterías, así como el proceso de generación de electricidad que permita satisfacer la gran demanda eléctrica que se producirá.

En la presente Tesis Doctoral, nos centraremos en realizar un estudio sobre la situación del vehículo eléctrico, analizando los retos y las oportunidades a la que se enfrentará en su implantación, proponiendo mediante la utilización de la ingeniería, soluciones que permitan su integración en las Smarts Cities. Además, teniendo en cuenta la vital importancia que tienen las baterías en este tipo de vehículos, se buscará proporcionar soluciones que permitan una recarga más eficiente, ecológica y organizada.

1.2. Objetivos de la Tesis

El objetivo principal de la Tesis es presentar una arquitectura y un conjunto de estrategias que permitan una correcta implantación del vehículo eléctrico en las Smarts Cities del futuro. Para ello, se propondrá una arquitectura que facilite un proceso ordenado de recarga de vehículos eléctricos, con el objetivo de que los usuarios puedan obtener un precio más económico por la recarga de sus vehículos, y las empresas productoras de energía puedan tener un mejor control de la demanda mediante sistemas que permitan conocerla con antelación. Para ello, será imprescindible tener en cuenta el desarrollo de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), y el Internet de las cosas, elementos clave que serán los cimientos sobre los que se basarán este tipo de ciudades.

Debido a la ausencia de herramientas informáticas que permitan la simulación de las recargas de vehículos eléctricos, se implementará un simulador. En concreto, este simulador permitirá recrear diferentes escenarios, pudiendo simular un número elevado de vehículos con las características específicas de sus baterías. Además, este simulador tendrá en cuenta el precio real de la electricidad durante el tiempo simulado.

Otro objetivo importante será el de establecer sistemas de carga inteligentes y eficientes para los vehículos eléctricos. Hasta ahora, el método normalmente utilizado para la recarga de este tipo de vehículos es el denominado Plug and Charge (P&C), es decir, se enchufa el vehículo y de manera inmediata comienza su recarga. Sin embargo, este método no es realmente eficiente, ya que no tiene en cuenta ningún parámetro que permita mejorar la eficiencia, como puede ser

el precio de la electricidad, el estado de la red eléctrica, el nivel de batería del vehículo, o si la energía requerida se ha generado de una manera respetuosa con el medio ambiente. Por ello, se propondrá un conjunto de métodos de recarga, con el objetivo de encontrar mejores estrategias, evitando recargar en periodos de demanda pico y promoviendo recargas en horas de menor actividad, donde los precios de la electricidad son más bajos.

Como cuarto y último objetivo, se tratará de plasmar todo el conocimiento adquirido en la realización de esta Tesis Doctoral de manera aplicada. Para ello, se creará un enchufe, que permitirá la recarga de los vehículos eléctricos de manera inteligente. Este enchufe, ofrecerá diversos métodos de recarga, pudiendo el usuario elegir aquél que mejor se adapte a sus necesidades.

1.3. Organización de la Tesis

La Tesis está organizada de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se hace una introducción al vehículo eléctrico (EV), se presenta brevemente su historia, se incluye una taxonomía y la situación actual del mercado. En este tipo de vehículos, la electricidad y el proceso de recarga son de vital importancia, por lo que se presentarán las características más importantes sobre las baterías y los aspectos relacionados con su proceso de carga. Por último, se exponen los desafíos a los que se enfrentan este tipo de vehículos.

En el Capítulo 3 se presenta una arquitectura para predecir la demanda de energía de vehículos eléctricos, ya que estos vehículos van a influir drásticamente en la demanda eléctrica. Para facilitar la estimación de la demanda eléctrica que pueden producir estos vehículos, se presenta esta arquitectura basada en la utilización de redes vehiculares, incluyendo sus componentes, su funcionamiento, el protocolo de comunicación y sus aplicaciones.

En la actualidad el método de recarga utilizado es el denominado Plug&Charge. Sin embargo, como ya hemos comentado, este método no tiene en cuenta ningún parámetro de eficiencia. En el Capítulo 4 se proponen cuatro métodos para la recarga de EVs (Cheapest (C), Cheapest Starting (CS), Low Cost (LC) y Last Period (LP)). Estos métodos son capaces de recargar de manera eficiente, evitando recargar en periodos de demanda pico y promoviendo recargas en horas de menor actividad, donde los precios de la electricidad son más bajos.

En el Capítulo 5 se presenta un prototipo de enchufe inteligente. Este dispositivo ofrece tres modos de recarga (Plug&Charge, Save y Safe), estrategias que planifican el inicio de la recarga del vehículo según el interés del usuario, puesto que pueden darse casos en que el usuario no pueda permitirse no recargar completamente el vehículo por buscar un ahorro en el precio de la electricidad. El enchufe inteligente ha sido probado con dos tarifas eléctricas, obteniéndose resultados satisfactorios en ambas pruebas.

Finalmente, en el Capítulo 6 presentamos un resumen de los principales resultados y contribuciones de esta Tesis, junto con algunas observaciones finales. También incluimos una lista de las publicaciones relacionadas con la Tesis, y comentamos brevemente algunos aspectos que pueden derivarse del trabajo aquí presentado, y que consideramos interesantes para ser tratados en el futuro.

Capítulo 2

Vehículos Eléctricos: Tecnologías y Retos

Los vehículos eléctricos (EVs) están ganando impulso debido a la reducción de su precio de venta y al aumento de la conciencia ecológica. En este capítulo además de presentar un conjunto de trabajos sobre EVs, se revisa su historia, su estado actual, la situación de mercado, los incentivos que se ofrecen para su venta y sus perspectivas de futuro. Por otra parte, se presenta un resumen de la situación del sector eléctrico en España, exponiendo las diferentes tarifas eléctricas existentes en España. Dado que uno de los aspectos fundamentales en este tipo de vehículos es la batería, también se expondrán las tecnologías utilizadas en sus baterías, desde las primeras de plomo-ácido, hasta las de litio-ion, que son las más utilizadas en la actualidad. Además, revisaremos los diferentes estándares disponibles para la recarga de EVs, y finalizamos el capítulo, presentando algunas ideas interesantes sobre lo que se espera en un futuro cercano en este campo, así como los aspectos de investigación que todavía quedan abiertos para la comunidad científica.

2.1. Introducción

La industria del automóvil se ha convertido en una de las industrias mundiales más importantes, no sólo a nivel económico sino también en términos de investigación y desarrollo. Todos los elementos tecnológicos que se introducen en el vehículo buscan mejorar la seguridad de los viajeros y peatones. Además, cada vez hay un número mayor de vehículos en circulación, lo que permite que nos podamos desplazar de una manera rápida y cómoda. Sin embargo, esto ha provocado un aumento drástico de los niveles de contaminación en entornos urbanos. Según un informe de la Unión Europea, el sector del transporte es responsable de casi el 28 % de las emisiones totales de CO₂, mientras que el transporte por carretera es responsable de más del 70 % de las emisiones del sector del transporte [Ene11].

Para evitar la concentración de altos niveles de CO₂, dióxido de nitrógeno (NO₂) y otros gases de efecto invernadero, en la mayoría de países desarrollados,

las autoridades están fomentando la utilización de vehículos eléctricos, principalmente mediante la aparición de incentivos fiscales, ayudas a la compra, u otras medidas especiales como la gratuidad en los aparcamientos públicos o en el uso de autopistas. Estas medidas buscan promover la movilidad sostenible y un modelo de transporte eficiente. Los EVs ofrecen las siguientes ventajas frente a los vehículos tradicionales:

- **Cero emisiones:** estos vehículos no emiten contaminantes como CO_2 u óxidos de nitrógeno, y los procesos que forman parte de su proceso de producción suelen ser más respetuosos con el medio ambiente.
- **Sencillez:** el número de elementos del motor de un EV es menor, y además su mantenimiento es mucho más económico debido a su simplicidad mecánica. Sus motores son más sencillos y compactos, no necesitan un circuito de refrigeración y no es necesario incorporar cambio de marchas, embrague o elementos que silencien el ruido del motor.
- **Fiabilidad:** al tener menos y más sencillos componentes, este tipo de vehículos tienen menos averías. Además, no sufren el desgaste inherente producido por las explosiones del motor, las vibraciones, o la corrosión de los combustibles.
- **Coste:** el coste de mantenimiento del vehículo y del combustible es mucho menor que en los vehículos tradicionales de combustión. El coste energético por kilómetro es inferior en los EVs que en los vehículos tradicionales (Ver Figura 2.1).
- **Comodidad:** viajar en un EV será mucho más cómodo, debido a la ausencia de vibraciones o ruidos del motor.
- **Eficiencia:** los EVs son más eficientes que los vehículos tradicionales. En concreto, los vehículos eléctricos convierten alrededor del 75 % de la energía eléctrica de la red en energía en las ruedas, mientras que los vehículos a gasolina convencionales tienen un nivel de eficiencia inferior al 27 % [Fue].
- **Accesibilidad:** este tipo de vehículos permite acceder a áreas urbanas que no están permitidas para el resto de vehículos, ya que no sufre de las mismas restricciones de circulación en las grandes ciudades, sobre todo en los momentos de alto nivel de contaminación.

Sin embargo, los EVs se enfrentan a importantes desafíos relacionados con las baterías:

- **Autonomía:** la autonomía generalmente se limita a entre 90 y 200 kilómetros con una carga completa, aunque algunos modelos más modernos pueden alcanzar hasta 500 kilómetros.
- **Tiempo de recarga:** recargar completamente las baterías puede costar de 4 a 8 horas. Incluso una carga rápida al 80 % de su capacidad puede llevar 30 minutos.

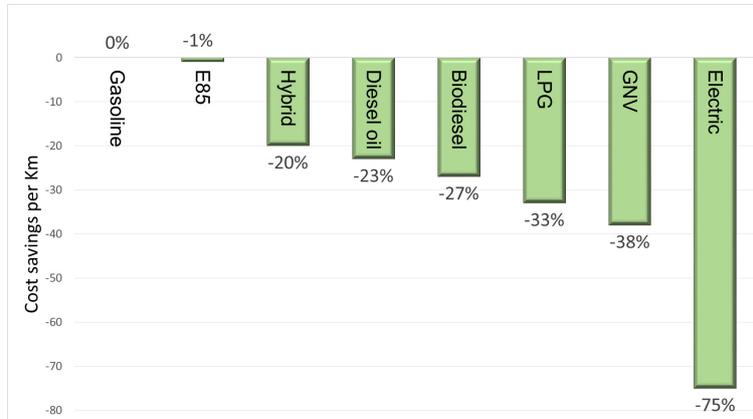


Figura 2.1: Comparativa de ahorro en coste por kilómetro ofrecida por vehículos propulsados por Gasolina, Etanol (E85), híbridos, Diésel, Biodiésel, Gas licuado (LPG), Gas Natural (GNV), y eléctricos [BM10].

- **Coste y duración de la batería:** las grandes baterías de estos vehículos tienen un coste elevado, y es posible que deban reemplazarse una o más veces a lo largo de la vida útil del vehículo.
- **Volumen y peso:** Las baterías son pesadas y ocupan un espacio considerable en el vehículo.

En el futuro, los EVs van a tener un papel muy importante en las Smart Cities. Para que esto suceda, será necesario facilitar la recarga de este tipo de vehículos y desarrollar baterías con más densidad energética. El principal hándicap de los EVs es la duración de sus baterías, y por tanto, su autonomía. Sin embargo, los investigadores están trabajando en tecnologías para aumentar su autonomía y disminuir el tiempo de carga, el peso y el coste. Estos factores finalmente determinarán el futuro de los vehículos eléctricos.

Este capítulo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2.2 se mostrará una breve historia del vehículo eléctrico, y su evolución en el contexto social de la época. En la Sección 2.3 se presenta la situación del sector eléctrico español y comentamos brevemente las diferentes tarifas existentes. La Sección 2.4 incluye los trabajos existentes sobre EVs. La Sección 2.5 presenta una clasificación de los diferentes tipos de EVs, la evolución de sus ventas y la situación actual del mercado. En la Sección 2.6, se comentarán las características más destacables de las baterías y los distintos tipos existentes según su tecnología. En la Sección 2.7 se expondrán los distintos estándares existentes para recargar los vehículos, sus modos de carga, así como los tipos de conectores definidos por dichos estándares. En la Sección 2.8, haremos un repaso de los aspectos relacionados con los vehículos eléctricos que deben ser explorados, en los que todavía quedan detalles por mejorar,

o que presentan más oportunidades para la comunidad científica. Por último, en la Sección 2.9 se expondrán las conclusiones más importantes obtenidas.

2.2. Historia del vehículo eléctrico

Las ventas de vehículos eléctricos están aumentando de manera considerable. Sus ventas aumentan año tras año, y los gobiernos están anunciando medidas restrictivas a los vehículos de combustión en favor de los eléctricos.

Sin embargo, este tipo de vehículo no ha sido un invento reciente en la dilatada vida del automóvil. En el pasado se realizaron varios intentos para construir un vehículo que se moviera de forma autónoma como alternativa al carro de caballos. El primer intento fue ideado por Sir Isaac Newton en 1680, que buscaba crear un vehículo propulsado por un motor de vapor. Este no se materializó hasta 1769, de la mano de Nicholas Joseph Cugnot, aunque su principal problema era que pesaba 4.5 toneladas [dTdA11].

En 1821 Michael Faraday construyó el primer motor eléctrico, y sus estudios fueron aprovechados por Jedlik y Thomas Davenport para crear en 1834 el primer vehículo eléctrico propulsado por baterías [CC01]. En 1858 Barsanti creó lo que puede considerarse el primer motor de explosión, siendo la base de lo que posteriormente sería el primer vehículo de combustión en 1876 gracias al doctor Nikolaus August Otto, mientras que en 1892 apareció el primer motor de encendido por compresión basado en las investigaciones de Rudolf Diesel [dTdA11].

Por otra parte, Gaston Planté mejoró la elemental batería, inventando las primeras baterías de plomo-ácido en 1859, que posteriormente fueron mejoradas por el químico francés Camille Alphonse Faure en 1881, incrementando su capacidad e iniciando su fabricación de forma industrial. Casi un siglo más tarde, Sir David Salomons construyó el primer vehículo eléctrico recargable en 1874.

Frank Sprague ideó el primer tranvía eléctrico en 1880, siendo implantado en Virginia en 1886, mientras que en 1899, el ingeniero Camille Jenatzy, creó el primer vehículo eléctrico con carrocería de aleación capaz de superar los 100 km/h, y que fue llamado *Jamais Contente*.

Los inicios del Siglo XX se convirtieron en la época dorada del vehículo eléctrico, existiendo 19 fabricantes en todo el mundo, reflejando una tendencia dominante. En 1900 se presenta en la exposición Universal de París el *Toujours Contente*, siendo el primer vehículo híbrido. Por entonces en América, el 38 % de los 4.200 vehículos que se vendieron eran eléctricos, el 22 % de vehículos propulsados por combustión interna, y el 40 % de vehículos a vapor. En ese mismo año, el BGS VE batió el récord de distancia de vehículos eléctricos, recorriendo 290 kilómetros con una sola carga. La desaparición del coche a vapor supuso un impulso a los vehículos eléctricos, aumentando sus ventas frente al vehículo de combustión, que por aquel entonces era considerado como ruidoso, contaminante y poco fiable. Además, los motores de combustión eran mal vistos por la dificultad que suponía arrancarlos, por lo que esto supuso que las ventas de vehículos eléctricos superasen por 10 a 1 a los de gasolina.

En 1912 se vendieron cerca de 34.000 vehículos eléctricos en América, pero ese año apareció el primer sistema de arranque eléctrico, de la mano de Cadillac, lo que

supuso una gran mejora para este tipo de vehículos. Un factor clave en el declive de los vehículos eléctricos fue la producción en masa del Ford T, que pasó de costar \$850 en 1909 a costar \$260 en 1925. Por aquel entonces las características de los motores de combustión mejoraron progresivamente llegando a ofrecer el doble o el triple de autonomía frente a los vehículos eléctricos, con un coste muy inferior, ya que su precio rondaba los \$2.500.

El declive fue progresivo, y aunque algunas marcas hicieron tímidas apuestas en este tipo de vehículos, no tuvieron éxito. Pero su olvido casi definitivo fue a partir de los 60, debido a que los carburantes fósiles eran abundantes y baratos, y los motores de combustión interna comenzaron a producirse de manera masiva, en detrimento de los EVs, que no alcanzaron el éxito previsto [LL12]. Grandes empresas como la Standard Oil compraron empresas basadas en motores eléctricos para desmantelarlas, y el vehículo eléctrico prácticamente desapareció.

Unas décadas más tarde, en 1997, Toyota apostó por los vehículos híbridos, lanzando el Toyota Prius, el primer vehículo híbrido fabricado en masa. Este vehículo tenía la ventaja de que a bajas velocidades podía circular únicamente con el motor eléctrico. Renació un concepto, el de vehículo ecológico. En esta dirección se lanzaron otros vehículos, como el GM EV1, con una autonomía que rondaba los 250 km, el Nissan Altra EV o el Toyota RAV 4 EV.

Poco más tarde, en 2003, se fundó Tesla Motors, empresa que ha revolucionado el sector del coche eléctrico, buscando acelerar la transición al transporte sostenible. La empresa fundada por Elon Musk ha sido la primera en los tiempos modernos en vender únicamente vehículos propulsados por electricidad. Además, ha sido la primera marca en comercializar este tipo de vehículos con sistema de navegación autónoma. Sus vehículos son los que mayores prestaciones ofrecen, llegando a tener una autonomía superior a los 400 km, gracias a sus potentes baterías con capacidades de hasta 100 kWh. También participa en otros tipos de proyectos como Solar Roof, para la instalación de paneles fotovoltaicos, o los sistemas Powerwall y Powerpack que permiten almacenar hasta 210 kWh. A finales de 2017 Tesla presentó un camión eléctrico capaz de transportar 36 toneladas. Su autonomía será de 800 km y su venta está prevista para 2019.

En la actualidad existe una amplia variedad de modelos eléctricos, además las compañías han anunciado lanzamientos de vehículos eléctricos para los próximos años y varios países han anunciado la prohibición en un futuro cercano, de los vehículos propulsados por combustibles fósiles. La historia se repite y ambas tecnologías vuelven a competir de nuevo. Cada vez se implantan normas más restrictivas en cuanto a niveles de contaminación, y para cumplirlas será necesario tener en cuenta tecnologías basadas en motores eléctricos.

2.3. El sector eléctrico en España

El mercado de la electricidad en España es complejo, existiendo una gran cantidad de tarifas eléctricas. A modo de resumen las tarifas pueden dividirse en las siguientes categorías: (i) Tarifas Reguladas, (ii) Bono Social, (iii) Tarifa Plana y (iv) Tarifas de Libre Mercado (Ver Figura 2.2).

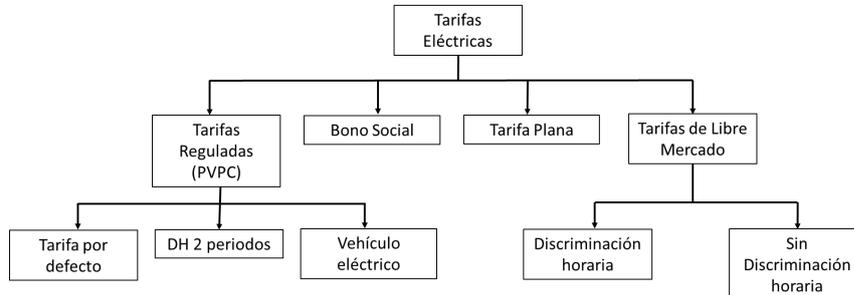


Figura 2.2: Tipos de tarifas existentes en el mercado español.

- **Tarifas Reguladas:** estas tarifas se engloban en el término Precio Voluntario para el Consumidor (PVPC), donde el precio mínimo y máximo lo establece el Ministerio de Industria, Energía y Turismo. El precio varía cada hora y es establecido en base al coste directo de su fabricación sin incluir ningún otro coste. Este tipo de tarifa no tiene cláusulas ni servicios adicionales, y tiene una factura más sencilla. Una restricción de este tipo de tarifa es que la potencia contratada debe ser inferior a 10 kWh [Vic14]. Hay tres tipos de tarifas reguladas: (i) Tarifa por defecto, (ii) Discriminación Horaria de 2 periodos y (iii) Tarifa para vehículos eléctricos, también conocida como SuperValle.
- **Bono Social:** tarifa para los consumidores con menos recursos o que estén en riesgo de pobreza extrema. Este tipo de tarifa proporciona un descuento del 25 % o del 40 % respecto al PVPC [Vic17a]. Esta tarifa requiere una potencia contratada menor a 3 kWh.
- **Tarifa Plana:** tarifa por la cual el precio de la luz será el mismo durante todo el año. Los contratos son renovados de manera anual y sólo en el periodo de renovación el usuario puede cambiarse a otro tipo de tarifa sin penalización. En esta tarifa se contrata una determinada potencia al año; si consumes menos, se cobra la cuota fija concertada, y si consumes más de lo estimado, se cobra el exceso de electricidad consumida con una penalización.
- **Tarifas de Libre Mercado:** las empresas distribuidoras tienen libertad para ofrecer descuentos y para fijar el precio, no existen precios máximos ni mínimos. Los precios y las condiciones no tienen regulaciones, no existe límite de potencia y cualquier persona puede contratarlas. Cada empresa distribuidora puede ofrecer diversas tarifas de este estilo, por lo que existe una gran cantidad de tarifas diferentes, aunque se pueden dividir en dos clases: (i) Tarifa con discriminación horaria, en la que el precio de la luz se divide en periodos según la hora, y (ii) tarifas sin discriminación horaria, en la que se tendrá el mismo precio por kWh a lo largo de todo el día.

Teniendo en cuenta los diferentes tipos de tarifas disponibles que acabamos de presentar, las diferentes necesidades de los usuarios, así como la variabilidad en cuanto a las características de los vehículos eléctricos que existen en el mercado, consideramos que un proceso de recarga que tenga en cuenta todas esas variables sería mucho más eficiente y podría permitir, entre otras cosas, la reducción del coste de la energía empleada para dichas recargas.

2.4. Estudios existentes sobre vehículos eléctricos

En la última década se ha producido un avance significativo en todos los aspectos relacionados con la fabricación de los vehículos eléctricos y el uso de nuevas tecnologías, así como en sus ventas. De la misma manera, el interés por la investigación también ha aumentado, lo que ha provocado un incremento significativo en el número de trabajos y nuevas propuestas relacionadas con los vehículos eléctricos. En la presente sección, presentamos una pequeña recopilación de algunos temas relacionados con los EVs que han sido tratados por trabajos que se han publicado previamente. Además, comentamos las diferencias más notables con el presente capítulo.

Algunos de los estudios que han sido publicados hasta la fecha, tratan sobre algunos aspectos generales, como la evolución de los vehículos eléctricos durante la historia, presentan diferentes clasificaciones en función de cómo se han diseñado y las características de su motor, analizan su impacto en la infraestructura eléctrica, etc. Por ejemplo, Yong et al. [YRTM15], en su trabajo repasan la historia de los EVs desde su creación, a mediados del siglo XIX, hasta la actualidad. Además, realizan una clasificación de los vehículos según su configuración del tren de potencia. Finalmente, su trabajo analiza el impacto de la recarga de los vehículos eléctricos en la red eléctrica. De forma similar, Richardson [Ric13] estudia el impacto que pueden ocasionar los EVs en el rendimiento, la eficiencia y la capacidad requerida de la red eléctrica. Además, revisa el impacto económico y ambiental de los vehículos eléctricos. Habib et al. [HKR15] presentan una revisión de algunas estrategias de carga de vehículos eléctricos y analizan su impacto en las redes de distribución de energía. Además, realizan un análisis de métodos de recarga coordinados y no coordinados, de carga retardada, y de planificación inteligente de las recargas. Finalmente, estudian los beneficios económicos de la tecnología vehicle-to-grid (V2G) en función de las estrategias de recarga.

Otro aspecto que también ha sido tratado por diversos trabajos ha sido el uso de fuentes de energías renovables (p.ej. la energía eólica, la solar, o la biomasa) y su integración en el ámbito de los vehículos eléctricos. Liu et al. [LKL⁺15] presentan una visión general sobre los vehículos eléctricos y las fuentes de energía renovables, en concreto se centran en la energía solar y la eólica. Finalmente, muestran un conjunto de trabajos agrupados en tres categorías: (i) aquéllos trabajos que estudian la interacción entre los EVs y las fuentes de energía renovable para la reducción del coste de la energía, (ii) los trabajos que se centran en mejorar la eficiencia, y (iii) las propuestas que fundamentalmente buscan reducir las emisiones. Por otra parte, Hawkins et al. [HGS12] analizan los estudios existentes sobre el impacto medioambiental de los Hybrid Electric Vehicle (HEVs) y los EVs. Para

ello, presentan un estudio de 51 evaluaciones ambientales durante el ciclo de vida de ambos tipos de vehículos. En su trabajo tienen en cuenta aspectos como las emisiones de gases de efecto invernadero, la generación, transmisión y distribución de electricidad, así como la producción de vehículos y baterías y su ciclo de vida. A diferencia de los anteriores trabajos, Shuai et al. [SMP16] proporcionan una visión general del nuevo modelo económico que presentan los vehículos eléctricos, teniendo en cuenta los flujos de energía unidireccionales y bidireccionales (en los que los propios EVs pueden proporcionar energía a la red eléctrica). Para ello, analizan diferentes instalaciones de carga para EVs, así como diferentes estrategias para la recarga unidireccional y el comercio de energía de forma bidireccional. Finalmente, estudian el uso de estos vehículos como posible almacenamiento para la energía obtenida de fuentes renovables.

Otros autores han recopilado las diferentes estrategias que han sido propuestas para la recarga de los EVs. En esta línea, Tan et al. [TRY16] revisan los beneficios y desafíos de la tecnología de vehículo a red eléctrica (V2G), tanto de forma unidireccional, como bidireccional. Además de las ventajas, analizan los desafíos del V2G, como son la degradación de las baterías y el alto coste de inversión. Por último, realizan una recopilación de estrategias para la optimización del V2G, agrupándolas en función de la técnica utilizada (p.ej., algoritmos genéticos (GAs) y Particle Swarm Optimization (PSO)), así como en función de los objetivos: (i) coste de operación, (ii) emisión de dióxido de carbono, (iii) ganancia, (iv) soporte para la generación de energía renovable, (v) curva de carga objetivo, y (vi) pérdidas de potencia. De manera similar al anterior trabajo, Hu et al. [HMSL16], presentan a revisión y clasificación de métodos para la carga inteligente de vehículos eléctricos, pero en este caso, centrados en los operadores de flotas. En particular, presentan algunos trabajos sobre modelado de baterías, los estándares de carga y comunicaciones, así como los patrones de conducción. Por último, muestran un conjunto de diferentes estrategias de control para la gestión de flotas de EVs, así como algunos algoritmos matemáticos para su modelado. Rahman et al. [RVS⁺16], presentan un conjunto de estrategias empleadas para resolver diferentes problemas relacionados con la infraestructura de carga de PHEVs y EVs. Evalúan diferentes sistemas de carga en diferentes entornos, como garajes domésticos, complejos de apartamentos, y complejos comerciales. Para finalizar presentan una recopilación de técnicas para la optimización de la recarga de PHEVs y EVs.

Para una rápida implantación del vehículo eléctrico, sobre todo teniendo en cuenta que su coste es mayor que el de los vehículos tradicionales con motor de combustión, las ayudas por parte de los gobiernos son un aspecto fundamental. En este sentido, Bjerkan et al. [BNN16] describen el papel que han tenido los incentivos para promover la compra de EVs en Noruega. De esta forma, pretenden determinar qué incentivos son críticos para que un usuario decida comprar un EV. En su trabajo, evalúan la situación en Noruega y presentan un estudio con datos de 3,405 personas en el que analizan el rol de siete incentivos para el uso de EVs: (i) exención del impuesto a la compra, (ii) exención del IVA, (iii) reducción de la tasa de licencia del vehículo, (iv) exención de peajes, (v) estacionamiento gratuito, (vi) acceso a la línea de autobús, y (vii) ferry gratuito.

En general, la mayoría de los estudios que tratan sobre EVs se han centrado

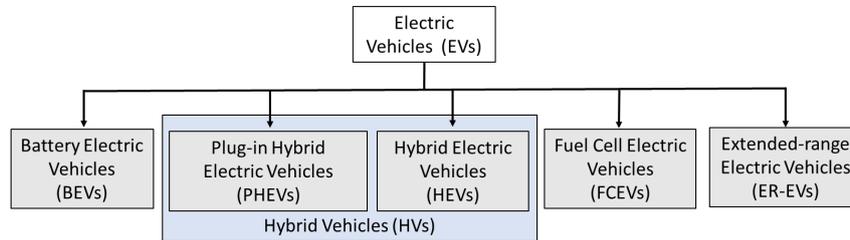


Figura 2.3: Clasificación de los vehículos eléctricos en función de la tecnología y configuración de su motor.

en: (i) el impacto de la recarga de los vehículos eléctricos en la demanda eléctrica, (ii) la utilización de fuentes de energía renovables en el proceso de recarga y (iii) la propuesta de nuevas estrategias para la optimización de la recarga de vehículos eléctricos. Sin embargo, en este capítulo presentamos la situación actual del mercado de este tipo de vehículos, las principales características de las baterías, su tecnología y su proceso de recarga. En cuanto a la recarga se refiere, se presentan diferentes estándares, como el SAE-J1772 utilizado en USA y Japón, el IEC-62196 en Europa, el GB/T-20234 que es el estándar utilizado en China, así como los Supercharger de Tesla. Además de realizar una comparación de los diferentes estándares, expondremos los diferentes modos de recarga definidos por dichos estándares, y los conectores utilizados por cada uno de ellos. Finalmente, también comentaremos los retos a los que se enfrentarán este tipo de vehículos, y las líneas de investigación que consideramos que todavía quedan por explorar.

2.5. Vehículos eléctricos

En esta sección presentaremos una clasificación de los distintos tipos de vehículos eléctricos, comentando sus características principales. También comentaremos la situación actual de mercado, analizando los datos de ventas de este tipo de vehículos y la previsión en distintos países del mundo.

2.5.1. Taxonomía de los vehículos eléctricos

En la actualidad, podemos encontrar distintos tipos de EVs, de acuerdo a su tecnología de sus motores. En general, se clasifican en 5 clases (Ver Figura 2.3):

- **Battery Electric Vehicles (BEVs):** vehículos propulsados al 100 % por electricidad. Los BEVs no tienen un motor de combustión interna y no usan ningún tipo de combustible líquido. Los BEVs usualmente usan grandes paquetes de baterías para dar al vehículo una autonomía aceptable: un BEV típico tendrá un alcance de 160 a 250 km, aunque algunos pueden viajar hasta 400 km con una sola carga. Un ejemplo de este tipo de vehículos es el

Nissan Leaf, que es 100 % eléctrico y dispone actualmente de una batería de 40 kWh, que le permite tener una autonomía cercana a los 378 km.

- **Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)**: vehículos híbridos propulsados por un motor de combustible convencional y un motor eléctrico cargado por una fuente de electricidad externa enchufable. Los PHEVs pueden almacenar suficiente electricidad de la red eléctrica para reducir significativamente su consumo de combustible en condiciones de manejo normales. El Mitsubishi Outlander PHEV dispone de una batería de 12 kWh, lo que le permite circular 54 km únicamente con el motor eléctrico.
- **Hybrid Electric Vehicles (HEVs)**: vehículos híbridos propulsados por una combinación de un motor de combustión interna convencional y un motor eléctrico. La diferencia con respecto a los PHEVs es que los HEVs no se pueden conectar a la red eléctrica. De hecho, la batería que proporciona energía al motor eléctrico se recarga gracias a la energía generada por el propio motor de combustión. En los modelos más modernos, también se recarga gracias a la energía generada en las frenadas (es decir, se convierte la energía cinética en energía eléctrica). El Toyota Prius, en su modelo híbrido no enchufable, dispone de una batería de 1.3 kWh que le permite una autonomía de hasta 50 km en su modo eléctrico.
- **Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs)**: vehículos que disponen de un motor eléctrico que consume la electricidad generada por un motor que usa una mezcla de hidrógeno comprimido y oxígeno obtenido del aire, y que como único residuo libera agua. Aunque este tipo de vehículos se considera que presenta "zero emissions", hay que tener en cuenta que el hidrógeno utilizado se extrae a partir del gas natural. El Hyundai Nexu FCEV es un ejemplo de este tipo de vehículos, capaz de recorrer 580 km sin repostar.
- **Extended-range EVs (ER-EVs)**: estos vehículos son muy similares a los BEVs, pero además cuentan con un motor supletorio de combustión que recarga las baterías del vehículo en caso de necesidad. Dicho motor, a diferencia del que disponen los PHEVs y los HEVs, sólo se utiliza para la recarga, por lo que no está conectado a las ruedas del vehículo. Un ejemplo de este tipo de vehículos es el BMW i3, que dispone de una batería de 33.2 kWh, lo que le permite tener una autonomía de 300 km en su modo eléctrico, a los cuales habría que añadir 130 km más en su modo Extended-range.

2.5.2. Subvenciones y situación del mercado

A pesar de que el precio de compra de los vehículos eléctricos es superior si comparamos la versión eléctrica con la versión de combustión del mismo modelo, su volumen de ventas ha experimentado un gran crecimiento, especialmente en los últimos años. Además, muchos países están preparando la transición de la movilidad tradicional, basada en los combustibles fósiles a la movilidad eléctrica. Prueba de ello es que tras el acuerdo de París [Fra15], se han incrementado las ayudas públicas a este tipo de vehículos.

De hecho, la práctica totalidad de gobiernos de los países desarrollados están aplicando continuamente nuevas políticas de apoyo y promoción del uso de vehículos eléctricos para favorecer la movilidad sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Esto ha provocado que en algunos casos, pueda resultar más económico la compra de un EV que la de un vehículo tradicional.

Por ejemplo, Bélgica ofrece 4,000€ de ayuda para la compra, y dichos vehículos pagan una tasa del impuesto de circulación de únicamente 74€, en lugar de los 1,900€ que pagan los vehículos tradicionales. En Francia, los usuarios que compran un EV reciben una bonificación de entre 4,000€ y 6,000€ en el caso de los BEVs, y de 3,500€ en el caso de adquirir un PHEV. También se ofrece un descuento de entre el 50 % y el 100 % en el impuesto de matriculación. En el Reino Unido se ofrece un incentivo de hasta un máximo de 4,500 libras en la compra de un EV, y si su valor es menor a 40,000 libras, el vehículo está exento del impuesto de circulación. En Alemania, los compradores reciben una bonificación de 4,000€ para la compra de un BEV y de 3,000 en el caso de los PHEVs. Además, los BEVs no pagan impuesto de propiedad. En Holanda los BEVs también están exentos del impuesto de propiedad, mientras que los PHEVs tienen una reducción del 50 %. En el caso de España, se ofrece una ayuda de entre 1,300€ y 5,500€ de ayuda para la compra de BEVs y HEVs, en función de su autonomía. En Noruega el impuesto de propiedad para BEVs y PHEVs es de 47€, mientras que para los vehículos de gasolina dicho impuesto es de 290€ y de 340€ en el caso de los vehículos diésel. Además, los BEVs no pagan tasas de circulación ni peajes y tampoco pagan por estacionar en las zonas de estacionamiento preferencial. Finalmente, en USA, el gobierno federal proporciona \$2,500 por la compra de vehículos eléctricos y \$417 adicionales por cada kWh de su batería a partir de 4 kWh, hasta un máximo de \$7,500 [For, Vic17b, Mov].

Todas estas ayudas y políticas de apoyo están provocando que el número de ventas aumente considerablemente cada año, tal y como puede verse en la Figura 2.4 y en la Tabla 2.1. Como se puede observar, China y USA son, de largo, los países en los que más vehículos eléctricos se han vendido, aunque Noruega destaca como el país del mundo en el que más cuota de mercado tienen los EVs, ya que casi de 1 de cada 3 vehículos que se vendieron en 2016 eran eléctricos. Estas cifras se espera que continúen aumentando en los próximos años, más teniendo en cuenta que varios países quieren impulsar incluso la prohibición de los vehículos de combustión. Un ejemplo de ello es Noruega, que ha anunciado que todos los coches y furgonetas vendidos en 2025 deberán de ser cero-emisiones. Por su parte, la India, Israel y Holanda han anunciado que todos los vehículos vendidos en 2030 serán eléctricos. Alemania y Reino Unido retrasan esa fecha a 2040, el mismo año en la que también se prohibirá la compra de vehículos de combustión en el estado de California. De forma incluso más restrictiva, en Alemania se están planteando la prohibición de la circulación de vehículos diésel en las ciudades, y París ha anunciado que prohibirán circular en su ciudad a vehículos diésel desde 2024 y a todos los de combustión interna a partir de 2030. A su vez, Roma prohibirá circular a vehículos diésel a partir de 2024, y Madrid, Atenas y Ciudad de Mexico lo harán a partir de 2025 [CNN, oI18, NLT17, New17, Gua18, Gua, Mag, Ele18].

Sin embargo, a pesar de los buenos datos de ventas registrados a nivel mundial,

CAPÍTULO 2. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS: TECNOLOGÍAS Y RETOS

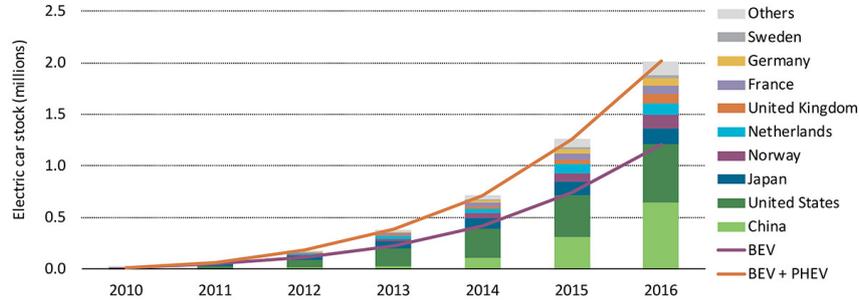


Figura 2.4: Evolución del número de vehículos eléctricos a nivel mundial, 2010-16 [Int17a].

Cuadro 2.1: Cuota de mercado del EV sobre el total de ventas de automóviles nuevos entre 2013 y 2016 [Ins, Elea, Eur, Eleb, Sta, Hon]

País	Cuota de mercado 2013	Cuota de mercado 2014	Cuota de mercado 2015	Cuota de mercado 2016
Noruega	6.10 %	13.84 %	22.39 %	29.4 %
Países Bajos	5.55 %	3.87 %	9.74 %	5.97 %
Hong Kong	0.39 %	1.18 %	4.84 %	6.10 %
Islandia	0.94 %	2.71 %	3.98 %	6.28 %
Suecia	0.71 %	1.53 %	2.52 %	3.60 %
Dinamarca	0.29 %	0.88 %	2.39 %	0.63 %
Suiza	0.44 %	0.75 %	1.74 %	1.71 %
Francia	0.83 %	0.70 %	1.19 %	1.45 %
Reino Unido	0.16 %	0.59 %	1.07 %	1.45 %
China	0.08 %	0.23 %	0.84 %	1.45 %

también hay que destacar que el 95 % de los vehículos eléctricos se han vendido en sólo 10 países (China, USA, Japón, Canadá, Noruega, Reino Unido, Francia, Alemania, Holanda y Suecia).

Finalmente, hay que destacar que en la actualidad existen multitud de modelos de BEVs and PHEVs a la venta. En cuanto a los modelos más vendidos, destacan el Chevrolet Volt, el Nissan Leaf (EV), el Tesla model S, el Toyota Prius Prime (PHEV), el Ford Fusion y el BMW i3 [Che].

2.6. Baterías

Las baterías son un componente clave en los vehículos eléctricos. De ellas dependen aspectos fundamentales como su autonomía, la velocidad de carga y descarga, e incluso el precio del vehículo. En esta sección se presentarán algunos datos

interesantes relacionados con las baterías, como el aumento en la producción a nivel mundial, la reducción en su coste, sus principales características, así como las distintas tecnologías existentes en la fabricación.

En los últimos años se han producido grandes avances en el desarrollo de las baterías. Además, la producción mundial de baterías para EVs ha aumentado un 66 % [IE17], lo que sin duda está relacionado directamente con el incremento en el número de ventas de vehículos, y con la previsión de que la demanda de baterías siga creciendo. De hecho, se prevé que entre 2018 y 2021 la oferta y también la demanda de EVs sea todavía mayor.

Cada vez son más los fabricantes (e.g., LG, Panasonic, Samsung, Sony, y Bosch) que invierten para desarrollar baterías mejores y más baratas. De hecho, el componente de mayor coste en cualquier EV es el paquete de baterías. Por ejemplo, la batería de iones de litio del Nissan LEAF inicialmente representaba un tercio del coste de todo el vehículo. Sin embargo, se espera que este coste se reduzca progresivamente; a finales de 2013, los paquetes de baterías costaban aproximadamente \$500 por kWh, la mitad del precio por kWh en 2009; en la actualidad el precio del kWh es de \$200 y se espera que se sitúe entorno a los \$100 en 2025 [Gre]. Otro dato que apunta en esta dirección es que Tesla Motors está construyendo una “Gigafactory” para reducir los costos de producción y aumentar la capacidad de fabricación. La Gigafactory está diseñada para producir más baterías de iones de litio anualmente, que las producidas en todo el mundo en 2013 [Tes14].

Un abaratamiento de los precios de las baterías, obviamente repercutiría de forma directa en la bajada del precio de los EVs, haciendo que fueran más competitivos respecto a los vehículos tradicionales.

En cuanto a las características principales de las baterías, podemos destacar las siguientes:

- **Capacidad.** Uno de los principales problemas de la energía eléctrica es la dificultad y el coste de almacenarla. Esto hace que en la actualidad se destinen grandes cantidades de dinero en el desarrollo de nuevas baterías con mayor eficiencia y fiabilidad, que permitan mejorar su capacidad de almacenamiento.

La capacidad de una batería es la cantidad de electricidad que puede suministrar por unidad de tiempo. Esta unidad puede expresarse en amperios-hora (Ahr) o en vatios-hora (Wh), aunque para los vehículos eléctricos es más común utilizar la segunda. Teniendo en cuenta que en los EVs, la capacidad de sus baterías es un aspecto crítico, la aparición de nuevas tecnologías que permitan almacenar mayor cantidad de energía en el menor tiempo posible será un factor determinante en el éxito de este tipo de vehículos. La Tabla 2.2 muestra los datos relativos a la capacidad de algunos modelos de vehículos eléctricos.

- **Estado de Carga.** Porcentaje actual de carga de la batería respecto al 100 % de su capacidad.
- **Densidad Energética.** Otro aspecto importante en el desarrollo de baterías es obtener la mayor densidad energética posible, es decir, que a igualdad de

CAPÍTULO 2. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS: TECNOLOGÍAS Y RETOS

Cuadro 2.2: Capacidad de las baterías de algunos vehículos eléctricos

Vehículo	Año	Capacidad (kW)
Audi duo	1983	8
Volkswagen Jetta citySTROMer	1985	17.3
Golf eléctrico-híbrido	1987	8
Škoda Favorit	1988	10
Fiat Panda Elettra	1990	9
General Motors EV1	1996	16.5
Audi duo	1997	10
General Motors EV1	1999	18.7
General Motors EV1	2000	26.4
Tesla Roadster	2006	53
Smart ed	2007	13.2
Tesla Roadster	2007	53
BYD e6	2009	72
Mitsubishi i-MiEV	2009	16
Nissan Leaf	2009	24
Smart ed	2009	16.5
Tesla Roadster	2009	53
BYD e6	2010	48
Mercedes-Benz SLS AMG Electric Drive	2010	60
Tata Indica Vista EV	2010	26,5
Tesla Roadster	2010	53
Volvo C30 EV	2010	24
Volvo V70 PHEV	2010	11,3
BMW ActiveE	2011	32
BMW i3	2011	16
BYD e6	2011	60
Ford Focus Electric	2011	23
Mia electric	2011	8, 12
Mitsubishi i-MiEV	2011	10,5
Renault Fluence Z.E	2011	22
Chevrolet Spark EV	2012	21,3
Ford Focus Electric	2012	23
Renault Zoe	2012	22
Tesla Model S	2012	40, 60, 85
BMW i3	2013	22
BYD e6	2013	64
Smart ed	2013	17,6
Volkswagen e-Golf	2013	26,5
Renault Fluence Z.E	2014	22
Tesla Roadster	2014	80
Chevrolet Spark EV	2015	19
Mercedes Clase B ED	2015	28
Tesla Model S	2015	70, 90
BYD e6	2016	82
Chevrolet Volt	2016	18,4
Kia Soul EV	2016	27
Nissan Leaf	2016	30
Renault Zoe	2016	41
Tesla Model 3	2016	50, 75
Tesla Model X	2016	90, 100
BMW i3	2017	33
Ford Focus Electric	2017	33,5
Honda Clarity EV	2017	25,5
Jaguar I-Pace	2017	90
Nissan Leaf	2017	40
Tesla Model S	2017	75, 100
Volkswagen e-Golf	2017	35,8
Audi e-tron	2018	95
Kia Soul EV	2018	30
Nissan Leaf	2018	60
Renault ZOE 2	2018	60
Renault ZOE 2 rs	2018	100
Tesla Model 3	2018	70, 90
Mercedes-Benz EQ	2019	70
Nissan Leaf	2019	60
Volvo	2019	100
Tesla Roaster 2020	2020	200

tamaño y peso una batería sea capaz de acumular una mayor cantidad de energía. La densidad energética de las baterías, se mide como la energía que es capaz de proporcionar una batería por unidad de volumen (Wh/l).

De la misma forma que con la capacidad de las baterías, cuanto mayor sea la densidad energética, mayor será la autonomía de los EVs.

- **Energía específica.** Energía que es capaz de proporcionar una batería por unidad de peso (Wh/kg). Algunos autores también consideran este atributo como densidad energética, especificándose en Wh/l y/o en Wh/kg.
- **Potencia específica.** Potencia que es capaz de suministrar una batería por unidad de peso (W/kg).
- **Ciclos de carga.** Un ciclo de carga se completa cuando se ha usado o se ha descargado el 100 % de la batería.
- **Vida útil.** Otro aspecto a tener en cuenta es la vida útil de las baterías, que se mide en el número de ciclos de carga que puede soportar una batería, manteniendo unas prestaciones predeterminadas. El objetivo es conseguir baterías que soporten un mayor número de ciclos de carga y descarga.
- **Resistencia Interna.** Los componentes de las baterías no son conductores 100 % perfectos, es decir, ofrecen cierta resistencia a la conducción de la electricidad. Esa resistencia eléctrica se disipa, durante el proceso de carga, en forma de calor (*thermal loss*). El calor generado por unidad de tiempo es igual a la potencia perdida en la resistencia, por lo que la resistencia interna tendrá un mayor impacto con altas cargas de corriente [SOK⁺10]. Es decir, se perderá más energía durante el proceso de carga en las cargas rápidas que en las cargas lentas.

Es por tanto muy importante que las baterías sean capaces de soportar cargas rápidas y las altas temperaturas que éstas provocan debido a la resistencia interna. Además, la disminución de esta resistencia provocará un menor tiempo de recarga, que es hoy en día uno de los inconvenientes más importante de este tipo de vehículos.

- **Eficacia.** Es el porcentaje de energía que ofrece la batería en relación con la energía que ha sido necesaria para su recarga.

En la Figura 2.5 se muestra la capacidad de las baterías de algunos EVs desde 1983, fecha en que se comercializó el Audi Duo con una batería de 8 kWh hasta los datos estimados para el año 2020, fecha en la que Tesla ha anunciado que comercializará un Tesla Roadster con una batería de 200 kWh [Cle17].

Actualmente, las baterías son la principal barrera para el éxito de los EVs. El desarrollo de baterías mejores, más baratas y con mayor capacidad facilitará que los vehículos dispongan de una mayor autonomía, y que los usuarios los vean como una verdadera alternativa a los tradicionales vehículos de combustión interna.

A la hora de realizar un viaje con un EV, un factor clave es la autonomía, pero el aspecto realmente limitador es el tiempo necesario para la recarga de

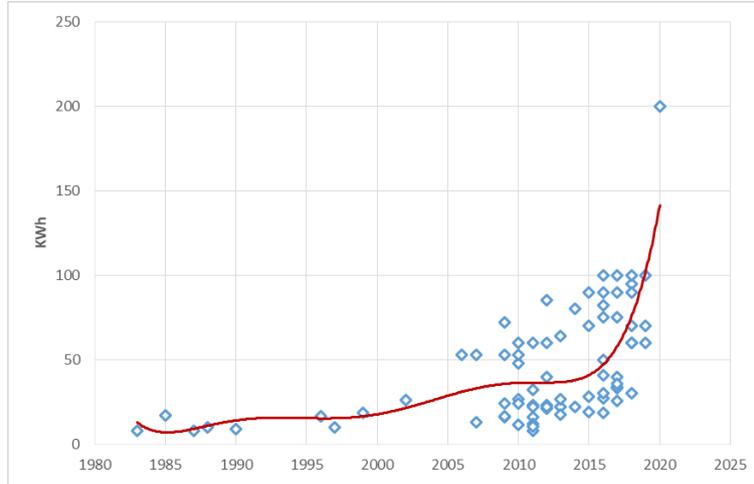


Figura 2.5: Evolución de la capacidad de las baterías.

las baterías. Si se consiguiese que un EV recargase sus baterías en unos 5-10 minutos sin que esto afectase a su vida útil, este tipo de vehículos podrían realizar viajes más largos. Según the Sustainable Energy Ireland [Ire07], en Irlanda las tomas de corriente eléctrica estándar tienen una potencia que ronda los 3 kW, lo que supondría una carga de diez horas en promedio para recargar un máximo de 30 kWh de energía en una batería. Aún en el caso de utilizar sistemas de carga rápida, la recarga de un vehículo supondría hoy en día esperar entre 1 y 3 horas. Para intentar solventar este problema, una alternativa posible es la creación de Battery Exchange Stations (BESs), también conocidas como Battery Swap Stations (BSSs), en la que se intercambian las baterías por otras similares ya cargadas. De hecho, en Israel existen al menos 33 BESs operando en la actualidad [Pos12], y también han sido probados por vehículos de taxi en Tokio en 2010 [Tim11]. Pensando en esta estrategia, Tesla ha creado un sistema en su Model S en el que se pueden intercambiar las baterías en 90 segundos [CNN11]. A su vez, Dinamarca está estudiando la posibilidad de crear un número suficiente de BESs con el objetivo de proporcionar una infraestructura con 900 puntos de carga y estaciones de cambio de batería operadas por robots [Mah11].

En cuanto a las propuestas realizadas a nivel científico, Adler y Mirchandani [AM14] propusieron un método de enrutamiento en línea para vehículos eléctricos que permite la reserva de baterías en BESs utilizando procesos de decisión aleatoria de Markov. Dicho método permitiría reducir el tiempo de espera más del 35%. Mak et al. [MRS13] propusieron algunos modelos de optimización que ayudan al proceso de planificación de intercambio de baterías. También analizaron la posibilidad de la estandarización de las baterías y avances tecnológicos en la estrategia óptima del despliegue de infraestructuras. Yang et al. [YYKZ14] presentaron un

modelo de operación dinámica de BSSs en el mercado eléctrico, adquiriendo ingresos extra al responder activamente a la fluctuación de los precios en el mercado de la electricidad. Storandt y Funke [SF12] abordaron el problema del enrutamiento de EVs con el objetivo de encontrar qué destinos son accesibles desde una ubicación determinada en función del nivel de batería actual del vehículo y la disponibilidad de estaciones de carga o estaciones de intercambio de batería.

Pero el aumento en el número de modelos de EVs, así como de los distintos tipos de baterías y la falta de estandarización de éstas, está ocasionando que la utilización de BESs no sea un proceso viable, ya que el inconveniente es que todos los vehículos atendidos por BES deben usar baterías idénticas [JYKS16]. De hecho, aunque las baterías de litio-ion son cada vez más utilizadas en los EVs, existe una gran variedad de baterías entre las cuales destacan las siguientes:

- **Baterías de plomo-ácido (Pb-PbO_2)**. Estas baterías se inventaron en 1859 y es el tipo más antiguo de batería recargable. Este tipo de batería es muy común en los vehículos convencionales, pero también ha sido utilizada en los vehículos eléctricos. Tiene una relación energía-peso muy baja y una baja relación energía-volumen. La batería está formada por un depósito de ácido sulfúrico y un conjunto de placas de plomo. Durante el proceso de carga inicial, el sulfato de plomo es reducido a plomo metal en las placas negativas, mientras que en las positivas se forma óxido de plomo (PbO_2). El GM EV1 y el Toyota RAV4 EV, son ejemplos de vehículos que utilizaron este tipo de baterías.
- **Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd)**. Esta tecnología fue utilizada en los años 90, ya que estas baterías tienen una mayor densidad de potencia [HS86], pero cada vez son menos utilizadas debido a que tienen un alto efecto memoria, un bajo ciclo de vida útil, y a que el cadmio es un producto muy caro y contaminante. Por esto, las baterías de níquel-cadmio en la actualidad están siendo sustituidas por las baterías de níquel e hidruro de metal (Ni-Mh).
- **Baterías de níquel e hidruro de metal (Ni-MH)**. En este tipo de baterías, una aleación que almacena hidrógeno se usa para electrodos negativos en lugar de cadmio (Cd) [MM00]. Aunque presentan un mayor nivel de autodescarga que las de níquel-cadmio, este tipo de baterías se utilizan por muchos vehículos híbridos, como por ejemplo el Toyota Prius y la segunda versión del GM EV1. El Toyota RAV4 EV, además de tener una versión con batería de plomo-ácido, también tuvo otra con baterías de níquel e hidruro de metal.
- **Baterías de zinc-bromo (Zn-Br_2)**. Este tipo de baterías utilizan una solución de bromuro de zinc (ZnBr_2) almacenada en dos tanques, y en la que el bromuro se convierte en bromo en el electrodo positivo. Esta tecnología fue utilizada por un prototipo llamado "T-Star" en 1993 [SDAT94].
- **Baterías de cloruro de sodio y níquel (NA-NiCl)**. También denominadas Zebra, son muy similares a las Baterías de azufre sódico. Tienen la

ventaja de que pueden ofrecer hasta un 30% más de energía en temperaturas bajas, aunque su rango de funcionamiento óptimo está entre 260°C y 300°C. Este tipo de baterías son muy idóneas para su utilización en vehículos eléctricos [SCT⁺16]. La compañía Modec las utilizó en 2006.

- **Baterías de azufre sódico (Na-S)**, que contienen líquido de sodio (Na) y azufre (S). Este tipo de baterías tienen una alta densidad de energía, alta eficiencia de carga y descarga (89-92%) y un largo ciclo de vida. Además, tienen la ventaja de que estos materiales tienen un coste muy bajo. Sin embargo, este tipo de baterías pueden alcanzar temperaturas de funcionamiento de entre 300 y 350 °C [ST85]. Fueron utilizadas en el Ford Ecostar (1992-1993).
- **Baterías de iones de litio (Li-Ion)**. Estas baterías emplean como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. Las baterías de litio-ion tienen como ventaja la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad de carga, su resistencia a la descarga, el elevado ciclo de cargas/descargas que son capaces de soportar, además del reducido efecto memoria que poseen.

Las baterías de iones de litio deben operar dentro del área de operación segura y confiable, que está restringida por las ventanas de temperatura y voltaje. Exceder las restricciones de estas ventanas dará lugar a una rápida atenuación del rendimiento de la batería e incluso dará como resultado un problema de seguridad, pudiendo incendiarse o incluso explotar, ya que a partir de los 150 °C comienzan a destruirse los electrolitos [LHL⁺13]. Este tipo de baterías es el más utilizado actualmente por la mayoría de EVs y PHEVs.

La Tabla 2.3 incluye una comparación de las características más relevantes de las distintas tecnologías que hemos presentado. Un aspecto importante a la hora de comparar las distintas tecnologías es su temperatura de funcionamiento. En ese aspecto, las baterías de plomo-ácido y las de litio son las que mejor soportan las bajas temperaturas, ya que pueden cargar a temperaturas de hasta -20 °C, aunque en el caso de las baterías de Li-Ion, las bajas temperaturas afectan seriamente a su capacidad, provocando autodescarga [DPPMA03]. De hecho, este tipo de baterías tienen una temperatura óptima de funcionamiento de 40 °C. Como también se puede observar, las baterías compuestas por sodio (Na-NiCl y Na-S) tienen una temperatura de funcionamiento mucho más alta. En cuanto a la energía específica y a la densidad de energía, destacan negativamente las plomo-ácido (Pb-PbO₂) y las de níquel (Ni-Cd, Ni-MH), mientras que las baterías que mejores valores obtienen, con diferencia, son las de Li-ion.

Respecto a la potencia específica, las baterías de plomo y las de zinc ofrecen los peores resultados (hasta 100 W/kg), mientras que los tipos de batería que ofrecen mejores valores son las Ni-MH (con un máximo de 1,000 W/kg), y las baterías de Li-ion, que ofrecen hasta 3,000 W/kg. En cuanto al voltaje de las celdas, las baterías compuestas por níquel y zinc son las que tienen un voltaje menor, mientras que las baterías de Sodio (Na-S y Na-NiCl) y las Li-ion utilizan

2.7. CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Cuadro 2.3: Características de las baterías de EVs

	Pb-PbO₂	Ni-Cd	Ni-MH	Zn-Br₂	Na-NiCl	Na-S	Li-Ion
Temperatura de trabajo (°C)	-20-45	0-50	0-50	20-40	300-350	300-350	-20-60
Energía específica (Wh/kg)	30-60	60-80	60-120	75-140	160	130	100-275
Densidad de energía (Wh/l)	60-100	60-150	100-300	60-70	110-120	120-130	200-735
Potencia específica (W/kg)	75-100	120-150	250-1,000	80-100	150-200	150-290	350-3,000
Voltaje de celda (V)	2.1	1.35	1.35	1.79	2.58	2.08	3.6
Ciclos de vida	500-800	2,000	500	>2,000	1,500-2,000	2,500-4,500	400-3,000

un mayor voltaje. Por otro lado, respecto a los ciclos de vida, las baterías que ofrecen peores resultados son las Ni-MH y las plomo-ácido. Por último, las baterías de litio son capaces de soportar hasta 3,000 ciclos, y las Na-S son las que ofrecen mejores resultados, soportando hasta 4,500 ciclos.

Teniendo en cuenta todos estos detalles, se entiende mejor porqué la tecnología que se ha impuesto en las baterías que incorporan los actuales vehículos eléctricos es la basada en iones de litio, ya que ofrecen las mejores prestaciones en casi todos los apartados.

2.7. Carga de vehículos eléctricos

Además de la autonomía, otro aspecto importante es la duración y características del proceso de recarga de las baterías. Para que los EVs se impongan definitivamente, será necesario que los usuarios puedan recargar sus vehículos de manera rápida y sencilla. Para ello, será imprescindible el despliegue de la infraestructura que lo permita. Esto implica facilitar la recarga en las viviendas, en la vía pública, y la creación de Estaciones de Carga Eléctrica que faciliten cargas rápidas durante los desplazamientos largos. A continuación, se expondrán los diferentes estándares o normas creadas para la recarga de vehículos eléctricos, comentaremos los diferentes modos de recarga definidos, así como los conectores que se han diseñado.

2.7.1. Modos de carga

A la hora de recargar los vehículos eléctricos nos podemos encontrar diferentes estándares, que vendrán determinados, principalmente, por la región en la que nos encontremos. Más concretamente, en Norteamérica y en la zona del Pacífico

CAPÍTULO 2. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS: TECNOLOGÍAS Y RETOS

Cuadro 2.4: Clasificaciones de carga de SAE-J1772 [SAE09]

Nivel de Carga	Voltios	Corriente máxima (Amperios)	Potencia máxima
AC Level 1	120 V ac	16 A	1.9 kW
AC Level 2	240 V ac	80 A	19.2 kW
DC Level 1	200 to 500 V dc	80 A	40 kW
DC Level 2	200 to 500 V dc	200 A	100 kW

se utiliza el estándar SAE-J1772 para la recarga de los vehículos eléctricos. Sin embargo, en China se utiliza el GB/t 20234, mientras que en Europa se utiliza el IEC-62196. La principal diferencia entre estos tres estándares es que mientras los dos primeros clasifican los modos de recarga según el tipo de corriente (continua o alterna), el último los clasifica por la potencia de recarga.

El SAE-J1772 [SAE09] es un estándar norteamericano para conectores eléctricos para la recarga de vehículos eléctricos creado en 1996 y mantenido por SAE International. Este estándar es el más común en EEUU y Japón, y establece los siguientes modos de recarga (ver Tabla 2.4):

- **AC Level 1.** Toma de corriente estándar que proporciona voltaje en AC de 120 V ofreciendo una intensidad máxima de 16 A, lo que proporciona una potencia máxima de 1.9 kW.
- **AC Level 2.** Toma de corriente estándar con 240 V AC y una intensidad máxima de 80 A, por lo que ofrece una potencia máxima de 19.2 kW.
- **DC Level 1.** Cargador externo que introduciendo un voltaje máximo de 500 V DC con una intensidad máxima de 80 A, proporciona una potencia máxima de 40 kW.
- **DC Level 2.** Cargador externo que introduciendo un voltaje máximo de 500V DC con una intensidad máxima de 200 A, proporciona una potencia máxima de 100 kW.

El IEC-62196 es un estándar internacional creado por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en 2001 para la recarga de vehículos eléctricos en Europa y en China. El IEC-62196 establece las características generales del proceso de carga, así como la manera en que se suministra la energía. Esta norma deriva del IEC-61851 y proporciona una primera clasificación del tipo de cargador en función de su potencia nominal y, por lo tanto, del tiempo de recarga [SBDP⁺15, SAR]. Para recargar los vehículos dispone de 4 modos (ver Tabla 2.5).

- **Modo 1 (Carga lenta).** Está pensado como modo de recarga doméstico, tiene una intensidad máxima de 16 A, y usa una toma de corriente estándar, ya sea monofásico o trifásico, con fase (s), neutro y conductores de tierra de protección.

2.7. CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Cuadro 2.5: Clasificaciones de carga de la IEC-62196 [SAR, IEC]

Modo de carga	Fase	Corriente máxima	Voltaje máximo	Potencia máxima	Conector específico
Modo 1	AC Single AC Three	16 A	230-240 V 480 V	3.8 kW 7.6 kW	No
Modo 2	AC Single AC Three	32 A	230-240 V 480 V	7.6 kW 15.3 kW	No
Modo 3	AC Single AC Three	32-250 A	230-240 V 480 V	60 kW 120 kW	Yes
Modo 4	DC	250-400 A	600-1,000 V	400 kW	Yes

- Modo 2 (Carga semi-rápida).** Este modo puede ser utilizado en el domicilio o en sitios públicos. Su intensidad máxima definida es de 32 A, y al igual que en el modo anterior, utiliza tomas de corriente estandarizadas con fase (s), neutro y conductores de tierra de protección.
- Modo 3 (Carga rápida).** Proporciona una intensidad de entre 32 y 250 A. En este modo de recarga se requiere la utilización de un EV Supply Equipment (EVSE), un sistema de alimentación específico para la recarga de vehículos eléctricos. Estos dispositivos proporcionan comunicación con los vehículos, monitorizan la carga, incorporan sistemas de protección y cortan el suministro eléctrico cuando no se detecta conexión con el vehículo.
- Modo 4 (Carga ultra-rápida).** Publicado en el IEC-62196-3, define una conexión directa del EV a la red de suministro de DC, con una intensidad de corriente de hasta 400 A y un máximo de 1,000 V, lo que proporciona una potencia de recarga máxima de hasta 400 kWh. Este modo requiere de un cargador externo, que proporciona comunicación entre el vehículo y el punto de recarga, así como sistemas de protección y control.

El estándar GB/T-20234 fue creado por la Guobiao Standards (GB) para infraestructuras de carga para vehículos eléctricos en China. Aunque en un inicio China adoptó el estándar europeo IEC-62196, se está fomentando la utilización de estándares propios como el GB/T-20234, que fue pensado para realizar cargas rápidas. Este estándar clasifica los modos de recarga entre AC y DC, tal y como se puede observar en la Tabla 2.6, donde se muestran los voltajes y amperajes definidos.

A nivel comparativo se puede observar como el único estándar que todavía incluye un modo de recarga a 120 V es el SAE-J1772, ya que el resto de estándares, incluso en sus modos de carga más bajo, funcionan a un voltaje superior. En sus modos más potentes, el SAE-J1772 también es el estándar que ofrece un menor voltaje (500 V) frente a los 1,000 V que ofrecen el IEC-62196 y el GB/T-20234.

Respecto al amperaje, el estándar que ofrece una menor intensidad de corrientes es el GB/T-20234 con 10 A frente a los 16 A ofrecidos por los otros dos estándares. Sin embargo, en sus modos más potentes es el SAE-J1772 el que ofrece

CAPÍTULO 2. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS: TECNOLOGÍAS Y RETOS

Cuadro 2.6: Clasificación de carga del GB/T-20234 [Chi]

Modo	Estándar	Voltaje nominal	Corriente nominal	Potencia máxima
AC Charging	GB/T-20234.2-2015	250 V 440 V	10 A 16 A 32 A 16 A 32 A 63 A	27.7 kW
DC Charging	GB/T-20234.3-2015	750-1,000 V	80 A 125 A 200 A 250 A	250 kW

una intensidad máxima menor, con 200 A frente a los 250 A del GB/T-20234 y los 400 A del IEC-62196.

En lo relativo a los modos de recarga basados en corriente alterna, el estándar que ofrece una menor potencia de recarga es el SAE-J1772 con 1.9 kWh frente a los 2.5 kWh del GB/T-20234 y los 3.8 kWh del IEC-62196. El estándar que ofrece una mayor potencia es el IEC-62196 con 120 kWh, frente a los 27.7 kWh del GB/T-20234 y los 19.2 kWh del SAE-J1772. Algo similar ocurre en los modos de recarga basados en corriente continua, en el que el IEC-62196 es el estándar que ofrece la mayor potencia de recarga máxima con 400 kWh, frente a los 250 kWh del GB/T-20234 y los 100 kWh que ofrece SAE-J1772.

También hay que destacar el caso de Tesla Company, que aunque no sea un estándar internacional en sí mismo, tiene sus propios puntos de recarga rápida para sus vehículos, denominados Supercharger Stations. Los Tesla superchargers funcionan en DC y se conectan a la batería mediante un sistema propio, cuyas patentes en su gran mayoría han sido liberadas. Aunque tienen una potencia de recarga máxima de 145 kWh, actualmente dicha potencia está limitada a 120 kWh, lo que permite recargar la mitad de la batería de un Model S en 20 minutos, o el 80 % en media hora [Tes18]. Aunque Tesla afirma que sus superchargers son puntos de recarga ultra-rápidos, si se utilizan los criterios del IEC-62196 (ver Tabla 2.5) y con las limitaciones actuales, estos puntos de recarga serían equivalentes a un Modo 3 o de carga rápida.

Los Tesla Supercharger Stations están siendo instalados en las principales rutas cada 200 km. En la actualidad ya cuenta con 1,191 estaciones y un total de 9,184 superchargers [Tes]. Además, los usuarios de esta marca disponen de 400 kWh de recarga gratuita, suficiente para unos 1,600 km, una estrategia que busca incentivar a los usuarios en la compra de sus vehículos.

2.7.2. Conectores

Los vehículos eléctricos tienen en su interior un convertidor para transformar la corriente alterna de la red eléctrica en corriente continua, que es la que realmen-

2.7. CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

te se almacena en las baterías del vehículo. Si este proceso, junto con el efecto de resistencia interna de las baterías se realiza con intensidades de recarga altas, puede producir aumentos importantes de temperatura. Los vehículos permiten recargarse mediante la utilización de enchufe tradicional, como puede ser el Schuko en Europa, pero si se desea recargar con mayor potencia se deben utilizar Electric Vehicle Charging Stations (EVSEs), que permiten suministrar directamente corriente continua a las baterías, realizando la transformación de corriente alterna a continua, fuera del vehículo. Estos sistemas suministran electricidad a través de unos conectores, que aportan las siguientes ventajas:

- Suelen ser soluciones estancas, a los que el agua o la humedad no les afectan.
- Llevan un bloqueo mecánico o electrónico.
- Incorporan sistemas de comunicación con el vehículo.
- Hasta que no se activa el bloqueo, no se suministra electricidad.
- Mientras esté activado el bloqueo no se permite que el vehículo se ponga en marcha, por lo que un vehículo no puede irse mientras esté enchufado.
- Algunos conectores permiten recargar en modo trifásico.

En la actualidad existe una gran gama de conectores para la recarga de vehículos eléctricos. Estos conectores vienen definidos por los diferentes estándares: la SAE (Society of Automotive Engineers) se encarga de su normalización en EE.UU. y en una parte de los países del Pacífico, la IEC es la responsable de su normalización en una gran parte de los países del mundo, principalmente en Europa, y la Guobiao Standards (GB) es la encargada de la estandarización en China. Además, inicialmente los productores de vehículos franceses apostaron por su propio conector, de la misma manera que los fabricantes japoneses crearon el suyo propio.

Los conectores del J1772-2009 incluyen diferentes niveles de protección, pudiéndose incluso utilizar en condiciones de lluvia. En su versión AC (ver Figura 2.6a) fue diseñado para sistemas eléctricos monofásicos con 120 V o 240 V, y consta de 5 pins:

- **AC pins**, que utiliza 2 pins para proporcionar corriente al vehículo (fase y neutro).
- **Conexión a tierra**, que como medida de seguridad, conecta la instalación eléctrica con tierra.
- **Detección de proximidad**, que impide que el vehículo se pueda mover mientras esté enchufado.
- **Control Pilot**, que permite la comunicación con el vehículo.

Existe una segunda versión del conector que está pensada para realizar una carga rápida. Esto permite que el tiempo de recarga pueda reducirse drásticamente,

pudiendo recargar las baterías de un vehículo al 80 % en 20 minutos. Este conector, denominado Combined Charging System (CCS), permite realizar tanto AC carga lenta o carga rápida de DC, y su aspecto es muy similar a la versión AC, pero con dos pins adicionales para cargar en DC (Ver Figura 2.6b).

El estándar IEC-62196 adoptó las especificaciones de los conectores de la norma IEC 60309, incluyéndolos en su segunda versión (IEC-62196-2), que fue publicado por el IEC en octubre de 2011. Más concretamente, propone cuatro tipos de enchufes:

- **Type 1 (SAE-J1772-2009) Yazaki.** Con el objetivo de buscar un conector único, común y estandarizado, el Type 1 AC charging, además de estar incluido en el estándar SAE-J1772, también fue incluido en el IEC-62196-2. De hecho, este conector se encuentra comúnmente en equipos de carga para EVs en América del Norte y Japón [Pho15], y es el utilizado por una gran cantidad de vehículos, como por ejemplo el Nissan Leaf, el Chevrolet Volt, el Toyota Prius Prime, el Mitsubishi i-MiEV, el Ford Focus Electric, el Tesla Roadster, y el Tesla Model S. Este conector puede verse en la Figura 2.6a.

- **Type 2 (VDE-AR-E 2623-2-2) Mennekes.** Es un conector alemán de origen industrial que no fue creado específicamente para EVs (ver Figura 2.6c). En monofásico está limitado a 230 V, pero en modo trifásico es capaz de soportar altos voltajes e intensidades. Este conector dispone de siete pins, cuatro para corriente (en modo trifásico), toma de tierra, y dos pins para comunicarse con el vehículo (bloqueo y comunicaciones). Un ejemplo de vehículo que usa este conector es el Renault Zoe, capaz de recargar con el conector Mennekes a 43 kWh.

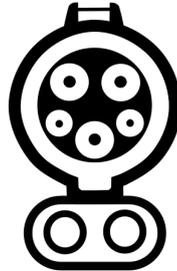
Aunque en un principio no se ideó para cargas rápidas, el Type 2 también incluye otro conector, denominado Combined Charging System (CSS) (Ver Figura 2.6d), que básicamente es un Mennekes adaptado para poder suministrar corriente continua capaz de proporcionar hasta 400 A a 1000 V, lo que supone una potencia de recarga de hasta 400 kWh [Men10, Ele10].

- **Type 3 (EV Plug Alliance connector) Scame.** conector monofásico y trifásico, creado por la EV Plug Alliance en 2010. Proporciona 230 V / 400 V y desde 16 hasta 63 A [Sca10]. Francia e Italia propusieron el uso de este conector para sus vehículos (ver Figura 2.6e), pero debido a la escasa aceptación y que Renault, marca que los utilizaba dejó de incorporarlo en favor de los conectores de Tipo 2, la producción de conectores Tipo 3 ha sido finalmente abandonada.

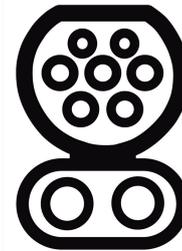
- **Type 4 (EVS G105-1993) CHAdeMO.** Promovido por TEPKO (Tokio Electric Power Company), se encuentra comúnmente en los equipos de carga de EVs en Japón, aunque también es utilizado en Europa y USA (ver Figura 2.6f).

CHAdeMO "CHARge de MOve" está pensado para proporcionar cargas rápidas en DC. En sus primeras versiones soportaba hasta 400 V, iniciando la recarga con hasta 200 A, reduciendo la intensidad conforme se recarga

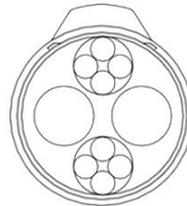
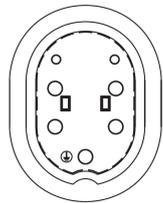
2.7. CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS



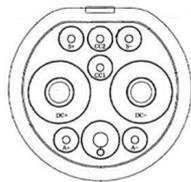
(a) J1772-2009 Type 1 for AC charging (b) J1772-2009 Type 2 for AC/DC charging



(c) IEC-62196 Type 2 (Mennekes) (d) IEC-62196 Type 2 (Mennekes CSS)



(e) IEC-62196 Type 3 (Scame) (f) IEC-62196 Type 4 (CHAdeMO)



(g) GB/t 20234 fast charging connector (h) Tesla connector for United States

Figura 2.6: Conectores para EVs.

el vehículo. En la actualidad, ya se han creado cargadores CHAdeMO con 150kW de potencia, y tienen el objetivo de poder hacerlo a 350 kW en 2018 [CHA16]. Este conector tiene diez pins, dos para DC Power supply, una toma de tierra y siete pins para la comunicación con la red.

A fecha de 8 de febrero de 2018, existían 7,133 puntos de CHAdeMO en Japón, 6,022 en Europa y 2,290 en USA [CHA]. En la actualidad está incorporado en numerosos vehículos, como por ejemplo en el Nissan Leaf, el Nissan e-NV200, el Mitsubishi i-MiEV y el KIA Soul EV.

En cuanto al estándar GB/t 20234 utilizado en China, una característica diferenciadora de éste frente a los SAE-J1772 e IEC-62196, es que mientras éstos últimos utilizan el mismo protocolo de comunicación entre el vehículo y el cargador, el estándar chino opera con uno distinto, lo que provoca que estos sistemas de recarga sean incompatibles [Int15].

El GB/t 20234 contempla dos tipos de conectores. El conector utilizado para las cargas basadas en corriente alterna es físicamente el mismo que el utilizado en el IEC Tipo 2 o Mennekes (ver Figura 2.6c), aunque al utilizar protocolos distintos no son compatibles con los vehículos europeos que utilicen el mismo conector. Para realizar cargas basadas en corriente continua, el estándar define un conector propio (ver Figura 2.6g).

Finalmente, Tesla utiliza dos conectores distintos para la recarga rápida de sus vehículos, teniendo en cuenta si el vehículo circula en Europa (ver Figura 2.6c) o en Estados Unidos (ver Figura 2.6h). En concreto, para el conector Europeo Tesla ha adoptado el conector Mennekes, aunque ligeramente modificado para poder realizar tanto recargas domésticas (AC), como recargas ultra-rápidas (DC) en sus Superchargers. Para Estados Unidos, Tesla diseñó un conector propio.

2.8. Retos de la investigación y oportunidades abiertas

Aunque el desarrollo y evolución de los vehículos eléctricos ha sufrido un gran crecimiento, especialmente en los últimos años, en esta sección comentaremos los aspectos que en nuestra opinión todavía quedan pendientes, o que pueden ser interesantes explorar para proponer nuevas soluciones.

Básicamente, hemos agrupado estas oportunidades en tres campos: (i) el uso de nuevas tecnologías en la fabricación de baterías, (ii) la mejora y optimización del proceso de recarga, y (iii) el uso de las comunicaciones y la Inteligencia Artificial en los vehículos eléctricos, tanto para la mejora de la movilidad, como para el uso eficiente de la infraestructura de carga.

2.8.1. Nuevos desafíos y tecnologías en baterías para EVs

Como ya hemos comentado anteriormente en la Sección 2.6, las baterías son uno de los componentes más importantes de los EVs, y claramente el más importante en los BEVs, donde suponen una gran parte del coste total del vehículo, y además, afectan de forma directa a sus prestaciones.

2.8. RETOS DE LA INVESTIGACIÓN Y OPORTUNIDADES ABIERTAS

La mejora en términos de durabilidad, en la densidad de carga, en los procesos de carga y descarga, y sobre todo de la autonomía, han provocado que se dediquen multitud de recursos y esfuerzos en el desarrollo de nuevas tecnologías que puedan superar a las actuales baterías de iones de litio, que son las que se utilizan de forma masiva en los vehículos actuales.

En nuestra opinión, todavía queda trabajo por hacer en este campo, fundamentalmente debido a su impacto, ya que la mejora de las baterías puede acelerar de forma notable el éxito y la total implantación de este tipo de vehículos a nivel mundial. En la actualidad, se está investigando en nuevas tecnologías y componentes. Algunas de ellas son las siguientes:

- **Lithium iron phosphate (LiFePO₄)**. Este tipo de baterías no destaca por tener la mayor densidad energética (aproximadamente 220 Wh/l), pero sin embargo tienen a su favor una gran durabilidad (son capaces de soportar entre 2,000 y 10,000 ciclos), tolerando bien las altas temperaturas.
Aunque este tipo de baterías se están comenzando a probar en EVs [Mil10], todavía se encuentran en una etapa inicial de desarrollo e investigación. Investigadores del MIT, han conseguido reducir su peso y han desarrollado una celda-prototipo que puede cargarse completamente en sólo 10-20 segundos, un tiempo muy reducido si lo comparamos con los 6 minutos necesarios para las celdas de baterías estándar [Ene09].
- **Magnesium (Mg-ion)**. Estas baterías cambian el uso de litio por el de magnesio, consiguiendo almacenar más del doble de carga y aumentando su estabilidad. Se espera que puedan tener una densidad energética de 6.2 kWh/l [ZKF17], lo que supondría 8.5 veces más que las mejores baterías de litio, que actualmente son capaces de suministrar hasta 0.735 kWh/l. Organizaciones como la Energy's Advanced Research Projects Agency for Energy (ARPA-E), Toyota, o la NASA están investigando en este tipo de baterías [See, NAS].
- **Lithium-metal**. En estas baterías se sustituye el ánodo de grafito por una fina capa de metal de litio. Este tipo de batería es capaz de almacenar el doble de energía que una batería de litio tradicional [Rev15]. SolidEnergy Systems, una startup del MIT, ya ha comenzado a comercializar este tipo de baterías en drones, y se espera que a lo largo de 2018 puedan incluirse en EVs [Rev16]. Las baterías de lithium-metal tienen una alta eficiencia Coulombica (superior al 99.1%), soportan más de 6,000 ciclos de recarga, y después de 1,000 ciclos mantienen una eficiencia Coulombica promedio de 98.4% [QHX⁺15].
- **Lithium-air (Li-air)**. Este tipo de baterías necesitan un flujo constante de oxígeno para realizar la reacción con el litio. Fueron propuestas inicialmente en los años 70, aunque ha sido más recientemente cuando se han empezado a desarrollar y mejorar. Se espera que su energía específica esté cercana a los 12 kWh/kg [KGN⁺14] (casi 45 veces las actuales de litio), lo que supondría estar al mismo nivel que la gasolina.

- **Aluminum-air.** Las baterías desarrolladas con esta tecnología, producen electricidad a partir de la reacción del oxígeno con el aluminio. Su principal ventaja es que se consiguen densidades energéticas muy grandes, alcanzándose los 6.2 kWh/l [GSEE14], lo que permite obtener una mayor autonomía (hasta 1,600 km) [Ext]. El precio de este tipo de baterías está disminuyendo, situándose en la actualidad en 300 €/kWh [Ene], y tienen la ventaja de que son reciclables.
- **Sodium-air (Na_2O_2).** La empresa BASF ha creado una batería de Sodio-aire con una densidad de energía de 4.5 kWh/l [AHB⁺15]. En vehículos eléctricos, permite multiplicar al menos por trece, la autonomía de las actuales baterías de litio [Cle13]. Una gran ventaja de este tipo de baterías es que el sodio es el sexto elemento más abundante en nuestro planeta [Phy13].
- **Graphene.** El grafeno es una sustancia formada por carbono puro que tiene una alta conductividad térmica y es extremadamente ligero (una lámina de 1 metro cuadrado pesa 0.77 mg) [Ceb13]. Se espera que con este material se puedan construir supercondensadores de Grafeno. Uno de los puntos fuertes de este tipo de baterías es que se calienta muy poco al conducir electrones, lo que facilitaría la cargas rápidas o ultra-rápidas evitando las pérdidas energéticas por calor.

Graphenano, una empresa española, ha creado una batería de grafeno que introducida a un GTA Spano (900 hp) ha sido capaz de recorrer 800 kilómetros [Gar16]. Adaptadas a un Tesla Model S, este vehículo pasaría de tener 334 km a 1,013 km de autonomía. En un enchufe de alta potencia esta batería podría recargarse en 5 minutos. Este tipo de baterías están en una fase muy inicial de desarrollo, aunque se espera que se comercialicen a partir del año 2020. Existen prototipos de baterías de grafeno con una energía específica de 1 kWh/kg, y se espera que pronto se alcancen los 6.4 kWh/kg [KPHK14].

Consideramos que la tecnología que aumente la autonomía de los EVs (al menos a un nivel similar al de los actuales vehículos de combustión interna), y sobre todo que permita reducir considerablemente el tiempo necesario para la recarga completa (aunque sean ligeramente mayores al tiempo que necesitamos en rellenar el depósito de nuestros vehículos tradicionales), será la que se impondrá finalmente en el mercado.

2.8.2. Mejoras en el proceso de recarga

En este apartado, nos centramos en el proceso de recarga, un aspecto muy relacionado con las baterías, y también crucial en el campo de los vehículos eléctricos, ya que es muy importante facilitar a los usuarios que puedan recargar sus vehículos no sólo en sus domicilios, sino también durante sus viajes, haciendo posible que los EVs puedan recorrer distancias más largas.

Uno de los problemas más importantes a la hora de recargar un vehículo eléctrico es el conector. Los mercados americano y japonés apuestan por los conectores propuestos por el estándar J1772, mientras que los vehículos europeos utilizan los

propuestos por el IEC-62196. Esto puede provocar dificultades a los usuarios para cargar sus vehículos, la necesidad de comprar adaptadores, y generar dudas sobre con qué vehículo tendrán menos problemas a la hora de cargar sus baterías.

Este problema también se da en los puntos de recarga rápidos. Como ya hemos comentado anteriormente en la Sección 2.7.2, actualmente existen tres tipos de conectores estándar para realizar cargas rápidas: (i) el CCS recogido en el J1772, (ii) el CHAdeMO incorporado en IEC-62196 y (iii) el GB/T, al que también habría que añadir el utilizado por Tesla en sus supercargadores. Aunque Tesla, por ejemplo, ha optado porque alguno de sus vehículos soporte más de un tipo de cargador, parece más interesante avanzar en la creación de un estándar unificado, que permita recargar todos los vehículos mediante un conector único.

Otro aspecto que puede revolucionar el proceso de recarga es aplicar algoritmos inteligentes para optimizar las recargas, ya sea desde el punto de vista de reducir el coste de las mismas, o para mejorar el uso de la infraestructura eléctrica. En la actualidad, la recarga se inicia normalmente justo en el momento en que el vehículo se conecta al puesto de recarga (lo que habitualmente se conoce como Plug&Charge). Sin embargo, el precio de la electricidad varía durante el día en la mayoría de países, por lo que se podría adaptar el inicio de la recarga para reducir sensiblemente el coste de recargar el vehículo, aprovechando los periodos de demanda valle y evitando los periodos de alta demanda (donde el coste económico es mayor). La implantación de enchufes inteligentes (o que los propios vehículos incorporen dicha "inteligencia") podrá ayudar a que los EVs se impongan definitivamente a los vehículos tradicionales de combustión interna. Aunque ya han aparecido propuestas en este sentido [ZTW17, GÁGV18, TSSM⁺18a], consideramos que todavía queda bastante trabajo por hacer en este campo, ya que el uso de comunicaciones entre los vehículos y la infraestructura eléctrica, así como de nuevas técnicas basadas en la Inteligencia Artificial, permitirán mejorar y facilitar el proceso de recarga, además de reducir su coste económico.

En el caso de los garajes comunitarios o públicos, consideramos que también se pueden aplicar técnicas adaptativas de carga basadas en el contexto. Dado que la infraestructura disponible puede estar limitada para abastecer todos los puntos de recarga a la vez (sobre todo en garajes privados comunitarios), se podrían proponer sistemas de balanceo de recarga, que teniendo en cuenta la potencia contratada y la demanda acumulada de todos los puntos en un momento dado, se administre de manera inteligente y eficiente qué puntos de recarga deberán recargar en cada momento y con qué potencia. La idea es poder satisfacer las necesidades de recarga, en entornos con recursos limitados, algo que sin duda puede suceder una vez que los EVs incrementen notablemente sus ventas.

2.8.3. Comunicaciones e IA en los vehículos eléctricos

Tal y como hemos comentado con anterioridad, para que los vehículos eléctricos se desplieguen totalmente y pasen a ser el medio de transporte mayoritario en nuestras ciudades y carreteras, será necesario que confluayan diversos factores.

Obviamente, el desarrollo que están sufriendo en los últimos años, en términos de autonomía, potencia, tecnología, confort y también en atractivo estético, están ayudando a que los compradores los valoren como una posibilidad real a la hora de

adquirir un nuevo vehículo. Aunque el precio es ligeramente más alto (en algunos modelos la diferencia respecto a la versión con motor de combustión es notable), las ayudas a la compra y las ventajas fiscales están también ayudando a reducir la brecha existente.

Sin embargo, existen otros aspectos que son también vitales, pero que todavía quedan por mejorar para allanar el camino a los vehículos eléctricos. El primero de ellos es el despliegue en todo el territorio de estaciones de recarga de vehículos eléctricos. A día de hoy, sobre todo en España, el número de puntos de recarga es más bien escaso, lo que sin duda frena a los compradores. Consideramos que hay que hacer un esfuerzo mayor en mejorar la infraestructura de recarga. Además, el tiempo necesario para recargar completamente las baterías de estos vehículos, debe ser reducido considerablemente para que los usuarios vean cada vez más atractivos los vehículos eléctricos.

Afortunadamente, pensamos el uso de las comunicaciones vehiculares y la Inteligencia Artificial (IA) puede servir de catalizador que acelere notablemente la implantación real del nuevo transporte más ecológico y sostenible.

Las redes inalámbricas de comunicación entre vehículos, en sus dos variantes (V2V y V2I), van a permitir que todos los vehículos dispongan de un sistema de comunicación que integre las diferentes tecnologías de red disponibles en la actualidad y que puedan comunicarse entre ellos y su entorno. Si a las nuevas capacidades de comunicación, le unimos el uso de algoritmos basados en IA que permitirán dotar a los vehículos con cierta inteligencia, tendremos ante nosotros muchísimas nuevas posibilidades que van a revolucionar los futuros sistemas de transporte.

Aplicaciones que sugieran al conductor nuevas rutas para que el desplazamiento sea lo más rápido y seguro posible, la reducción del consumo de combustible y por lo tanto de las emisiones de contaminantes, así como la de facilitar la asistencia en carretera en caso de accidente, son ya prácticamente una realidad.

El uso de comunicaciones e IA va a permitir que aparezcan nuevas soluciones que: (i) faciliten el proceso de recarga de baterías (reserva anticipada de puntos de recarga, balanceo automático de la energía, recargas adaptativas basadas en el contexto, etc.), (ii) que mejoren el proceso de generación de electricidad para satisfacer la gran demanda eléctrica que se producirá (predicción de la energía necesaria en cada momento, análisis de la movilidad de los EVs, etc.), así como (iii) que aceleren el proceso de transición la conducción asistida, a la completa conducción autónoma.

Nos encontramos pues, muy cerca de la aparición del concepto del Internet of EVs (IoEVs), que sin duda va a cambiar radicalmente la forma en la que nos movemos, pero que también va a abrirnos un nuevo mundo de posibilidades, tanto a nivel de investigación, como de aplicaciones y servicios.

2.8.4. Recargas eco y sostenibilidad

A diferencia de los tradicionales vehículos de combustión interna, los vehículos eléctricos siempre han aparecido como modelo de sostenibilidad y de respeto al medio ambiente, debido sobre todo a que no emiten sustancias nocivas para la salud. Sin embargo, dicha sostenibilidad no está limitada únicamente al uso de

los vehículos híbridos o eléctricos. Tanto su diseño, las materias primas utilizadas, toda la logística relacionada, los métodos y el tipo de energía utilizados en la fabricación de esos vehículos, así como la huella energética durante su uso y el posterior reciclaje de sus componentes influyen en el círculo de la sostenibilidad.

El uso de energías renovables, tanto para la fabricación como para la recarga de los vehículos eléctricos, es desde luego, un aspecto a tener en cuenta. Especialmente para las recargas, este tipo de energía (fundamentalmente las energías solar y eólica) puede ser almacenada para ser utilizada en los periodos de alta demanda, o bien para abaratar el precio de las recargas [SV11, VDVL14, HSCBJ13, VKC⁺13, SH14].

2.9. Conclusiones

En este capítulo se ha analizado los tipos de EVs, la tecnología que utilizan, las ventajas respecto al vehículo tradicional, la evolución de sus ventas en los últimos años, así como los modos de recarga y sus futuras tecnologías.

En los EVs, las baterías son un factor crítico, ya que éstas determinarán su autonomía. En este capítulo se han analizado las características de diferentes tipos de batería. También se han analizado algunas de las posibles tecnologías que podrían ser utilizadas en el futuro, tecnologías como el grafeno, el cual se espera que pueda ser una solución que permita almacenar una gran cantidad de energía, además de cargarse en una cantidad inferior de tiempo. El EV podría beneficiarse de este tipo de tecnologías, consiguiendo una mayor autonomía, algo que podría ayudar a su implantación.

El desarrollo de mejores baterías también favorecerá que se utilicen modos de recarga más rápidos y potentes. Otro aspecto que podría favorecer la implantación de este tipo de vehículos es la creación de un conector único, que se pueda utilizar de manera global. El EV tendrá un papel muy importante en las Smart Cities del futuro, y poder tener diferentes estrategias de recarga que se adapten a los usuarios será de especial importancia.

Capítulo 3

Predicción de la Demanda de Energía de Vehículos Eléctricos Mediante el Uso de Redes Vehiculares

Las Smart Cities pueden suponer un salto en la calidad de vida de los ciudadanos. Estas ciudades son el resultado de la aplicación y combinación de las tecnologías de la información (TIC) y el llamado Internet de las cosas (IoT) en nuestras ciudades. El vehículo eléctrico puede ser un actor importante en este tipo de ciudades. La combinación de estos tres elementos permitirá un funcionamiento más eficiente, integrado y previsible.

En este capítulo, se propone una arquitectura integral basada en las tecnologías de comunicación vehicular, considerando las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V) y vehículo a infraestructura (V2I). Además, se presenta un estudio sobre la carga de EVs. Esta propuesta aborda tres cuestiones principales: (i) el conocimiento de la cantidad de vehículos que recargarán sus baterías en un punto particular e instantáneo, (ii) el conocimiento de los puntos de recarga disponibles y (iii) la predicción de la demanda de electricidad. Los resultados obtenidos muestran que este sistema puede predecir la cantidad de electricidad que los vehículos eléctricos necesitarán para recargar sus baterías con una antelación de hasta 180 minutos.

3.1. Introducción

El uso masivo de vehículos ha aumentado los niveles de contaminación debido a la cantidad de gases de efecto invernadero asociados a la combustión de combustibles fósiles. Por lo tanto, como se esperaba, reducir las emisiones de CO₂ es un desafío importante que enfrentan las autoridades de la Unión Europea, que han expresado su disposición a reducir las emisiones de carbono hasta el 40% para 2030 [The14].

CAPÍTULO 3. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS MEDIANTE EL USO DE REDES VEHICULARES

El concepto *movilidad sostenible* surgió para establecer un conjunto de políticas para reducir el consumo de combustibles fósiles, buscar una mayor eficiencia energética y alentar el uso de fuentes alternativas de energía. Estas políticas deben cumplir los siguientes criterios en términos de sostenibilidad: (i) *Económica*, satisfaciendo la necesidad de una movilidad eficiente y promoviendo la competitividad, (ii) *Social*, promoviendo un transporte más saludable y cómodo, y (iii) *medioambiental*, protegiendo el medioambiente y optimizando el uso de recursos renovables.

Más de la mitad de la población mundial vive en áreas urbanas, y el movimiento de personas hacia estas áreas se espera que continúe durante las próximas dos décadas [CNW⁺12]. En España, en el año 2009, un 77.2% de la población vivía en ciudades y en el año 2050 se espera que ese porcentaje ronde el 86.5% [VSC11]. Esta acumulación de personas en áreas metropolitanas indica que nos encaminamos hacia mega-ciudades, en las cuales se van a generar nuevos problemas, como el aumento del tráfico, aglomeraciones y un mayor desarrollo de infraestructuras. Por otro lado, el desarrollo tecnológico y el aumento de dispositivos que se conectan a Internet, unido al desarrollo de la Inteligencia Artificial (IA), está acelerando la llegada de las Smart Cities o ciudades inteligentes [BAG⁺12].

Las Smart Cities buscan mejorar la calidad de vida, el desarrollo económico, la eficiencia, la sostenibilidad y la operatividad, tanto de instituciones y empresas como de sus habitantes, mediante el uso, coordinación e integración de manera inteligente de las tecnologías de la información y los sistemas de comunicación. Giffinger y Pichler-Milanović [GFK⁺07] describen las características que deben poseer las Smart cities y las agrupan en 6 criterios:

- **Economía:** espíritu innovador, imagen económica y marcas comerciales, productividad, flexibilidad, capacidad para transformar.
- **Movilidad:** Conducción autónoma, Sistemas Inteligentes de Transporte, transporte sostenible, innovador y seguro.
- **Medioambiente:** sostenibilidad de los recursos naturales, reducción de la contaminación y turismo ecológico.
- **Habitantes:** cualificación, formación continua, flexibilidad, conciliación familiar, creatividad y mente abierta.
- **Forma de vida:** viviendas inteligentes, mayor calidad de vida y mejores condiciones de salud.
- **Administración:** participación en la toma de decisiones, gobierno transparente, Gobierno 3.0.

Algunos aspectos clave en las Smart Cities son la movilidad y los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) [Toh07], que van a permitir mejorar varios aspectos, sobre todo a nivel de seguridad vial y confort de los pasajeros [WZZL12, Var93, MTC⁺10]. Sin embargo, su aplicación se está realizando a un ritmo más lento del deseado, debido a diferentes factores como la situación económica actual y el alto coste de algunos dispositivos.

Los Sistemas Inteligentes de Transporte pretenden mejorar la operación y seguridad del transporte terrestre mediante el uso de soluciones tecnológicas basadas en la informática y las telecomunicaciones. En 2010, la Directiva 2010/40/UE definió estos sistemas como aplicaciones avanzadas que, sin incluir la inteligencia como tal, proporcionan nuevas aplicaciones y servicios para la gestión del transporte.

Las redes vehiculares o redes inalámbricas de comunicación entre vehículos (VANET, Vehicular Ad-hoc NETWORKS) [MTC⁺12] están siendo utilizadas en la actualidad como una tecnología prometedora para mejorar la seguridad en las carreteras. Su objetivo prioritario es la formación de redes de comunicación entre vehículos (comunicación V2V) [MTC⁺11], así como entre los vehículos y la infraestructura de soporte (comunicación V2I) [BGF⁺12b]. Existen multitud de aplicaciones para este tipo de redes, entre las que destacamos:

- Mejora de la ruta a seguir en un desplazamiento.
- Control de la congestión del tráfico.
- Mejora de la seguridad vial.
- Alerta de colisión en cruces.
- Aviso a los vehículos de emergencia.

La combinación de los Sistemas Inteligentes de Transporte y las redes vehiculares son un campo en el cual se están realizando un gran número de investigaciones orientadas, por ejemplo, a conocer la densidad del tráfico [SFG⁺12] o mejorar la seguridad vial. Sin embargo, estos trabajos en su mayoría no suelen tener en cuenta a los vehículos eléctricos y sus características especiales, así como las nuevas oportunidades que éstos ofrecen.

Para una correcta implantación del vehículo eléctrico se deben contemplar sus singularidades, sobre todo a la hora de desplegar los futuros ITS. El uso de las comunicaciones vehiculares permitirá mejorar no sólo la seguridad vial o la gestión del tráfico a nivel global, sino que además podrá ayudar en el proceso de recarga de las baterías de los vehículos eléctricos (reduciendo el tiempo de conexión a la red y el coste asociado a las recargas). Además, permitirá facilitar a las empresas el proceso de generación de electricidad para satisfacer la gran demanda eléctrica que se producirá una vez implantado totalmente este tipo de vehículos.

Las ventas de vehículos eléctricos están aumentando considerablemente, haciéndolo de manera exponencial en todo el mundo. A la cabeza del sector encontramos países como Hong Kong, China, Estados Unidos, Holanda o Noruega. En este último país, 1 de cada 5 vehículos que se vendió en el año 2015 fue eléctrico.

Esta tendencia se espera que continúe los próximos años. La Figura 3.1 muestra la evolución de las ventas de este tipo de vehículos a nivel mundial y la proyección esperada para los próximos años según la International Energy Agency [Int], que prevé en torno a 8 millones de vehículos eléctricos en 2026.

Para un despliegue apropiado de vehículos eléctricos, se deben tener en cuenta sus singularidades particulares, especialmente cuando se tienen en cuenta los futuros Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). El uso de comunicaciones vehiculares no sólo mejorará la seguridad vial y la gestión del tráfico en todo el mundo,

CAPÍTULO 3. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS MEDIANTE EL USO DE REDES VEHICULARES

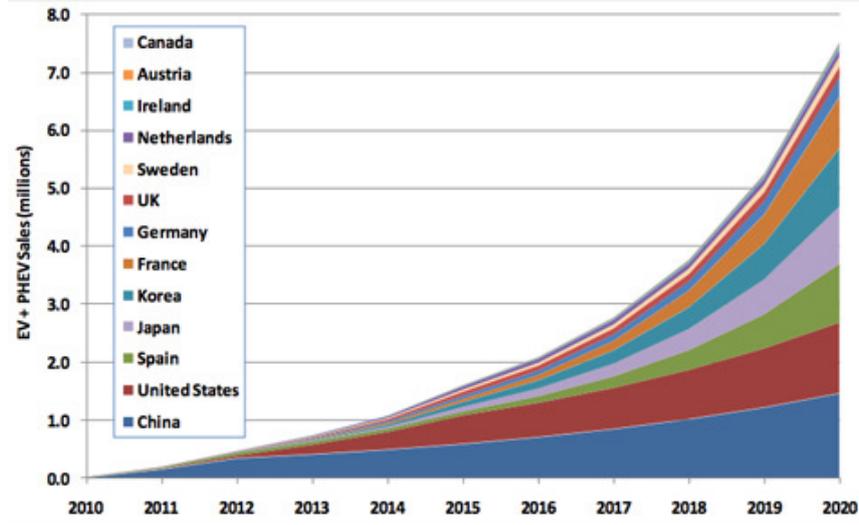


Figura 3.1: Previsión de ventas de vehículos eléctricos [Int].

sino que también ayudará en el proceso de recarga de las baterías de vehículos eléctricos (por ejemplo, proporcionar a la red inteligente conciencia sobre los requisitos energéticos y reducir el coste asociado con las recargas). Además, ayudará a las compañías eléctricas en el proceso de generar electricidad y transportarla a través de la red inteligente para satisfacer la gran demanda eléctrica asociada al despliegue masivo de este tipo de vehículos.

En este trabajo se consideraran vehículos eléctricos (EVs) aquellos 100% alimentados por electricidad y los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEVs), al tiempo que obviamos los vehículos eléctricos híbridos (HEVs), es decir, aquellos que combinan un motor de combustión fósil convencional con un sistema eléctrico, porque no requieren la presencia de ningún punto de recarga.

En este capítulo se propone una arquitectura, que se basa en las tecnologías de comunicación entre vehículos (V2V) [MTC⁺12], y entre vehículos e infraestructura (V2I) [BGF⁺12a], capaz de hacer estimaciones precisas de la demanda de electricidad de los EV, mientras ofrece a los usuarios la posibilidad de reservar un punto de recarga para sus vehículos. Específicamente, el sistema propuesto es capaz de: (i) determinar el número de vehículos que van a recargar sus baterías en un punto y momento particular; (ii) conocer la disponibilidad de puntos de carga, asignando los vehículos a los puntos de carga disponibles, y (iii) permitir que la red inteligente prediga la demanda de electricidad de los vehículos y actuar en consecuencia.

Por todo esto, en este capítulo se propone una arquitectura de comunicación que, sin despreciar los vehículos propulsados por combustibles fósiles, permita una mejor integración de los vehículos eléctricos en las Smart Cities del futuro mediante el uso de las redes vehiculares. El capítulo está organizado de la siguiente manera:

primero se presentarán los trabajos relacionados en la Sección 3.2, en la Sección 3.3 se presenta la arquitectura y sus componentes, tanto desde el punto de vista del vehículo (Sección 3.3.1), como la infraestructura necesaria para el procesamiento de los datos (Sección 3.3.2). En la Sección 3.4 se muestra el funcionamiento de la arquitectura junto con su protocolo de comunicación. La Sección 3.5 incluye las funcionalidades de la arquitectura y sus beneficios, tanto desde el punto de vista de los usuarios como de las empresas. En la Sección 3.6 se comenta el entorno de simulación implementado, así como los modelos matemáticos utilizados. En la Sección 3.7 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones. Por último, en la Sección 3.8 se exponen las conclusiones más importantes.

3.2. Trabajos relacionados

En la literatura, podemos encontrar varios trabajos que abordan los posibles problemas que el aumento masivo de EVs puede causar en la Smart Grid.

Una consecuencia inminente del despliegue mundial de vehículos eléctricos será la mayor demanda de electricidad. Con respecto a cómo cargar las baterías puede estresar el sistema de energía, Qian et al. [QZAY10] plantean este problema y presentan una metodología que tiene en cuenta tres escenarios diferentes: (i) carga no controlada, (ii) carga controlada evitando picos de demanda y (iii) carga inteligente. Los resultados mostraron que la carga no controlada puede causar problemas de congestión en la red local, mientras que el método de carga inteligente optimiza el tiempo de inicio de la carga de vehículos eléctricos, siendo el método más beneficioso tanto para el operador de red como para los usuarios de vehículos eléctricos. Andrade et al. [ACRC12] estudian la infraestructura eléctrica requerida en un punto de recarga, cuando se considera una alta penetración de estaciones de carga. El análisis se basa en la batería del vehículo y el modelado de la estación de carga utilizando la herramienta MATLAB Simulink.

Considerando la demanda de electricidad, Won et al. [WYL09] proponen un sistema capaz de predecir la futura demanda de electricidad. Su enfoque se basa en la fórmula de difusión de Bass y considera los datos de ventas de los vehículos de EE.UU. Un estudio sobre la demanda eléctrica nacional de Gran Bretaña, es presentado por Coldwell et al. [CSC13]. Los autores estudian el impacto de los EVs en la demanda de electricidad a nivel nacional. Su trabajo también tiene como objetivo determinar si los vehículos eléctricos tienen el potencial de proporcionar servicios auxiliares al operador de Smart Grid, y la capacidad requerida para dichos servicios. Los autores concluyen que los vehículos eléctricos tienen potencial técnico para ayudar en la administración de redes de energía sin agregar una demanda de energía significativa.

En cuanto a los beneficios que los EVs proporcionan a los usuarios, Faria et al. [FMDdA14] presentan una arquitectura de sistema para controlar dinámicamente la carga de vehículos eléctricos y mantener el funcionamiento adecuado de la red de distribución local. Según las preferencias del usuario, las características del sistema, el consumo y el pronóstico de generación renovable, el sistema propuesto puede asignar el intervalo de tiempo más adecuado para cargar cualquier vehículo eléctrico. Además, el sistema puede programar la carga de vehículos múltiples

en función de un nivel de prioridad calculado, manteniendo así una operación confiable de la red local inteligente. Sundstrom y Binding [SB10] presentan un nuevo método para planificar el cobro de EVs que tiene en cuenta las restricciones de Smart Grid. El método calcula un plan de cobro individual para cada vehículo que minimiza los costes de electricidad, al tiempo que evita congestionar la red de distribución y satisface los requisitos del usuario del vehículo individual. El método reduce significativamente la sobrecarga de la red eléctrica en comparación con los esquemas de carga que no consideran las restricciones de la red. Finalmente, Zhang et al. [ZCHC14] proponen un sistema para minimizar el tiempo medio de espera de los vehículos eléctricos y reducir el coste de recarga de la batería.

Hasta donde tenemos conocimiento, aunque los autores han estudiado el impacto de la energía eléctrica en las redes de electricidad, sólo algunos de ellos han propuesto soluciones o modelos para administrar la cantidad masiva de vehículos eléctricos en escenarios abarrotados. Además, ninguno de ellos ha propuesto el uso de comunicaciones vehiculares para mejorar el proceso de recarga de la batería. Con el modelo propuesto, gestionamos una posible aglomeración de vehículos, lo que redundaría en beneficio tanto de empresas como de usuarios, y aprovechamos la infraestructura existente, sin necesidad de una inversión adicional.

3.3. Arquitectura para la predicción de la demanda de energía

La arquitectura propuesta queda reflejada en la Figura 3.2. Como se observa, consideramos dos partes bien diferenciadas, la denominada Vehicle Side (Vside) y la Server Side (Sside). A continuación, pasamos a comentarlas en detalle.

3.3.1. Lado del vehículo (Vside)

En lo relativo a la Vside, el sistema requiere que cada vehículo esté provisto de una unidad de a bordo (OBU), que permite tanto la recogida de datos del vehículo, como las comunicaciones.

A diferencia de los vehículos tradicionales de combustión, esta OBU deberá tratar de minimizar la energía consumida, un aspecto especialmente crítico en los EVs. Otro de los objetivos de la OBU será proporcionar información a la Unidad de Control (UC), o Sside, mandando datos mediante la comunicación con la infraestructura (V2I). En caso de que el vehículo no tenga cobertura, los mensajes se enviarán a los vehículos cercanos (comunicaciones V2V), y posteriormente esos vehículos la harían llegar a la Sside mediante comunicaciones V2I.

Los componentes de este sistema son los siguientes:

- **GNSS (Global Navigation Satellite System)**, que es utilizado para obtener las coordenadas del vehículo. Este dato es necesario para estimar cuándo llegará el vehículo a su destino, y con qué nivel de batería, así como conocer el paradero del vehículo en caso de robo.

3.3. ARQUITECTURA PARA LA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA

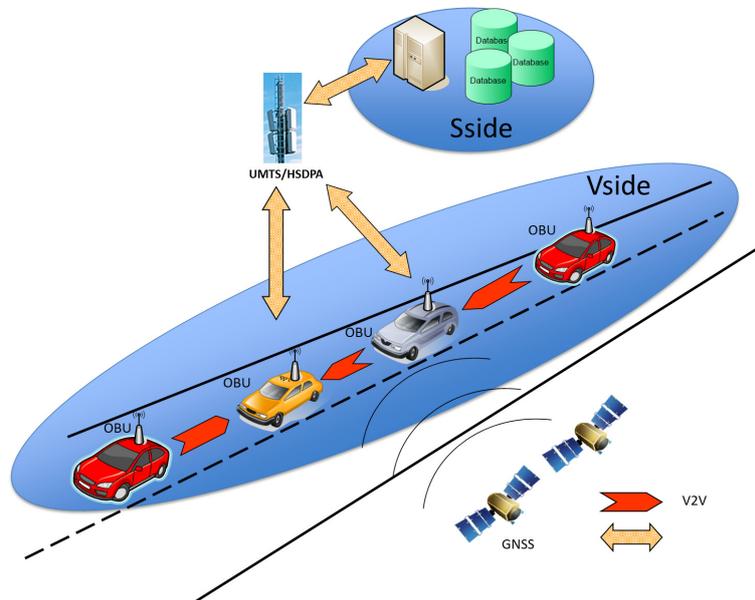


Figura 3.2: Arquitectura del sistema de predicción de la demanda de energía.

- **Dispositivo OBD-II**, que se utiliza para obtener información interna del vehículo, como por ejemplo el modelo de vehículo, el nivel de batería, código de avería, etc.
- **Dispositivo de comunicación**, necesario para poder enviar los datos a la Sside mediante el uso de tecnologías UMTS/HSDPA. En caso de no disponer de cobertura, los mensajes se enviarán utilizando el estándar 802.11p o WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments), para enviar la información a otros vehículos. Cuando alguno de estos vehículos disponga de conexión a Internet, éste enviará la información a la UC.

3.3.2. Lado del servidor (Sside)

La Server side (Sside), o Unidad de Control (UC), es la entidad encargada de recoger, administrar y procesar los datos enviados por los vehículos. La Unidad de Control, está compuesta por los siguientes componentes:

- **Módulo Servidor**, que es el encargado de obtener, analizar y procesar los mensajes de los vehículos.
- **Módulo DataWarehousing (DW)**. Para poder administrar toda la cantidad de datos que se generará, se hace necesario la utilización de sistemas distintos a las Bases de Datos Relacionales. Será necesario cambiar el sistema

CAPÍTULO 3. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS MEDIANTE EL USO DE REDES VEHICULARES

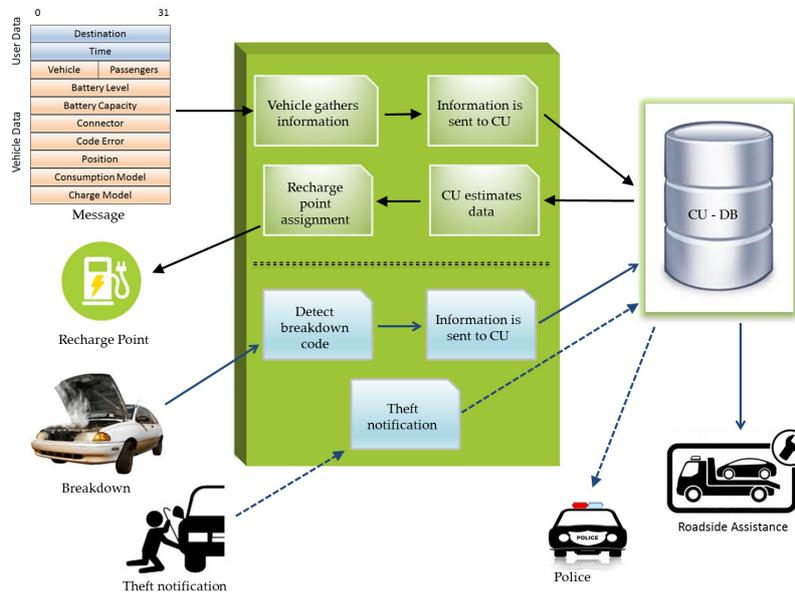


Figura 3.3: Diagrama de flujo del protocolo.

tradicional On-Line Transaction Processing (OLTP) por un sistema basado en DW.

3.4. Funcionamiento y protocolo

Para el correcto funcionamiento de la arquitectura se ha diseñado un protocolo de comunicación. La Figura 3.3 muestra el protocolo y su funcionamiento. En concreto, el funcionamiento del sistema sería el siguiente:

1. **Definir destino:** una vez que el usuario ha introducido el destino, éste se envía a la UC, junto con un conjunto de datos, como el nivel de batería, modelo, ocupantes y las coordenadas relativas a la posición actual. Los datos serán enviados mediante comunicación V2I o, en caso de no disponer de cobertura, mediante la comunicación V2V. La UC obtendrá los datos y estimará la hora de llegada a su destino, el nivel de batería, y realizará las notificaciones pertinentes.
2. **Reserva de punto de recarga:** en caso de ser requerido, un punto de recarga podrá ser reservado para el vehículo cuando llegue a su destino.
3. **Asistencia en carretera:** en caso de avería, el usuario podrá lanzar un aviso a la UC. En este caso, se enviará el código de error de la avería, y la UC enviará el dato al servicio de asistencia más cercano al usuario.

4. **Asistencia en accidente:** en caso de producirse un accidente, éste es detectado mediante un conjunto de sensores, enviando la gravedad del accidente y el número de ocupantes del vehículo.
5. **Localización del vehículo:** en caso de robo, una vez notificado a la UC, el vehículo comenzará a notificar periódicamente las coordenadas en las que se encuentra, facilitando su localización.

Un aspecto que puede llamar la atención respecto a la visión tradicional de las redes vehiculares es la ausencia de RSUs (Road-Side Units). Esto es debido a que la implantación de este tipo de infraestructura supone una importante inversión económica y requiere un tiempo de despliegue relativamente mayor. Por ello, nuestra propuesta se basa en el uso de Internet móvil, un sistema ya implantado.

Estas tecnologías están muy extendidas en la actualidad. De hecho, según el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, España dispone de cobertura con tecnología UMTS que alcanza la totalidad de la península [Min].

3.5. Aplicaciones

El objetivo de esta arquitectura es facilitar la integración del vehículo eléctrico en las Smart Cities del futuro, y por lo tanto se basa en la utilización de este tipo de vehículo como actor principal.

En esta sección, presentamos las diferentes aplicaciones que la arquitectura ofrece en una ciudad conectada e inteligente, basada en el Internet de las Cosas.

Para entender mejor los beneficios que supone el uso de la arquitectura, vamos a suponer por ejemplo, un gran centro comercial, donde además de las plazas de aparcamiento para vehículos tradicionales, existe una zona delimitada para los vehículos eléctricos. Desde el punto de vista de los usuarios supondrá los siguientes beneficios:

- **Reserva de puntos de recarga.** Dado que será posible conocer el momento en el que el usuario va a llegar al centro comercial, se podría reservar un punto de recarga para su uso.
- **Descuentos en el precio de la electricidad.** Al avisar con antelación, y disponer de información sobre el nivel de batería de cada vehículo, las empresas eléctricas pueden conocer en cada momento cuándo y cuánta energía van a tener que producir, lo que puede suponer un descuento en el precio de la electricidad.
- **Reducción del coste.** Dado que el sistema puede saber la necesidad de puntos de recarga, y el tiempo que un vehículo va a estar conectado, se puede planificar la recarga para realizarla en el momento en que la electricidad es más barata.
- **Asistencia en carretera.** Debido a que la OBU tiene acceso al OBD-II, en caso de avería, obtendrá el código interno del fallo, y enviará la información a la UC junto a la posición del vehículo. De esta manera el servicio de asistencia

en carretera será más rápido, eficiente y personalizado, pudiendo acelerar la reparación.

- **Asistencia en caso de accidente:** con la ayuda de sensores en el vehículo, la OBU obtendrá tanto los parámetros que permitirán la estimación de la gravedad de accidente como de la posición del vehículo. De esta forma los servicios médicos podrán conocer de antemano a lo que se enfrentan, e ir mejor preparados para asistir a los heridos. Asistir a un herido en la primera hora del accidente (hora de oro), en la cual se produce el 75 % de las muertes por accidente de tráfico [FGM⁺12] puede salvar vidas.
- **Seguimiento en caso de robo.** Tal y como se ha comentado en la sección anterior, en caso de que un vehículo sea robado, además de poder realizar de forma automática la denuncia, el vehículo notificará, ya sea mediante comunicación V2V o mediante V2I, sus coordenadas facilitando su localización en tiempo real.

Desde el punto de vista de las empresas, nuestra arquitectura aportará los siguientes beneficios:

- **Conocer el número de vehículos.** Con nuestro sistema se podría conocer el número de vehículos que va a asistir a un evento. Además, con los sensores que lleva incorporados el vehículo se podría incluso conocer exactamente el número de personas que van a asistir, permitiendo informar a las empresas y que adecuen sus servicios a la demanda esperada.
- **Estimación de la demanda eléctrica.** En el caso de los vehículos eléctricos, conociendo desde dónde inician el viaje, su destino y el nivel de batería del vehículo, se podría estimar el nivel de batería con que llegarán a un punto de recarga. Por lo tanto, se conocería de antemano la energía necesaria para las recargas.

3.6. Entorno de simulación

Para probar el modelo se ha implementado un simulador en Java que permite comprobar y evaluar el funcionamiento del sistema. Sobre todo se ha hecho hincapié en el aspecto de los vehículos eléctricos. El objetivo es calcular con cuánto tiempo de antelación se puede conocer la demanda eléctrica que se necesita para este tipo de vehículos.

Para poder realizar esta prueba se ha creado un escenario de simulación basado en el aparcamiento de un gran centro comercial, en el cual existen plazas específicas para recargar este tipo de vehículos. Se simula un horario comercial desde las 10 hasta las 22 horas. Se ha supuesto que los puntos de recarga sólo funcionan en horario comercial.

La herramienta informática implementada se divide en dos componentes:

- **Creación de traza de vehículos:** se crean los vehículos, se simula la notificación de los avisos, cuándo llegarán al punto de recarga y se estima con qué

Cuadro 3.1: Parámetros de entrada del simulador

Parámetro	Valor
Número de vehículos	3,000
Modelo de llegada	Normal: $\mu = 300$ (min) $\sigma = 130$
Modelo de t. de viaje	Weibull: $\alpha = 40$ (min) $\beta = 1,5$ $\gamma = 0$
Modelo de t. de recarga	Normal: $\mu = 120$ (min) $\sigma = 80$
Modelo de Nivel de batería	Normal: $\mu = 40$ (%) $\sigma = 20$
Capacidad de batería	Normal: $\mu = 19,000$ (W) $\sigma = 4,000$
Potencia de recarga	8 (kW)

nivel de batería llegarán basándose en la distancia a la que se encuentran. Para poder obtener estos datos se han utilizado estudios sobre los hábitos de los conductores [TMLP14, HK15, CC15, QZAY11, BMZB15]. También se han utilizado modelos matemáticos para la parametrización de algunas variables (ver Tabla 3.1), basadas en los trabajos de Quian et al. [QZAY11], Hao Bai et al. [BMZB15], Zeng et al. [ZZC⁺14], y Cheng et al. [CCNY13].

- **Simulador de recargas:** en esta parte de la aplicación se simula el proceso de recarga de baterías. Para simularlo se utiliza el conteo de Coulomb modificado (*Modified Coulomb counting*). En concreto, se mide la intensidad que carga integrándola en el tiempo, partiendo del nivel de batería con el que llega el vehículo. Este método se considera preciso a la hora de realizar estimaciones de carga [NMCH09].

El diseño del escenario de simulación ha sido creado basado en Centro Comercial de Puerto Venecia, que es el mayor Centro Comercial de Europa. Contiene más de 10,000 plazas de aparcamiento, algunas de ellas especiales para vehículos eléctricos. En un sábado normal, Puerto Venecia llega a tener picos de entrada de 1,500 vehículos a la hora [Her15]. En este caso hemos planteado un escenario en el que a lo largo de un día, acudan al centro 3,000 vehículos eléctricos.

Los datos que se han utilizado para la simulación son:

- **Modelo de llegada de vehículos:** para modelar este proceso se utiliza un modelo Gausiano con una media (μ) de 300 minutos y una Desviación Típica (σ) de 130. Esto permite que la llegada de vehículos no sea constante, tal y como sucede en la realidad. Se utiliza este modelo basándonos en la investigación de Subbiah et al. [SLMM13], en donde se realiza un estudio de la gente que asiste a un centro comercial en función de su consumo eléctrico.
- **Modelo de duración del viaje:** se ha utilizado el modelo de Weibull con los parámetros ($\alpha=40$, $\beta=1.5$, $\gamma=0$), para modelar la distancia que recorrerán los usuarios antes de llegar al centro comercial.
- **Tiempo de recarga:** se ha utilizado un modelo Gausiano, con una $\mu = 120$ minutos y $\sigma = 80$. Este modelo determinará el tiempo que el vehículo estará conectado al punto de recarga.

- **Nivel de Batería:** para simular el nivel de batería que tienen los vehículos se ha utilizado un modelo Gaussiano con $\mu = 40\%$ de carga y $\sigma = 20$. Con estos parámetros se plantea un escenario bastante estricto con un nivel de batería inicial similar al de 2 días de uso sin recargar [QZAY11].
- **Capacidad de las baterías:** para obtener la capacidad de las baterías se ha utilizado un modelo Gaussiano con una $\mu = 19,000$ (W/h) y $\sigma = 4,000$. De esta manera se consigue un valor medio en base a las ventas de vehículos eléctricos en España, teniendo en cuenta la existencia de los vehículos híbridos enchufables (o *plug-in hybrid electric vehicles* (PHEVs)). Con la desviación típica se consigue la amplitud suficiente para tener en cuenta tanto los vehículos eléctricos medios, como a los PHEVs.
- **Punto de recarga:** el punto de recarga utilizado equivaldría a un modo 2, que correspondería a 32 A con 230 V, que según el IEC-62196 es el modo estipulado para lugares públicos, como los centros comerciales.

3.7. Resultados de simulación

Los resultados obtenidos en la simulación del escenario planteado en la sección anterior pueden verse en la Figura 3.4. En ella se muestra la energía que consumen en la recarga los 3,000 vehículos simulados. El periodo en el que más energía se consume es el comprendido entre las 16 y 17 horas, con un consumo de 7.46 MW, la energía equivalente al consumo de una ciudad de 25,000 habitantes (en kWh).

La distribución del consumo eléctrico obtenido en la simulación tiene forma Gaussiana, lo cual concuerda con los modelos utilizados, y también con los estudios realizados por Subbiah et al. [SLMM13]. El sistema predictivo de consumo eléctrico, mostrado con una línea en la Figura 3.4 muestra la antelación en minutos con la que el sistema propuesto sería capaz de predecir la demanda de electricidad esperada para la recarga de los vehículos eléctricos.

Los resultados de la simulación muestran que el comportamiento del sistema predictivo mejora conforme avanza la simulación. Esto es debido a que además de conocer el tiempo de recarga de los vehículos que aún están de camino, conoce el tiempo de aquéllos que ya están recargando. Tal y como se puede observar, a las 15 horas el sistema es capaz de estimar con precisión la demanda eléctrica necesaria para la recarga de vehículos eléctricos con 62 minutos de antelación, mientras que a las 19 horas, seríamos capaces de estimar la demanda eléctrica con una antelación de 117 minutos.

El parque de turismos en España en el año 2014 era de 22 millones de vehículos. Supongamos un futuro en el que un 10% de estos vehículos sean eléctricos. Extrapolando los resultados de la simulación a este escenario, el consumo eléctrico producido por este 10% de vehículos sería de 5,470 MW. La recarga de un número alto de vehículos eléctricos de forma descontrolada puede producir que el sistema colapse [FCDC11]. Por ello, es interesante conocer con antelación la demanda eléctrica requerida por estos vehículos para que el sistema energético pueda adecuar la producción de energía para satisfacer dicha demanda.

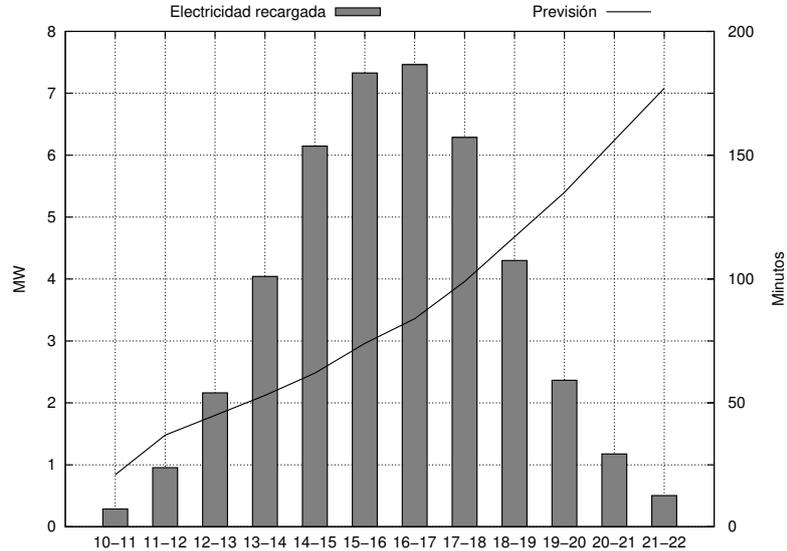


Figura 3.4: Electricidad recargada (en MW) y minutos de antelación en la previsión de la electricidad requerida.

3.8. Conclusiones

El vehículo eléctrico se posiciona como una alternativa al vehículo propulsado por combustibles fósiles. Al mismo tiempo, nos encaminamos cada vez más rápido hacia las ciudades inteligentes, o Smart Cities. En la mayoría de las investigaciones en las que se trabaja con redes vehiculares no se tiene en cuenta al vehículo eléctrico, ni los beneficios que éstos podrían obtener del uso de redes vehiculares.

En este capítulo se ha propuesto una arquitectura que, mediante el uso de tecnologías de información (utilizando redes vehiculares V2V y V2I) y la llamada Internet de las Cosas, facilite la integración del vehículo eléctrico en las Smart Cities del futuro.

La implantación del sistema propuesto sería relativamente económica, y permitiría conocer cuántos vehículos van a acudir a un punto particular, conocer y reservar puntos de recarga para los vehículos eléctricos y realizar una predicción de la demanda eléctrica que van a provocar estos vehículos.

Las empresas que deseen utilizar el sistema conocerán el número de vehículos y de personas que van a asistir a un evento, se podrá realizar una estimación de la demanda eléctrica que requerirán los vehículos eléctricos, por lo que, además de tener un tiempo de reacción para producirla, pueden desplegar puestos supletorios de recarga en caso de ser necesarios.

Desde el punto de vista de los vehículos eléctricos, favorecemos que dispongan de un punto de recarga al asistir a un evento, además de posibilitar descuentos en la tarifa de la electricidad. Finalmente, el sistema también facilita la asistencia en carretera en caso de avería o accidente.

Capítulo 4

Mejora de la Recarga de Vehículos Eléctricos en los Puntos de Recarga Domésticos

Es esencial establecer estrategias de carga inteligentes y eficientes para los vehículos eléctricos, debido al aumento de sus ventas, y especialmente teniendo en cuenta que muchos de estos vehículos se recargarán en estacionamientos privados, donde las características de los puntos de recarga son limitadas. En este capítulo, como una alternativa al método tradicional Plug and Charge (P&C), se proponen cuatro métodos de carga diferentes: Cheapest (C), Cheapest Starting (CS), Low Cost (LC) y Last Period (LP). El objetivo es encontrar mejores estrategias para un proceso automático, eficiente y programado de carga de vehículos eléctricos, evitando las demandas pico de energía y promoviendo recargas en horas de menor actividad, donde los precios de la electricidad son más bajos.

De acuerdo con esto, un cargador inteligente podría usar los métodos propuestos para mejorar el proceso de carga, especialmente en los puntos de recarga domésticos. Para evaluar nuestra propuesta, simulamos la recarga de la batería de 1,000 vehículos por día durante un año completo, considerando el uso de enchufes eléctricos domésticos y precios reales de electricidad. Además, se han simulado tres escenarios diferentes: (i) un escenario de demanda habitual, (ii) un escenario de alta demanda y (iii) un escenario de demanda extra, en el que los vehículos llegan con un nivel promedio de batería de sólo un 25 %. Los resultados de la simulación confirman que, al usar estos métodos de carga, podemos ahorrar entre un 46.9 % y un 75.2 % en el coste de la electricidad, mientras mantenemos niveles de batería similares después del proceso de carga.

4.1. Introducción

Estudios recientes sobre el cambio climático nos advierten sobre la necesidad de realizar una reducción drástica en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [PLG08, Sco15], es decir, CO_2 , CH_4 , así como contaminantes como óxidos de nitrógeno, polvo, y humo. La mayoría de los casos preocupantes se concentran en las grandes ciudades, debido a los niveles de contaminación del aire, principalmente provocados por las emisiones de los motores de combustión de los vehículos. De hecho, la contaminación ambiental afecta a la salud de forma muy negativa, causando enfermedades, como asma, enfermedades cardiorrespiratorias o cáncer de pulmón [Sco15, PÜC06], y es una causa común de acortamiento de la vida [Bar04].

Por esta razón, los gobiernos y las organizaciones del sector público están haciendo esfuerzos para mejorar la calidad del aire y la calidad de vida de los ciudadanos, proponiendo estrategias para reducir las emisiones. Estas estrategias también incluyen: (i) la producción de electricidad mediante el uso de fuentes de energía renovables (p. ej., energía solar, eólica e hidroeléctrica) [Eur07], y (ii) fomentar el uso de vehículos eléctricos (EVs) [Obs12, MIN10, SK10].

Afortunadamente, gracias a los avances tecnológicos en los enfoques basados en la Inteligencia Artificial, y al emergente Internet de las Cosas (IoT), nos dirigimos hacia ciudades más avanzadas, desarrolladas y eficientes [RLL13]. Además, cada fabricante de automóviles está trabajando en modelos eléctricos o incluso ya tiene un modelo en el mercado. De hecho, podemos encontrar compañías que sólo fabrican vehículos propulsados por motores eléctricos, como Eve, Zytel, Little Electric Cars o Tesla Motors. Esto sugiere que el EV va a ser un actor importante en este nuevo escenario, ya que las ventas están aumentando progresivamente, y se espera que aumenten ampliamente durante los próximos años.

La Figura 4.1 muestra la estimación de las ventas de EVs proporcionada por diferentes agencias y consorcios, como la Agencia Internacional de Energía (IEA) [Int17a], la Declaración de París [Fra15] (que trata de limitar el aumento promedio de la temperatura global en $2^\circ C$), o la campaña 'EV 30 @ 30' respaldada por Clean Energy Ministerial (CEM) [Cle18], (que considera que al menos el 30% de los vehículos vendidos en 2030 incluirán motores eléctricos).

Para promover una integración perfecta de los vehículos eléctricos en las ciudades inteligentes, además de considerar los problemas específicos relacionados con los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) [TMZ⁺13, BGF⁺14], será esencial equipar los vehículos eléctricos con sistemas de carga inteligentes y eficientes, especialmente teniendo en cuenta que la mayoría de los vehículos se cargarán en domicilios, donde las instalaciones eléctricas son bastante limitadas. Además, el método de recarga utilizado actualmente es el denominado Plug&Charge (P&C), es decir, las baterías comienzan el proceso de carga justo cuando el vehículo se enchufa a la red.

Uno de los principales problemas que puede experimentar el método de recarga P&C es que, en muchos países, los precios de la electricidad varían durante el día, especialmente en función de su demanda. Sin embargo, el P&C no impide que los usuarios carguen sus vehículos cuando la electricidad es más cara, lo que hace que los vehículos eléctricos sean menos atractivos para los potenciales compradores.

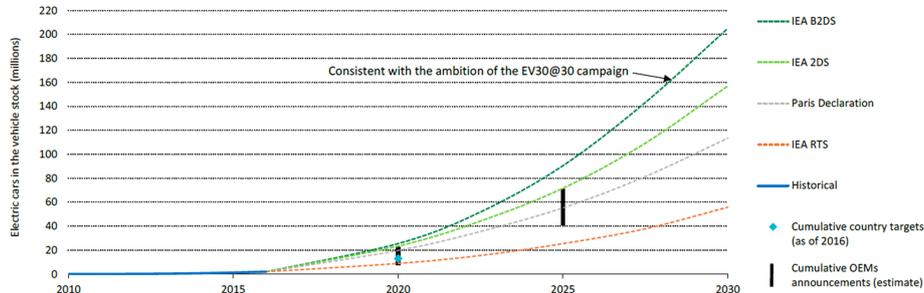


Figura 4.1: Escenario de despliegue de EVs en el futuro [Int17a].

Además, muchas personas suelen seguir el mismo patrón de movilidad, por ejemplo, vuelven a casa después de su día de trabajo prácticamente al mismo tiempo, y por lo tanto, el proceso de carga puede colapsar la red eléctrica debido a las demandas pico de potencia. En esencia, el método tradicional de carga de Plug&Charge puede encontrar los siguientes problemas:

- El alto precio de la electricidad. En la mayoría de los países, el precio de la electricidad varía a lo largo del día, y este coste sigue siendo alto, especialmente en períodos de alta demanda de energía, donde la mayoría de los usuarios intenta cargar sus vehículos eléctricos.
- Posible colapso de la red, ya que la cantidad esperada de vehículos eléctricos en los próximos años y el aumento de la capacidad de la batería pueden afectar en gran medida a la red eléctrica si todos estos vehículos requieren recargar al mismo tiempo.
- Ineficiencia. Al utilizar Plug&Charge, no se tienen en cuenta algunos parámetros que podrían ser muy útiles, como el precio de la electricidad en ese instante o la cantidad de energía requerida para cargar completamente la batería.
- Se requerirán mayores inversiones en infraestructura y gastos de operación para satisfacer los picos de alta demanda de energía, especialmente en el futuro, cuando la penetración de EVs en el mercado sea mayor.

Para resolver adecuadamente los problemas derivados de la utilización del método de carga Plug&Charge, en este trabajo, se proponen y analizan cuatro métodos de carga diferentes: (i) Cheapest (C), (ii) Cheapest Starting (CS), (iii) Low Cost (LC), y (iv) Last Period (LP). En particular, estos métodos de carga eficientes podrían ser aplicados por un cargador inteligente para maximizar el proceso de recarga, mientras se minimiza el coste de la electricidad requerida.

La contribución en este capítulo se pueden resumir en la propuesta de un conjunto de estrategias de carga de baterías especialmente diseñadas para EV, y la cuantificación de la mejora de estas estrategias en comparación con el método

Plug&Charge. De acuerdo con esto, presentamos un análisis de los resultados obtenidos por los métodos de carga propuestos, y así poder determinar las fortalezas y debilidades de cada uno.

El capítulo está organizado de la siguiente manera: la Sección 4.2 presenta algunos estudios previos sobre el proceso de recarga de EVs. En la Sección 4.3, detallamos los cuatro métodos propuestos. La Sección 4.4 muestra las características de las simulaciones realizadas, y la Sección 4.5 incluye el análisis de los resultados obtenidos, considerando que buscamos reducir el coste de la electricidad requerida y mantener el nivel de carga de la baterías de EVs. Finalmente, en la Sección 4.6 se presentan las conclusiones del capítulo.

4.2. Trabajos relacionados con las estrategias de recarga de EVs

El interés de los vehículos eléctricos por el mundo académico ha crecido constantemente, y la cantidad de artículos centrados en este tipo de vehículos, especialmente en los últimos años, demuestra claramente el creciente interés de los investigadores y su deseo de promover y mejorar este tipo de vehículos.

Estrechamente relacionado con nuestro trabajo, algunos autores propusieron nuevas estrategias de carga enfocadas en reducir el coste de la electricidad. Wi et al. [WLJ13] propusieron un algoritmo inteligente de carga EV basado en un sistema fotovoltaico (PV) para reducir los costes de electricidad y determinar los horarios óptimos para la carga de EVs. Su sistema se basa en la predicción de la potencia de salida fotovoltaica y el consumo de electricidad requerido. Los autores evaluaron su enfoque simulando 12 EVs con una capacidad de batería de 24 kWh, presentando tres perfiles de estados iniciales de carga (SoC) diferentes (20, 30 y 40 %) y un objetivo de porcentaje de batería del 80 %. Además, todos los vehículos tienen un período fijo de recarga de 8 a.m. a 7 p.m. Los resultados mostraron que su propuesta puede reducir el coste de carga del 6 % al 15.2 % en comparación con el método Plug&Charge. Makkonen et al. [MTL⁺14] presentó un sistema para la carga inteligente de EVs y un sistema de gestión de energía (EMS). El sistema de carga permite el balanceo de carga, facilitando la participación en los mercados de electricidad y proporcionando un sistema de control para el almacenamiento de energía. Sin embargo, los autores evaluaron su propuesta considerando un único vehículo recargado desde un 44 % a un 97 % de nivel de batería. Los autores no compararon su enfoque con ninguna otra metodología, ni cuantificaron la mejoría al usar su propuesta. Tikka et al. [TMLP14] propusieron un sistema de carga inteligente destinado a minimizar el coste de las recargas. Los autores demostraron la viabilidad de una estrategia simple de carga inteligente en un banco de pruebas, utilizando componentes comerciales. Para evaluar su propuesta, simulaban que un solo vehículo se recargaba en el hogar durante una semana y lo compararon con el método Plug&Charge, reduciendo la factura de electricidad únicamente 0.11 € por semana. Los autores también sugirieron que las estrategias de carga dirigidas a minimizar los costes de la electricidad pueden no ser factibles para un solo cliente, y adicionalmente, los minoristas de electricidad deberían estar interesados

en controlar las recargas de EVs para satisfacer adecuadamente la demanda de electricidad.

Basado en el uso de comunicaciones vehiculares, Gharbaoui et al. [GVB⁺12] presentaron un sistema que se basa en una infraestructura de comunicación distribuida, donde los vehículos pueden intercambiar información útil sobre sus necesidades energéticas. El enfoque presentado permite a los usuarios minimizar los tiempos de carga mientras optimiza la eficiencia de la infraestructura eléctrica. Más recientemente, Valdivia et al. [VGZF⁺17] propusieron un método basado en la optimización de enjambre de partículas (PSO), para maximizar el SoC de los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEVs). Para evaluar su propuesta, realizaron una simulación de 24 horas de diferentes escenarios variando el número de vehículos (50, 100, 300, 500 y 1000). Los resultados mostraron que su propuesta obtiene resultados significativamente mejores en comparación con otros esquemas que se basaron en un algoritmo de búsqueda gravitacional (GSA), un algoritmo de la luciérnaga (FA) y un algoritmo genético (GA), respectivamente.

Otros trabajos, en cambio, han promovido las recargas fuera del periodo pico tratando de mitigar el efecto de cargar simultáneamente un alto número de vehículos eléctricos en la red eléctrica, especialmente en las horas punta. Ma et al. [MCH10] crearon una estrategia de control de carga descentralizada, especialmente diseñada para grandes poblaciones de vehículos eléctricos. El objetivo principal es reducir los costes de generación de la energía eléctrica mediante el fomento de las recargas durante la noche. En sus simulaciones, evaluaron vehículos con dos capacidades de batería (10kWh y 20kWh) y una tasa de carga máxima de 3 kW. Mets et al. [MVH⁺10] propusieron dos estrategias de carga, una estrategia iterativa local y otra global, con el objetivo de reducir las demandas de potencia máxima. Para hacer esto, simularon un conjunto de 150 hogares durante un período de 24 horas, y los vehículos simulados fueron PHEVs. En concreto, usaron el Chevrolet Volt con una capacidad de batería de 16 kWh. Además, las simulaciones consideraron las mismas especificaciones para cada vehículo y una tasa máxima de carga de 4.6 kWh. Los resultados mostraron que el consumo de energía adicional oscila entre el 6 % y el 44 %, dependiendo de la tasa de penetración de los PHEVs, y las cargas máximas se podrían reducir entre 8 % y 42 %, en comparación con el escenario habitual. Gan et al. [GTL11] presentaron un protocolo distribuido para administrar los horarios de carga de los EVs al día. El objetivo principal es reordenar las cargas al periodo valle de demanda de electricidad. Los autores realizaron una simulación de un día teniendo en cuenta el perfil de carga residencial promedio en el área de servicio del sur de California, y evaluaron su propuesta con 10, 20 y 40 vehículos de tres tipos diferentes (sedán, compacto y roadster). Más recientemente, Chen et al. [CCNY13] presentaron un sistema para iniciar las cargas fuera de las horas punta y optimizar así el proceso de carga al tiempo que se reducen los picos de demanda de alta potencia. En particular, y de forma similar a [VGZF⁺17], usaron un algoritmo basado en la optimización de enjambre de partículas y compararon los resultados obtenidos con un enfoque de recarga no controlada. Los resultados de simulación mostraron que el algoritmo propuesto no sólo cumple con la demanda de carga de vehículos eléctricos, sino que también mitiga el impacto de la carga de vehículos eléctricos en la red de distribución.

CAPÍTULO 4. MEJORA DE LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LOS PUNTOS DE RECARGA DOMÉSTICOS

En la literatura también podemos encontrar varios trabajos que analizaron cómo el creciente número de vehículos eléctricos afectaría a toda la demanda de electricidad. Particularmente, Sharma et al. [SCB14] analizaron los efectos de la carga de EVs en sistemas de distribución residencial desequilibrados. Para ello, compararon esquemas de carga incontrolados y otros inteligentes, simulando diferentes escenarios a lo largo de un día. Los resultados mostraron que la carga EVs incontrolada afecta negativamente a la red eléctrica y, por lo tanto, recomiendan las cargas controladas, a través de enfoques de carga inteligentes. Acha et al. [AGS11] propusieron un sistema para coordinar las interacciones rentables entre los operadores de redes de distribución, los mercados de energía y los EVs. En sus simulaciones, sólo consideraron dos tipos de vehículos, PHEVs con baterías de 3.12 kWh y BEVs con baterías de 24 kWh. También asumieron que todos los vehículos deberían estar completamente cargados a las 7 a.m. Quian et al. [QZAY11] presentaron una metodología para modelar la demanda de electricidad de vehículos eléctricos en un sistema de distribución. En particular, compararon cuatro escenarios de carga: (i) carga doméstica descontrolada, (ii) carga doméstica inteligente, (iii) carga doméstica fuera de horas punta sin control, y (iv) carga pública descontrolada. De acuerdo con los resultados obtenidos, los autores consideran que una penetración del mercado del 10 % de EVs aumentaría la demanda eléctrica hasta un 17.9 %, mientras que un 20 % de penetración de EVs produciría un aumento del 35.8 % en la demanda eléctrica. También determinaron que el tiempo de inicio del proceso de recarga tiene un efecto dramático en la demanda eléctrica. En cuanto a las simulaciones realizadas, utilizaron modelos estadísticos para considerar el tiempo de llegada y el estado de carga (SoC) de los vehículos. Además, realizaron simulaciones de un día, utilizando dos tipos de vehículos (el GM EV1 con una batería de ácido de 27.19 kWh y el Nissan Altra con una batería de iones de litio de 29.07 kWh).

En general, la mayoría de las investigaciones sobre vehículos eléctricos se centraron en: (i) mejorar las estrategias de carga, (ii) optimizar el SoC, (iii) reducir los picos de electricidad y favorecer la demanda en periodos valle, así como (iv) estudiar y mitigar el efecto de aumento de la demanda de electricidad que van a requerir los vehículos eléctricos. Además, y de manera similar a otras áreas de investigación, la mayoría de estos trabajos se basó en simulaciones para evaluar sus propuestas. Sin embargo, a diferencia de nuestro trabajo, las simulaciones sólo consideran un día, algunos vehículos, generalmente con las mismas capacidades de batería y, en general, los autores no cuantificaron la mejora en términos de reducción de coste, o los beneficios obtenidos fueron muy limitados.

En contraste con los estudios presentados anteriormente, y para evaluar con precisión nuestras propuestas, nuestras simulaciones incluyen 1,000 vehículos por día y comprenden un año completo. Además, nuestros vehículos simulados tienen diferentes capacidades de batería, siguiendo la distribución del mercado de EVs en España [ANF17]. Simulamos que estos vehículos comienzan a recargarse con diferentes niveles de batería y en diferentes períodos de tiempo. Por último, pero no menos importante, también utilizamos los precios reales de la electricidad, que varían a lo largo de cada hora del día y durante todo el año [Red17].

4.3. Mejorando la recarga de vehículos eléctricos

La estrategia más comúnmente utilizada para la recarga de vehículos eléctricos es el Plug&Charge, es decir, en la que el proceso de recarga de la batería se inicia automáticamente cuando el usuario llega al punto de recarga y conecta al vehículo al enchufe. Sin embargo, este método no es eficiente, ya que no tiene en cuenta ningún parámetro de eficiencia energética o reducción de costes (por ejemplo, el precio de la electricidad, el estado actual de la red eléctrica, el nivel actual de la batería, o si la energía requerida se ha generado en un manera respetuosa del medio ambiente). Consideramos este método como una base para nuestro estudio comparativo, ya que es la estrategia más aceptada y utilizada entre los usuarios de EVs.

4.3.1. Contexto eléctrico

Como ya hemos comentado, el objetivo de este capítulo es proponer y comparar cuatro métodos de carga de baterías que, teniendo en cuenta información adicional sobre el estado de la batería y el tiempo disponible para completar el proceso de carga, puede mejorar las prestaciones del tradicional Plug&Charge. El objetivo final es que los cargadores inteligentes puedan usar uno de nuestros enfoques para mejorar el proceso de carga, especialmente en los puntos de recarga domésticos.

Para evaluar con precisión nuestros enfoques, implementamos un simulador que modela las recargas de EVs. En concreto, es capaz de simular una gran cantidad de vehículos con diferentes características de batería y diferentes modos de carga.

De acuerdo con la norma IEC-62196 [IEC03], hay cuatro modos de carga diferentes diseñados para los EVs:

- **Modo 1.** Es el modo estándar para cargar los vehículos en puntos de recarga domésticos. Implica cargar las baterías a 230v y una corriente máxima de 16 A. El proceso de recarga de la mayoría de los EVs puede durar hasta 8 horas y, por lo tanto, se considera un modo de carga lenta. En este capítulo, evaluamos los diferentes métodos de carga utilizando el Modo 1, ya que es el modo más comúnmente utilizado en los hogares [HK15].
- **Modo 2.** Este modo de carga admite corrientes de hasta 32 A. Dependiendo del tipo de vehículo, el proceso de recarga puede durar entre 2 y 4 horas. Por lo tanto, este modo de carga se conoce como semi-rápido.
- **Modo 3.** Este modo, conocido como carga rápida, admite corrientes entre 32 A y 250 A. Dependiendo del tipo de vehículo, el tiempo de recarga, usando este modo, puede tomar menos de 1 hora.
- **Modo 4.** Admite corrientes de hasta 400 A, y se conoce como carga ultrarrápida. Es muy prometedor, ya que reducirá en gran medida el tiempo requerido para cargar las baterías de los EVs, aunque muchos tipos de baterías no pueden soportarlo debido al calor generado por la cantidad de electricidad que se carga en muy poco tiempo.

CAPÍTULO 4. MEJORA DE LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LOS PUNTOS DE RECARGA DOMÉSTICOS

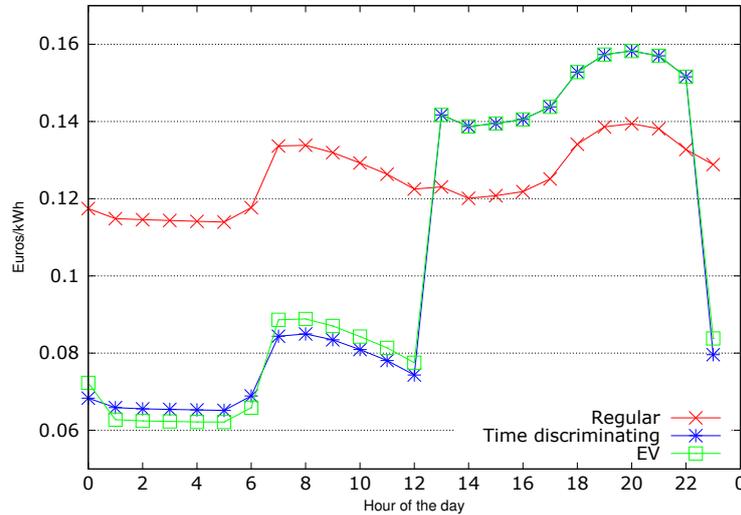


Figura 4.2: Ejemplo del precio de la electricidad en España el 31 de octubre de 2017 [Red17].

Otro aspecto importante a considerar es el precio de la electricidad. Como se ha comentado anteriormente, el coste de la electricidad para el usuario final varía a lo largo del día en muchos países. Ejemplos de ello son Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Francia, Portugal, España, Finlandia, Estonia, Lituania y Letonia [Exe, IES, QZAY11, Fac14, Red17, Elec]. Es muy común encontrar periodos de precios altos y otros periodos en los que el precio de la electricidad es bajo (generalmente durante la noche). Por lo tanto, para ahorrar dinero, debería ser necesario recargar los vehículos eléctricos teniendo en cuenta estos detalles, es decir, alentar a los usuarios a que recarguen sus vehículos cuando la electricidad sea más barata.

En nuestras simulaciones, consideramos los precios actuales de la electricidad en España. Particularmente, el precio de la electricidad tiene diferentes tasas en España (ver Figuras 2.2 y 4.2). En este capítulo nos centraremos en tres de ellas: (i) la normal o por defecto, (ii) la de discriminación horaria, y (iii) la de vehículos eléctricos (o SuperValle). Además, el precio de la electricidad varía en casi todas estas tarifas, diariamente e incluso a lo largo del día, principalmente debido tanto a la demanda estimada en cada hora, como al coste de producción de electricidad.

4.3.2. Estrategias de recarga propuestas

Como se ha comentado anteriormente, en este capítulo se proponen cuatro métodos de carga diferentes que mejorarán los cargadores inteligentes, al permitir recargas más baratas y eficientes. Para ello, se supone que los puntos de carga tienen capacidades de comunicación con el vehículo y acceso a Internet. Además, el usuario puede informar al sistema sobre la hora de salida prevista.

4.3. MEJORANDO LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Cuadro 4.1: Parámetros de carga

Parámetro	Definición	Ejemplo
P	periodo de tiempo en el que el vehículo podría ser recargado	12 horas
B	tiempo que el vehículo necesita para cargar completamente su batería	6 horas
$p(h)$	precio de la electricidad a una hora determinada	0.152 €/kWh
ch	instante en el que el precio de la electricidad es el más barato	4 a.m.
l	hora exacta cuando el vehículo abandona el punto de recarga	7 a.m.
s	tiempo de inicio de la recarga	22 p.m.
e	tiempo de finalización de la recarga	4 a.m.

Consideramos P como el período de tiempo en el que el vehículo puede ser recargado (es decir, las horas que transcurren entre su llegada y su partida), y B el período de tiempo que el vehículo necesita para cargar completamente su batería. Además, $p(h)$ denota el precio de la electricidad a una hora determinada h , ch se refiere al instante en el que el precio de la electricidad es el más barato, y l representa el momento exacto en el que el vehículo abandona el punto de recarga. Finalmente, s y e denotan los tiempos de carga de la batería de inicio y finalización. La Tabla 4.1 muestra los parámetros que se usarán para los diferentes métodos de carga propuestos.

Según la información disponible, especialmente el precio de la electricidad, el nivel actual de la batería y el tiempo de carga disponible P , nuestro sistema de carga inteligente estimaría B , es decir, el tiempo requerido para una recarga completa de la batería según las características y estado de la batería del vehículo y la potencia suministrada por el punto de recarga. Finalmente, en función del método de recarga utilizado, el sistema determinaría el momento en que el vehículo debe comenzar el proceso de recarga.

Los métodos de recarga propuestos son los siguientes:

- **Cheapest (C).** Esta estrategia de carga determinará s , con el fin de que el ch se sitúe justo en el centro de B . De acuerdo con esto, el período del proceso de carga estaría determinado por la Ecuación 4.1. Es importante destacar que los vehículos sólo se cargarán completamente cuando se cumpla la siguiente condición: $(ch + B/2) < l$.

$$\left[\left(ch - \frac{B}{2} \right) .. \left(ch + \frac{B}{2} \right) \right] \quad (4.1)$$

- **Cheapest Starting (CS).** El método CS planificará el inicio de la recarga justo en el momento en que la electricidad sea más barata (es decir, $s = ch$).

CAPÍTULO 4. MEJORA DE LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LOS PUNTOS DE RECARGA DOMÉSTICOS

En concreto, el proceso de recarga vendrá determinado por la Ecuación 4.2. Este método es más restrictivo que el anterior, ya que los vehículos sólo se cargarán completamente cuando se cumpla la siguiente condición: $(ch + B) < l$.

$$[ch..(ch + B)] \quad (4.2)$$

- **Low Cost (LC).** El método LC permite que los vehículos eléctricos comiencen su recarga justo cuando comienza el periodo valle. Esta estrategia de recarga está pensada principalmente para cargas nocturnas, y vendrá determinada por la Ecuación 4.3. Es importante destacar que sólo consideramos variaciones negativas en la tarifa de electricidad para determinar $max(\Delta p(h))$, es decir, cuando el precio de la electricidad cae.

$$[max(\Delta p(h))..(max(\Delta p(h)) + B)] \quad (4.3)$$

- **Last Period (LP).** El método LP determina que los vehículos comenzarán su proceso de recarga durante la última parte de B (es decir, asegura que el proceso de carga terminará justo antes de abandonar el punto de recarga, justo lo opuesto que el P&C, que inicia el proceso de carga siempre el vehículo llega al punto de carga). De acuerdo con esto, el proceso de carga estaría determinado por la Ecuación 4.4, y no tiene en cuenta el precio de la electricidad. Por lo tanto, se requiere conocer cuándo va a marcharse el vehículo para que el método funcione correctamente. Finalmente, es importante destacar que cuando $P < B$, el método LP se comportará exactamente de la misma manera que el tradicional P&C.

$$[(l - B)..l] \quad (4.4)$$

Para comprender mejor el funcionamiento de los métodos propuestos, presentamos el siguiente ejemplo. Supongamos que tenemos un vehículo eléctrico con una capacidad de batería de 24 kWh, que llega a un punto de recarga Modo 1 a las 7:00 p.m. y sale a las 7 a.m. (es decir, $P = 12yl = 7$). Además, consideramos que llega con un nivel de batería del 75%. Según esto, el proceso de recarga tardaría 2 horas (es decir, $B = 2$). La Figura 4.3 muestra la evolución de las tarifas de electricidad (eje y) a lo largo del día (eje x), y los diferentes puntos de inicio determinados por el método P&C, y por los métodos de recarga propuestos.

De estar forma, si utilizáramos el tradicional Plug&Charge, el vehículo comenzaría a recargarse inmediatamente ($s = 19 = 7 p.m.$). En nuestro ejemplo, este es exactamente el instante en el que el precio de la electricidad es el más alto.

En el caso de que se usara el método Cheapest, la recarga comenzaría a las 3 a.m., ya que el período más económico en el que encaja todo el proceso de recarga comprende desde las 3 a.m a las 5 a.m. ($[(4-1)..(4+1)]$ de acuerdo con la Ecuación 4.1).

Utilizando el método Cheapest Starting, la recarga comenzaría a las 4 a.m., ya que éste es el momento en que la electricidad es más barata, y terminaría a las 6 a.m. ($[4..(4+2)]$, de acuerdo con la Ecuación 4.2).

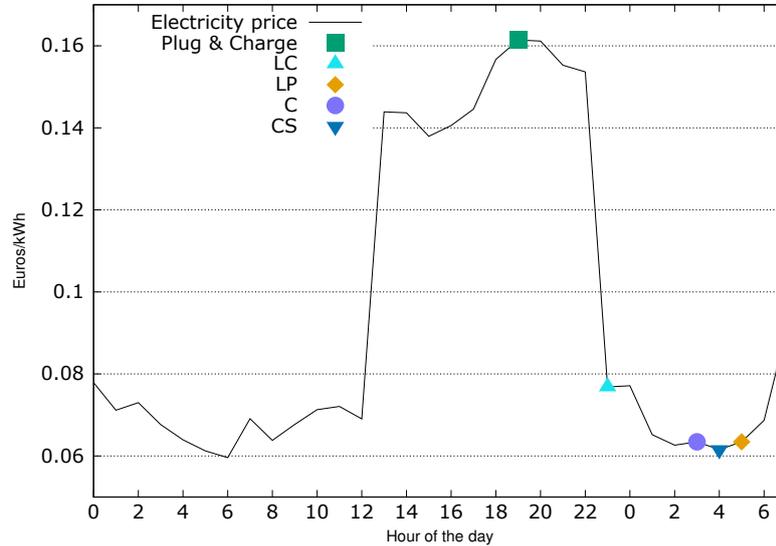


Figura 4.3: Ejemplo que incluye el precio de la electricidad y el punto de partida de carga de los diferentes métodos (Precio de la electricidad en España para vehículos eléctricos el 1 de enero de 2018).

Si usáramos el método de Low Cost, el vehículo comenzaría el proceso de carga a las 23 p.m., ya que los precios de la electricidad caen bruscamente justo en ese momento, y comienza el período valle. Según la Ecuación 4.3, el proceso de carga comprendería el siguiente periodo: [23..1].

Por último, si se utilizara el método de recarga Last Period, puesto que el vehículo saldría a las 7 de la mañana, el proceso de carga comenzaría a las 5 a.m. para terminar la carga completa justo antes de abandonar el punto de recarga ([7-2)..7], de acuerdo con la Ecuación 4.4).

4.4. Entorno de simulación

Para evaluar las prestaciones de los métodos de recarga propuestos y compararlos con el tradicional Plug&Charge, haremos simulaciones. En concreto, simularemos tres escenarios diferentes de acuerdo con el nivel de batería medio de los vehículos justo antes de comenzar a recargar. El objetivo es analizar el rendimiento de nuestros métodos bajo diferentes requisitos de energía. A continuación, detallamos los tres escenarios:

- **Escenario de demanda habitual**, en el que los niveles de batería de los vehículos siguen una distribución gaussiana con una media (μ) del 72% y una desviación estándar (σ) del 10%. Estos datos corresponden al nivel de batería medio de un EV después de un día de uso, de acuerdo con el trabajo de Qian et al. [QZAY11].

CAPÍTULO 4. MEJORA DE LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LOS PUNTOS DE RECARGA DOMÉSTICOS

Cuadro 4.2: Ventas de vehículos eléctricos durante 2016 en España [ANF17]

Modelo	Capacidad de Batería (kWh)	Cuota de mercado
Nissan Leaf	24	16.2 %
Citroen C-Zero	15	15.5 %
Renault Zoe	22	12.6 %
BMW i3	22	10.6 %
Renault Kangoo	33	10.3 %
Nissan NV 200	24	9.6 %
Smart fortwo	17.6	4.8 %
Volkswagen Golf	24.2	4.3 %
Volvo XC90	65	4.0 %
BMW X5	9	3.8 %
Renault Twizy 80	6.1	2.9 %
KIA Soul	27	2.8 %
BMW 225	7.7	2.6 %

- **Escenario de alta demanda**, en el que el nivel de batería de los vehículos presenta un modelo gaussiano con μ igual a 50 % y σ igual a 10 %.
- **Escenario de demanda extra**. Consideramos este escenario como muy adverso, ya que los vehículos presentarán un nivel de batería con μ igual a 25 % y σ igual a 10 %.

Otro factor crítico a tener en cuenta durante las simulaciones es la capacidad de la batería, ya que los EVs en el mercado tienen baterías con diferentes capacidades. Como es de esperar, los vehículos con menor capacidad de batería requerirán menos tiempo para cargarse por completo que aquellos vehículos con mayor capacidad de batería.

Con el objetivo de simular las características de los EVs de manera realista, y de estimar con precisión el coste de recargar los EVs al usar los diferentes métodos de carga en cada escenario a lo largo del año, consideramos el modelo y las características específicas de los vehículos simulados. Además, utilizamos un método de Monte Carlo [Rob04] para determinar los diferentes vehículos incluidos. Por lo tanto, los vehículos utilizados en nuestras simulaciones reflejarán la situación actual del mercado en España (ver Tabla 4.2). El resto de los parámetros utilizados en las simulaciones se comentan a continuación y se muestran en la Tabla 4.3.

- **Número de vehículos**. Simulamos un total de 365,000 EVs, es decir, 1,000 vehículos por día durante todo un año. Al hacer esto, aseguramos tener una perspectiva macro y la escalabilidad de nuestras propuestas.
- **Modelo de llegada de vehículos**. Este parámetro representa el momento en que el vehículo llega al domicilio (es decir, al punto de recarga). Por lo tanto, de acuerdo con el método Plug&Charge, el proceso de recarga comenzará en este momento. Para hacer las simulaciones más realistas, la

Cuadro 4.3: Parámetros de simulación

Parámetros	Valores
Número de vehículos	365,000 (1,000 * 365 días)
Modelo de llegada de vehículos	Normal: $\mu = 1,080$ min., $\sigma = 120$ min.
Modelo de duración del viaje	Weibull: $\alpha = 45$ min., $\beta = 1,9$, $\gamma = 0$
Modelo de tiempo de carga	Normal: $\mu = 700$ min., $\sigma = 150$ min.
Modelo de nivel de batería	Normal: $\mu = 72\%$, 50% , y 25% , $\sigma = 10\%$
Potencia punto de recarga	3.68 kWh (IEC 62196 Modo 1)
Pérdidas por calor	10 %

llegada de vehículos sigue una distribución gaussiana con μ igual a 1,080 minutos y σ de 60 minutos, es decir, la mayoría de los vehículos suelen llegar a casa de 4 a 8 p.m. Consideramos estos valores de acuerdo con varios trabajos previos [GTL11, CCNY13, SCB14, AGS11, QZAY11].

- **Modelo de duración de viaje.** Es el tiempo de viaje estimado hasta llegar al punto de carga. Este valor sigue una distribución Weibull (de acuerdo con [MV17, ADE06, MGMCG12, McC12, Sus12, FDC09]), con $\alpha = 45$ minutos, $\beta = 1.9$, y $\gamma = 0$, es decir, la mayoría de los tiempos de viaje requieren 45 minutos o menos. Usamos estos valores para reflejar los hábitos de vida de las personas [STc17, HMB⁺11, HR07]. Particularmente, este parámetro permite calcular el nivel de batería de los vehículos cuando alcanzan los puntos de carga; estimamos estos valores individualmente ya que consideramos el modelo de consumo específico de cada vehículo.
- **Modelo de tiempo de carga.** Este parámetro determina el tiempo que el vehículo está estacionado en el punto de carga, es decir, es el tiempo máximo de carga disponible para el vehículo. Los valores de este parámetro siguen una distribución gaussiana con μ igual a 700 minutos y σ igual a 150 minutos. Por lo tanto, la mayoría de los vehículos permanecen estacionados de 9 a 14 horas por día.
- **Modelo de nivel de batería.** Este parámetro define el nivel de batería del vehículo cuando llega a su punto de carga. A medida que se simulan los tres escenarios diferentes (es decir, demanda habitual, alta demanda y demanda extra), los valores siguen una distribución gaussiana con diferentes parámetros (μ es igual a 72 %, 50 % y 25 %, respectivamente), mientras que σ es 10 %.
- **Potencia del punto de carga.** En nuestras simulaciones, como estamos interesados en la carga doméstica, consideramos que todos los puntos de carga admiten el Modo 1, es decir, los vehículos cargarán sus baterías a 230 V y 16 A (es decir, 3.68 kWh).
- **Pérdida de energía por calor.** Durante el proceso de carga, las baterías sufren pérdidas de energía que se disipan en forma de calor. Estas pérdidas

CAPÍTULO 4. MEJORA DE LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LOS PUNTOS DE RECARGA DOMÉSTICOS

Cuadro 4.4: Resultados obtenidos en el escenario de demanda habitual

Métrica	P&C	C	CS	LC	LP
Megavatios cargados	2.45	2.34	1.85	2.34	2.38
precio de la electricidad (€/vehículo al año)	349.73	139.29	104.16	161.31	148.79
diferencia de precio comparado con P&C (%)	-	-60.17 %	-70.22 %	-53.88 %	-57.46 %
electricidad media cargada	27.98 %	27.98 %	22.08 %	27.80 %	27.98 %
nivel medio de batería final	99.92 %	99.62 %	94.03 %	99.75 %	99.92 %
vehículos con batería <75 %	637	637	27,183	871	637
vehículos con batería <50 %	0				
vehículos con batería <25 %	0				
nivel medio de batería inicial	71.95 %				

están directamente correlacionadas con la corriente y los voltajes utilizados en la carga, es decir, la carga a baja potencia reduce el porcentaje de pérdida de energía en comparación con la carga rápida. En nuestras simulaciones, consideramos que un 10 % de la electricidad se pierde durante la carga de la batería [LCYC86].

4.5. Resultados de la simulación

Esta sección presenta los resultados obtenidos para los tres escenarios diferentes descritos en la Sección 4.4. El objetivo principal es analizar el rendimiento de los métodos de carga propuestos bajo diferentes condiciones.

4.5.1. Primer escenario: demanda habitual

De acuerdo con Quian et al. [QZAY11], el nivel de batería de un vehículo eléctrico después de un día de uso se aproxima al 72 % en promedio. Por lo tanto, en nuestros experimentos bajo un escenario de demanda habitual, consideramos que el nivel promedio de batería que poseen los vehículos antes de recargar es del 71.95 %.

La Tabla 4.4 muestra los resultados obtenidos en este escenario. En particular, presentamos: (i) el número de Megavatios consumidos al usar cada uno de los métodos de carga, (ii) la cantidad total de euros gastados por vehículo en las recargas, (iii) las diferencias entre cada método de recarga y el P&C, (iv) el nivel promedio de batería que ha sido recargado durante el proceso, (v) el nivel promedio de batería que presentan los vehículos después de abandonar los puntos de carga, (vi) el número de vehículos cuyo nivel de batería permanece por debajo del 75 %, 50 % y 25 %, y finalmente (vii) el nivel de batería promedio que presentan los vehículos antes de iniciar la recarga.

Como se observa, la cantidad de energía consumida es muy similar para todos los métodos (oscila entre 2.34 y 2.45 MW), excepto para el método Cheapest Starting que únicamente consume (1.85 MW). Sin embargo, las diferencias en el

coste de la electricidad por vehículo son notables (de 104.16 a 349.73€). De hecho, utilizando nuestros métodos, el ahorro de costes en la recarga oscila entre el 53.88 % y el 70.22 %. Sin embargo, la contrapartida del método con mayor ahorro, el CS, es que las baterías de los vehículos sólo se cargan, en promedio, hasta un 94.03 % (aproximadamente un 5 % menos que el resto de métodos).

En cuanto a los niveles de batería cuando los vehículos salen del punto de recarga, los resultados obtenidos en nuestras simulaciones son muy similares para todos los métodos (99.62-99.92 %), excepto para el CS (94.03 %). Además, observamos que hay una serie de vehículos que finalizan su proceso de recarga con menos del 75 % del nivel de la batería. Esto significa que esos vehículos han comenzado el proceso de carga con un nivel inferior de sus baterías, y la cantidad de tiempo que estuvieron en el punto de carga no fue suficiente para completar el proceso de recarga. Usando los métodos Plug&Charge, Cheapest y Last Period, la cantidad de vehículos con menos del 75 % de batería es de sólo 637 (de 365,000). Si se utiliza el método Low Cost, este número aumenta ligeramente hasta los 871 vehículos. Sin embargo, este problema es más notable cuando se usa el método de Cheapest Starting, ya que, en ese caso, aunque los vehículos estén enchufados, se esperan para recargar al momento en el que el precio de la energía sea el más barato. De hecho, usando el método CS, este número aumenta hasta los 27,183 vehículos.

En general, en escenarios de demanda habitual, es decir, donde los EVs presentan un buen nivel de batería antes de iniciar el proceso de recarga, tanto el Cheapest como el Last Period muestran el mejor rendimiento (en términos de batería cargada y ahorro económico). Por el contrario, el método CS no parece una buena opción, ya que no garantiza que las baterías se recarguen por completo, por lo que no es adecuado.

4.5.2. Segundo escenario: alta demanda

El segundo escenario utilizado en las simulaciones puede considerarse de alta demanda, ya que se plantea que los vehículos iniciarán el proceso de recarga con un nivel de batería inicial promedio del 50.18 %. De acuerdo con Qian et al. [QZAY11], este nivel de batería implica que el vehículo se ha usado casi dos días sin recargarse. La Tabla 4.5 presenta los resultados obtenidos en este escenario.

Como se muestra, de manera similar a los resultados presentados en la Sección 4.5.1, la cantidad de energía cargada es muy similar para todos los métodos, aunque prácticamente se duplica la energía consumida en el escenario de demanda habitual (ahora, oscila entre 2.84 a 4.31 MW) debido a que los niveles iniciales de la batería se reducen del 71.95 % (en el escenario de demanda habitual) al 50.18 % (en este escenario de alta demanda).

Una vez más, el método Cheapest Starting no cumple con las expectativas, ya que los vehículos están esperando a que el precio de la electricidad alcance su precio más bajo para empezar sus recargas, lo que hace prácticamente imposible cargar sus baterías por completo.

Las diferencias en el precio de la electricidad por vehículo son aún más notables (de 163.87€, en el caso de CS, a 605.42€, como es el caso de P&C). De hecho, utilizando nuestros métodos, el ahorro de coste va desde el 54.07 % hasta el 72.93 %. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el método CS carga las baterías de los

CAPÍTULO 4. MEJORA DE LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LOS PUNTOS DE RECARGA DOMÉSTICOS

Cuadro 4.5: Resultados obtenidos en el escenario de alta demanda

Métrica	P&C	C	CS	LC	LP
Megavatios cargados	4.31	4.07	2.84	4.09	4.23
precio de la electricidad (€/vehículo al año)	605.42	251.18	163.87	267.43	278.06
diferencia de precio comparado con P&C (%)	-	-58.51 %	-72.93 %	-55.83 %	-54.07 %
electricidad media cargada	49.66 %	47.80 %	33.79 %	48.48 %	49.66 %
nivel medio de batería final	99.84 %	97.97 %	83.96 %	98.65 %	99.84 %
vehículos con batería <75 %	1,000	1,029	120,072	7,227	1,000
vehículos con batería <50 %	506	506	18,774	788	506
vehículos con batería <25 %	0				
nivel medio de batería inicial	50.18 %				

vehículos sólo un 83.96 % en promedio (aproximadamente un 16 % menos que el resto de métodos).

En cuanto a los niveles de batería cuando los vehículos salen del punto de recarga, son muy similares para todos los métodos (97.97-99.84 %), excepto para el CS. En este segundo escenario, observamos que hay una cantidad de vehículos que terminaron su proceso de recarga incluso con menos del 50 % de nivel de batería (506 vehículos al usar los protocolos de recarga P&C, C y LP, así como de 788 y 18,774 vehículos cuando se usan los protocolos LC y CS, respectivamente). Estas consideraciones sugieren que estos vehículos permanecen muy poco rato en el punto de carga, o que sus niveles iniciales de batería son bastante bajos. De manera similar al escenario de demanda habitual, el método CS no funciona bien, aunque estas deficiencias son todavía más pronunciadas en este escenario, es decir, cuando se necesita más energía para cargar completamente los vehículos.

En general, en escenarios de alta demanda, es decir, donde los EVs requieren una cantidad significativa de energía para llenar sus baterías, el método Last Period exhibe el mejor equilibrio en el rendimiento (en términos de nivel de batería cargado y ahorro económico). En particular, el LP puede cargar las baterías exactamente al mismo nivel que si se utiliza P&C, mientras que reduce hasta un 54.07 % el coste de las recargas. Por el contrario, el método CS sólo puede alcanzar un 83.96 % de batería, de hecho, con el método CS, más de 120,000 del total de 365,000 vehículos presentan niveles de batería inferiores al 75 %, una vez finalizado el proceso de recarga.

4.5.3. Tercer escenario: demanda extra

En esta sección, se presentan los resultados en el escenario más exigente. En concreto, se plantea que los vehículos alcanzan los puntos de recarga con un nivel de batería muy bajo (en promedio, sólo un 24.67 %). Aunque este escenario podría considerarse muy extremo, el objetivo es evaluar la propuesta bajo todo tipo de situaciones.

La Tabla 4.6 muestra los resultados obtenidos en el escenario de demanda extra. Como se esperaba, las diferencias entre los diferentes métodos de carga, en

4.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Cuadro 4.6: Resultados obtenidos en el escenario de demanda extra

Métrica	P&C	C	CS	LC	LP
Megavatios cargados	6.43	5.93	3.56	5.92	6.35
precio de la electricidad (€/vehículo al año)	855.51	390.87	212.00	371.89	454.31
diferencia de precio comparado con P&C (%)	-	-54.31 %	-75.20 %	-56.53 %	-46.90 %
electricidad media cargada	74.97 %	69.90 %	42.44 %	70.44 %	74.97 %
nivel medio de batería final	99.63 %	94.57 %	67.11 %	95.10 %	99.63 %
vehículos con batería <75 %	1,730	16,998	206,778	29,737	1,730
vehículos con batería <50 %	1,000	1,000	121,912	4,410	1,000
vehículos con batería <25 %	538	538	17,004	652	538
nivel medio de batería inicial	24.67 %				

términos de energía consumida, son mayores en este tercer grupo de experimentos (se observan consumos desde 3.56 a 6.43 MW). En comparación con el escenario de demanda habitual, se requiere hasta un 162 % de energía adicional. Bajo estas condiciones exigentes, el método Cheapest Starting funciona aún peor, ya que los vehículos sólo alcanzan el 67.11 % de los niveles de la batería (prácticamente un 33 % menos que el resto de métodos), lo que es claramente insatisfactorio.

En cuanto al coste de la electricidad, existen ventajas significativas al usar nuestros métodos propuestos en comparación con el enfoque tradicional P&C (especialmente al usar el C, el CS y el LC). En particular, los precios oscilan entre 212 y 855.51 €, lo que representa un ahorro que oscila desde el 46.90 % hasta el 75.20 %.

En cuanto a los niveles de batería cuando los vehículos salen del punto de recarga, en este tercer escenario, la cantidad de vehículos que finalizan su proceso de recarga sin cargar completamente sus baterías aumenta significativamente. El método CS es claramente incapaz de gestionar adecuadamente la carga de los vehículos en este escenario de demanda extra. Como se muestra, 206,778 vehículos (de 365,000) permanecen con menos del 75 % del nivel de la batería. También es digno de mención que el método LP obtiene los mismos resultados, en términos de batería recargada, que el método P&C, pero reduce un 46.90 % el coste de la electricidad. Mientras tanto, el método Cheapest incluso puede reducir este coste hasta el 54,31 %, pero la cantidad de vehículos que finalizan el proceso de recarga con menos del 75 % del nivel de la batería aumenta de 1,730 al usar P&C o LP, a 16,998 cuando se usa el método de recarga C.

Aunque los escenarios de demanda extra (al menos con esta cantidad de vehículos de alta demanda de energía) no se pueden encontrar fácilmente en entornos realistas, también se ha demostrado los beneficios de utilizar estos métodos en comparación con el P&C. En concreto, los resultados demuestran que el método Last Period supera al resto de métodos, ya que muestra claramente el mejor resultado en términos de rendimiento, aumento del nivel de batería y ahorro en el precio de la electricidad.

CAPÍTULO 4. MEJORA DE LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LOS PUNTOS DE RECARGA DOMÉSTICOS

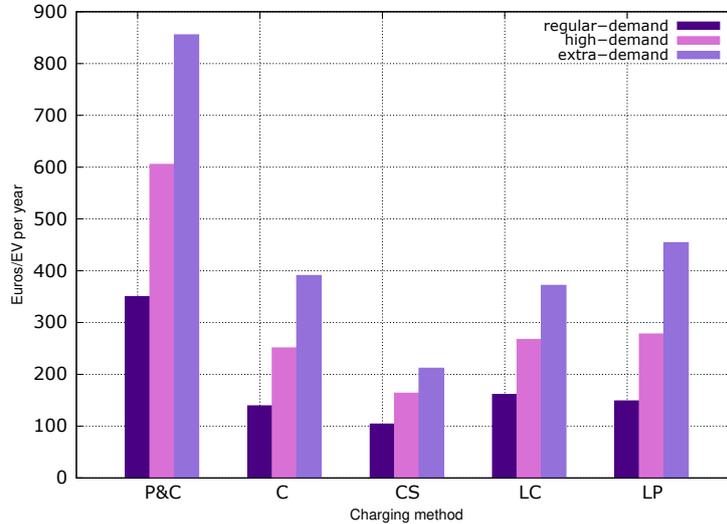


Figura 4.4: Promedio total de euros gastados para cargar un EV durante un año completo por cada método de carga en los tres escenarios de demanda de energía.

4.5.4. Comparación global de los métodos de recarga propuestos

Para estudiar mejor las diferencias entre los métodos de recarga, en esta sección, se presenta una comparación general en los tres escenarios de demanda de energía presentados anteriormente. Las Figuras 4.4, 4.5, y 4.6 representan los resultados obtenidos en términos de euros gastados por vehículo, porcentaje de nivel de batería después del proceso de recarga y coste de electricidad (en €/kWh).

Después de analizar a fondo los resultados obtenidos en los tres escenarios de demanda de carga, se pueden observar diferencias relevantes. Como se muestra, el total de euros gastados para cargar un vehículo se reduce drásticamente cuando se utilizan estos métodos de recarga en comparación con el P&C en todas las circunstancias, es decir, en los escenarios habitual, alta demanda, y demanda extra (ver Figura 4.4).

Cabe mencionar que los mejores resultados se obtuvieron con el método Last Period, pues alcanza los mismos niveles de batería que el método tradicional Plug&Charge en todos los escenarios, pero con una reducción sustancial del coste de la recarga. Más específicamente, LP reduce el precio de la electricidad: (i) un 57.46 % en el escenario de demanda habitual, (ii) un 54.07 % en el escenario de alta demanda y un 46.9 % en el escenario de demanda extra. Esto se debe a que LP aprovecha el periodo en que el coste de la electricidad es menor para realizar la recarga. Por el contrario, cuando el período de tiempo que el vehículo está enchufado no es suficiente para recargar completamente la batería, este método se comporta exactamente de la misma forma que el P&C.

Teniendo en cuenta que el modo de carga utilizado era el Modo 1, el método Cheapest Starting debería descartarse, ya que su rendimiento se ha demostrado

4.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

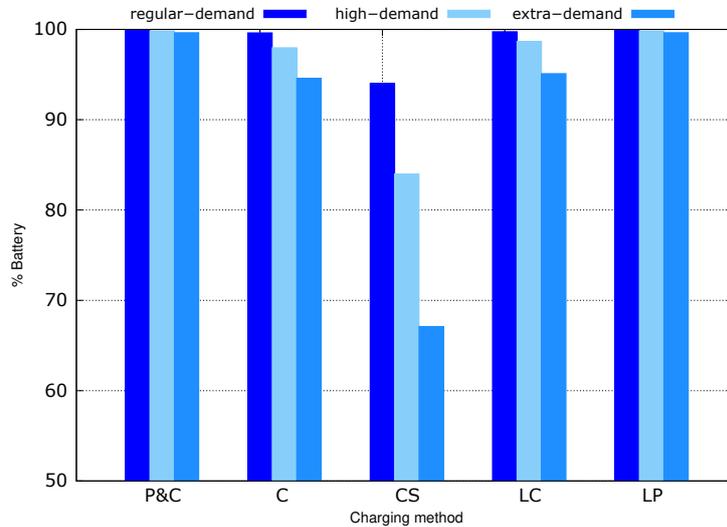


Figura 4.5: Porcentaje de nivel de batería después de recargar el vehículo para cada método de carga en los tres escenarios de demanda de energía.

insatisfactorio (en términos de nivel de batería) en todos los escenarios (ver Figura 4.5), pero especialmente en aquéllos donde los vehículos demandan más energía. Esto se debe a que las baterías no se pueden cargar por completo en el período del mínimo coste de la electricidad hasta que los vehículos abandonan los puntos de carga. Sin embargo, consideramos que este método podría ser más prometedor cuando se usen modos de recarga más potentes (es decir, cuando tenemos corrientes y voltajes más altos), especialmente considerando que este método ha resultado el que más ahorra en todas las simulaciones (ver Figuras 4.4 y 4.6). De hecho, los mejores resultados de precio se obtuvieron en el primer escenario (que consideramos que es el más realista), donde el método CS presentó un coste de la electricidad casi tres veces menor que el P&C).

Los resultados obtenidos por estos métodos, en términos de nivel de batería (ver Figura 4.5), son muy similares a los obtenidos por el Plug&Charge, pero además presentan una reducción significativa del coste de la electricidad (en términos de €/kWh). La Figura 4.6 muestra los beneficios de usar estos métodos. Por ejemplo, usando el LP, podemos reducir el coste de la electricidad de entre un 52.86 % y un 55.71 %. Además, se puede observar que el método LC antepone el ahorro económico a la carga completa de la batería, mientras que el LP asegura un buen nivel de batería a pesar de aumentar ligeramente el coste de la electricidad, cuando la demanda de energía también aumenta.

La aparición de vehículos eléctricos con mayores baterías (de más de 90 kWh) puede dificultar su recarga total, especialmente cuando los vehículos llegan con bajos niveles de batería, y se utilizan modos de baja potencia como el Modo 1. De acuerdo con esto, los puntos de recarga más potentes (es decir, aquéllos basados en el Modo 2 o el Modo 3) deberían desplegarse para garantizar que este tipo de

CAPÍTULO 4. MEJORA DE LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LOS PUNTOS DE RECARGA DOMÉSTICOS

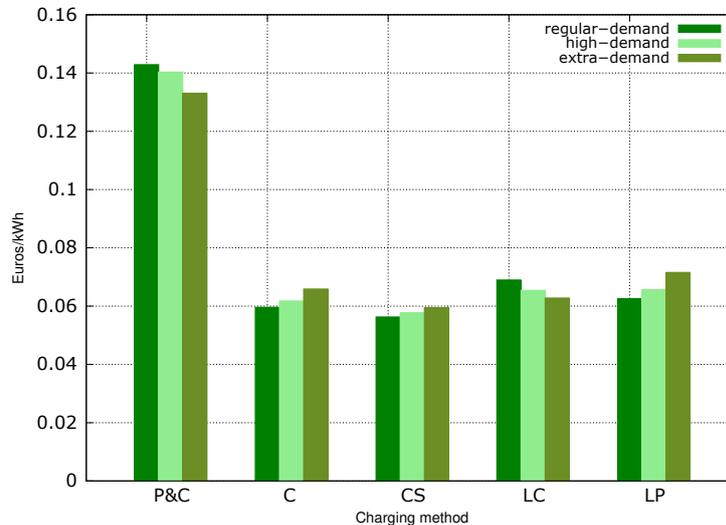


Figura 4.6: Promedio de euros/kWh para cada método de carga en los tres escenarios de demanda de energía.

vehículos pueda recargarse de forma adecuada.

4.6. Conclusiones

Las ventas de vehículos eléctricos están aumentando en gran medida, y preveemos que los vehículos eléctricos formarán parte de nuestra vida cotidiana en el futuro cercano. Como las tecnologías utilizadas mejoran continuamente, y las baterías de este tipo de vehículos están ganando capacidad, será esencial mejorar los métodos de recarga, y a la vez reducir el coste de recargar dichos vehículos.

El método más común utilizado para recargar los vehículos eléctricos es el conocido Plug&Charge. Sin embargo, este método no es eficiente ya que no tiene en cuenta ningún parámetro para aumentar la eficiencia. Es importante destacar que tener en cuenta información valiosa, como los precios de la electricidad, el estado actual de la red eléctrica o el nivel de batería del vehículo mejoraría definitivamente el proceso de carga. De acuerdo con esto, hemos propuesto cuatro métodos de recarga: Cheapest, Cheapest Starting, Low Cost, y Last Period. Estos métodos buscan minimizar el coste de la electricidad consumida, mientras se maximiza la carga de las baterías.

Para evaluar esta propuesta, se han utilizado tres escenarios diferentes en cuanto a requerimientos de energía (uno con demanda habitual, otro con alta demanda, y uno con demanda extra), y se ha simulado un total de 365,000 vehículos durante todo un año. Los resultados de la simulación muestran una mejora que oscila entre el 46.9% y el 75.2%, en términos de reducción de coste económico del proceso de carga, mientras se mantienen niveles de batería similares.

El estudio realizado demuestra que el uso de puntos de recarga inteligentes, es

4.6. CONCLUSIONES

decir, que adapten el proceso de carga de acuerdo con el nivel inicial de batería del vehículo y el margen de tiempo disponible para recargarla es muy conveniente, ya que el coste de la electricidad consumida puede reducirse drásticamente.

Capítulo 5

Enchufe Inteligente para la Recarga de Vehículos Eléctricos

En el futuro, las Smart Cities tendrán que enfrentarse a nuevos retos, como la administración sostenible de los recursos, la intercomunicación de múltiples y diversos dispositivos para implementar el llamado Internet de las Cosas (IoT), o la implantación total del vehículo eléctrico (EV). Teniendo en cuenta estos factores, en este capítulo, se presenta un enchufe inteligente, que permite la recarga eficiente de los EVs, evitando hacerlo en aquellos momentos en los que se produce un pico de demanda y por lo tanto el precio de la electricidad es más alto. Este enchufe, ofrece tres métodos de recarga: (i) Plug&Charge, (ii) Save y (iii) Safe, pudiendo el usuario elegir aquél que mejor se adapte a sus necesidades. Actualmente, esta invención se encuentra en proceso de solicitud patente y ya existe un acuerdo con una empresa para su explotación comercial. De acuerdo a los resultados obtenidos en nuestras simulaciones, los usuarios españoles que deseen adquirirlo obtendrán un ahorro en la factura de la luz de entre un 50.14% y un 72.93% al recargar sus vehículos.

5.1. Introducción

En el año 2016, se vendieron 753,000 vehículos eléctricos en todo el mundo, lo que supuso un incremento de un 40% de las ventas frente al año anterior. El 60% de esos vehículos eran Battery-Electric Vehicles (BEVs), y el resto Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) [Int17c, Int17b]. En la Tabla 5.1 se presentan los datos de ventas de EVs en 2015 y 2016 agrupados por países.

Actualmente existen más de 2 millones de vehículos eléctricos en el mundo (sumando los BEVs y PHEVs). De ellos, 648,770 unidades han sido vendidas en China, el país en el que más vehículos de este tipo se han vendido. Le sigue Estados Unidos, país en el que se han vendido 563,710 vehículos, Japón con 151,250

CAPÍTULO 5. ENCHUFE INTELIGENTE PARA LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Cuadro 5.1: Nuevas matriculaciones de EVs por país (en miles) [Int17a]

País	2015	2016
Canadá	6.96	11.58
China	207.38	336.00
Francia	22.95	29.51
Alemania	23.19	24.61
India	1.00	0.45
Japón	24.65	24.85
Korea	3.19	5.26
Holanda	43.77	24.48
Noruega	35.61	50.18
Suecia	8.59	13.42
Reino Unido	29.34	37.91
Estados Unidos	113.87	159.62
Otros	26.62	35.31
Total	547.12	753.17

vehículos y Noruega con 133,260. Si nos centramos exclusivamente en los BEVs, China vuelve a ser el país en el que más vehículos se han vendido, concretamente 336,000, seguido de Estados Unidos con 159,620 y Noruega con 50,180 vehículos [Int17a].

Sin embargo, si se analiza la cuota de mercado que tienen los PHEVs y los BEVs frente a los vehículos tradicionales propulsados por combustibles fósiles, es Noruega el país con mejor cuota de este tipo de vehículos, con un 28.76%. A continuación, de lejos, estarían Holanda con un 6.39%, Suecia con un 3.41%, Francia con un 1.46% y Reino Unido con un 1.41% de cuota de mercado.

En general, los vehículos eléctricos siguen suponiendo una proporción pequeña (0.2%) de todos los automóviles en circulación [Int17c]. Aunque ahora mismo su presencia en el mercado es limitada, se espera que a corto plazo los EVs aumenten de manera considerable su presencia en nuestras carreteras. Esto puede observarse en la Figura 5.1 donde se muestra el crecimiento en el porcentaje de ventas de EVs esperado en USA para los próximos años.

En el futuro, el proceso de carga de vehículos eléctricos supondrá un reto significativo para la red eléctrica [LDN15]. Esto hace que sea de gran importancia disminuir en la medida de lo posible la carga descontrolada de EVs para (i) evitar picos de demanda eléctrica, (ii) optimizar las inversiones en la infraestructura de red de transporte eléctrico para poder satisfacerlos, (iii) reducir las emisiones de CO₂ para producir esa electricidad extra (normalmente mediante sistemas más contaminantes e ineficientes), así como (v) mitigar el incremento del precio de la electricidad esperado al tener que satisfacer esta demanda eléctrica. No utilizar ninguna estrategia, y dejar que los usuarios sigan cargando sus vehículos de la manera tradicional conocida normalmente como Plug&Charge (P&C), podría ocasionar que los picos de demanda se incrementen hasta un 98% [MVH⁺10]. Un incremento tan grande de la demanda eléctrica podría ocasionar el colapso del

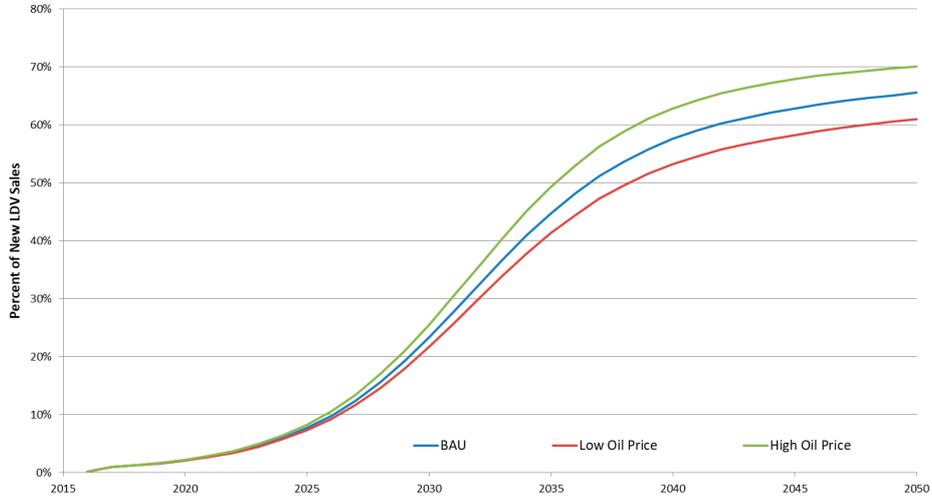


Figura 5.1: Cuota de mercado prevista en USA en base a la evolución del precio de los combustibles [Ene17]. (LDVs se refiere a coches y vehículos similares).

actual sistema de transporte eléctrico [MDMAS10].

Se estima que las ciudades son responsables del consumo del 75 % de la energía mundial, y generan el 80 % de los gases responsables del efecto invernadero [Tel11]. Por tanto, estas ciudades además de fomentar el uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs), deben buscar ser más eficientes y conseguir una movilidad sostenible y comprometida con su entorno [GFK⁺07]. Esto, sin duda, favorecerá la aparición de nuevos puestos de trabajo, mejorará la calidad de vida (QoL) y la bioeconomía local [MCK16]. Para ello, será importante la inversión en el desarrollo de las infraestructuras TIC que favorezcan la conectividad, tanto en calidad como en rapidez [Kom02], encaminándonos al llamado Internet de las Cosas (IoT).

El IoT facilitará la conexión de pequeños dispositivos heterogéneos, que juntos, se comportarán como sistemas más complejos e inteligentes. Por ejemplo, los *Single Board Computers* (SBCs) como, Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone Black, etc., podrán ser integrados con sensores en el desarrollo de productos de IoT [AFGM⁺15]. La presencia de estos dispositivos inteligentes permitirá realizar numerosas funciones, como la detección de fenómenos físicos, desencadenar acciones, maximizar la seguridad, la comodidad y el ahorro de energía [MVD⁺14].

Raspberry Pi es un ejemplo de SBC de bajo coste, que en sus últimas versiones proporciona 40-pin de propósito general (*General Purpose Input and Output*, (GPIO)). Estos pins pueden ser programados, permitiendo comunicar a la Raspberry Pi con diferentes sensores, circuitos, motores o conectarse con otros dispositivos a través de diferentes interfaces.

Teniendo esto en cuenta, en este capítulo se presenta un dispositivo basado en Raspberry Pi. Este dispositivo formará parte de una arquitectura que gracias al IoT lo convierte en un enchufe inteligente que permitirá a los usuarios ahorrar

dinero, ya que permite la recarga de sus vehículos cuando la electricidad es más económica. Además, este sistema ofrece gran flexibilidad, ya que dispone de tres modos de recarga que el usuario podrá seleccionar según sus necesidades en cada momento. Actualmente este dispositivo está bajo proceso de patente, y además ya existe un acuerdo de explotación comercial con una empresa, por lo que en breve estará disponible para los usuarios que deseen adquirirlo.

El artículo está organizado de la siguiente manera: La Sección 5.2 presenta algunos trabajos relacionados con el uso de Raspberry Pi y otros trabajos en los que se proponen enchufes inteligentes. En la Sección 5.3 se detalla la propuesta, su arquitectura tanto desde el punto de vista hardware como software, así como su funcionamiento. La Sección 5.4 muestra los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que se busca reducir el coste de la electricidad requerida para la recarga de vehículos eléctricos. Finalmente, en la Sección 5.5 se presentan las conclusiones más relevantes.

5.2. Trabajos relacionados

En esta sección, se revisan algunos trabajos que utilizan sistemas inteligentes mediante el uso de Raspberry Pi aplicados a diferentes proyectos. Por otro lado, se presentan algunos trabajos en los que se han propuesto enchufes inteligentes.

5.2.1. Sistemas basados en Raspberry Pi

Raspberry Pi es un SBC con arquitectura Advanced RISC Machines (ARM), creado como computador de bajo coste. Fue desarrollado como un proyecto educativo para fomentar la enseñanza de las ciencias de la computación y tuvo gran acogida en los países subdesarrollados, debido sobre todo a su bajo coste. Estos dispositivos, además de su uso en el entorno educativo, también están siendo utilizados en otro tipo de proyectos y soluciones. Por ejemplo, Kumar y Jasuja [KJ17], proponen un sistema para monitorizar la calidad del aire utilizando este tipo dispositivo. Para ello, utilizan una unidad con cinco sensores conectada a una placa Arduino para monitorizar la contaminación del aire. El sistema Arduino está conectado con la Raspberry a través de un puerto USB, y es la encargada de subir los datos de la calidad del aire a la nube. Este dispositivo es capaz de obtener parámetros como partículas en suspensión, monóxido de carbono, dióxido de carbono, temperatura, humedad y presión atmosférica. Un trabajo similar es el de Alvear et al. [AZC⁺16], que proponen un sistema para monitorizar la contaminación ambiental utilizando sensores móviles. Este dispositivo recoge los datos de contaminación del aire utilizando sensores integrados y transfiere los datos capturados a una placa Arduino, para enviarlos a una Raspberry y posteriormente almacenarlos en la nube a través de un dispositivo Android. Los niveles de contaminación del aire pueden ser mostrados a los usuarios en tiempo real, creando mapas detallados de distribución de contaminación utilizando técnicas de predicción espacial, mostrando parámetros como Ozono, CO₂, la contaminación del aire y la temperatura.

Asha et al. [JVK⁺17] proponen la automatización de una subestación eléctrica usando una Raspberry pi. Para ello, utilizan el software Codesys IEC 61131-3 para convertir una Raspberry en una PLC. A través de una interfaz con relés permite el control automático de la subestación. También proporciona opciones de conectividad, acceso remoto de datos, permitiendo simplificar y abaratar el tradicional modelo de PLC y sistemas SCADA normalmente utilizados. De forma similar, Brito et al. [BFFB16], presentan un sistema basado en dispositivos de bajo coste para automatizar el funcionamiento de una subestación eléctrica. En concreto, también utilizan dispositivos Arduino y Raspberry Pi, mediante el uso de sistemas compatibles con el estándar IEC 61850.

Por otro lado, Kadiyala et al. [KMBM17] utilizan una Raspberry Pi como herramienta que permita monitorizar los procesos industriales. En concreto, su propuesta es capaz de recoger datos de procesos industriales, utilizando sensores (de voltaje, corriente, temperatura, intensidad de luz y nivel de agua) que están conectados a microcontroladores Atmega, lo que permite almacenar los datos recogidos en la nube. Los datos se pueden observar en una pantalla LCD conectada a la Raspberry, o de manera remota a través de una página web.

Ikhanekar et al. [IKU⁺15] utilizan un robot basado en una Raspberry Pi conectada a una placa Arduino, diseñado para la vigilancia y que, gracias a la capacidad de conexión, permite realizar transmisión de vídeo en directo. El sistema propuesto está formado por un conjunto de sensores (IR, ultrasónicos...) y servos, se alimenta por una batería externa de 10,400 mAh, y dispone de sensores para evitar la colisión con personas u objetos.

En cambio, Kumar et al. [KSG17] proponen un sistema de detección de obstáculos y prevención de colisiones para vehículos, lo que permite que este sistema puede ser usado en vehículos autónomos. Para ello, utilizan una Raspberry Pi junto con una cámara web y sensores ultrasónicos. La cámara es utilizada para detectar objetos móviles o estáticos mientras que el sensor ultrasónico calcula la distancia del vehículo en movimiento y el objeto en tiempo real. El sistema alerta al vehículo del obstáculo que está delante, de modo que ayuda a evitar colisiones. De forma similar, Tayeb et al. [TPL17] presentan un prototipo de un vehículo autónomo de nivel 3 usando Raspberry Pi, que es capaz de detectar vehículos cercanos mediante la utilización de un sensor de infrarrojos (IR). En concreto, utilizan una arquitectura y la ponen a prueba en un coche controlado por WiFi, al cual le acoplan una Raspberry, una protoboard y sensores IR, alimentados por una batería externa. Realizan dos experimentos con dos prototipos para demostrar la interconectividad y la funcionalidad del prototipo desarrollado.

El uso de dispositivos de bajo coste como Raspberry Pi es cada vez más común. Prueba de ello son los trabajos que se han presentado, en lo que se demuestra su versatilidad en diversos campos, como: (i) medir la calidad del aire [KJ17, AZC⁺16], (ii) controlar una subestación eléctrica [JVK⁺17, BFFB16], (iii) monitorizar procesos industriales [KMBM17], (iv) sistemas de vigilancia [IKU⁺15], o (v) para utilizarlo en sistemas que eviten colisiones entre vehículos [KSG17, TPL17].

5.2.2. Enchufes Inteligentes

Los enchufes inteligentes son dispositivos que suelen incorporar capacidades de comunicación, o incluyen cierta "inteligencia" a la hora de planificar o controlar su funcionamiento. Estos dispositivos normalmente permiten controlar de forma remota los aparatos eléctricos que se tengan enchufados, así como monitorizar el consumo eléctrico, lo que permite ahorrar en el coste de la energía eléctrica utilizada. A continuación, se exponen algunos trabajos que han realizado diversas propuestas relacionadas con este tipo de dispositivos.

Ridi et al. [RGH13] presentan un enchufe inteligente diseñado para el reconocimiento y clasificación de electrodomésticos de forma automática. Su propuesta se basa en dispositivos de bajo coste que realizan mediciones del consumo eléctrico de manera periódica, produciendo series de mediciones. A partir de esas medidas recogidas, de los algoritmos K-Nearest Neighbor (KNN) y Gaussian Mixture Models (GMM), y de una base de datos de características eléctricas, son capaces de identificar con un 93.6% de acierto el electrodoméstico que está funcionando en cada momento.

Desde otra perspectiva, Kumar y Pati [KP16] proponen la utilización de Arduino y Raspberry Pi para implementar un sistema de control de electrodomésticos del hogar. Este sistema está formado por varios bloques: (i) uno de ellos utiliza Arduino y un tablero de relés para controlar el encendido y apagado de los electrodomésticos de la casa, (ii) otro bloque está constituido por una Raspberry Pi, un Arduino, y otros elementos como un micrófono, una cámara, altavoces, una pantalla LCD y una alarma sonora. Con estos componentes construyen un sistema que permite saber cuándo llega un visitante, comprobar quién es a través del vídeo, e incluso escuchar un mensaje. Hadwan and Reddy [HR16] presentan un control inteligente del hogar utilizando una Raspberry Pi y un Arduino UNO. En concreto, la propuesta permite controlar y monitorizar remotamente los electrodomésticos del hogar a través de un dispositivo Android. También puede controlar la temperatura y la humedad, así como detectar si hay alguien en casa a través de sensores de movimiento.

Por otra parte, Musleh et al. [MDF17] presentan un enchufe inteligente que permite encender y apagar dispositivos de manera programada. El sistema consiste en un conjunto de enchufes esclavos controlados por un enchufe maestro. Además, utiliza una Raspberry Pi, y el protocolo de comunicación ZigBee. Ahmed et al. [AMH⁺15] proponen el Home Energy Management System (HEMS), un sistema está basado en sensores Zigbee para medir el consumo de energía de los electrodomésticos. Además, también permite encender y apagar electrodomésticos. Sus resultados experimentales demuestran que los componentes, de bajo coste, permiten medir el consumo eléctrico de una manera similar al obtenido por un osciloscopio.

A nivel comercial existen en el mercado multitud de enchufes que se venden como inteligentes, aunque el funcionamiento de la mayoría de estos dispositivos es muy sencillo. Básicamente, se enchufan y se configuran a través de un teléfono inteligente y, en la mayoría de los casos, únicamente se podrán encender y apagar de forma remota. Tenemos ejemplos de este tipo de dispositivos comerciales ofrecidos por empresas como Edimax, belkin, D-Link, AVM, y Efergy,

[Edi18, Bel18, D-L18, AVM18, Efe18], que ofrecen enchufes capaces de encender y apagar cualquier electrodoméstico de forma remota con un teléfono inteligente. Entre las características más comunes que suelen tener este tipo de dispositivos destacan las siguientes:

- Encender y apagar cualquier aparato de manera remota
- Estadísticas de la potencia y/o consumo de energía en tiempo real
- Conocer el coste de la electricidad consumida
- Posibilidad de programar horarios de encendido y apagado automático
- Posibilidad de encender y apagar de manera aleatoria

En general, excepto la propuesta de Ridi et al. [RGH13], se observa que todos los enchufes inteligentes mencionados no lo son realmente, ya que se limitan a poder encender y apagar dispositivos de forma remota [KP16, HR16, MDF17, AMH⁺15, Edi18, Bel18, D-L18, AVM18, Efe18]. Por lo que en la literatura presentada no hay ningún dispositivo que permita enchufarse de manera automática y permita recargar un dispositivo de alto consumo como un vehículo eléctrico permitiendo ahorrar en el precio de la luz.

A diferencia de lo anterior, en este capítulo presentamos un enchufe inteligente destinado a la recarga de los vehículos eléctricos de manera automática y eficiente.

5.3. Arquitectura del sistema de recarga de EVs

Un aspecto importante en este dispositivo es la tarifa eléctrica que tiene el usuario. El mercado eléctrico español es complejo y existe una gran cantidad de tarifas. La mayoría de estas tarifas están concertadas con las compañías eléctricas (tarifa de libre mercado), algunas tienen precios fijos y otras tienen precios variables según la hora, pero que son conocidos y no cambian a lo largo del año (ver Sección 2.3). Sin embargo, otras tarifas tienen precios variables según la hora en base al coste de producción (PVPC). Los precios de estas últimas son publicados el día anterior por Red Eléctrica de España (REE) [Red17], que es el operador del sistema eléctrico en el mercado español. Teniendo en cuenta esto, para realizar una correcta planificación de la recarga y así poder reducir el coste de la misma, sería necesario conocer la tarifa eléctrica del usuario, y así saber el precio de la electricidad en cada instante. Después se planificaría la recarga óptima, automática y automatizada de su vehículo en base al modo de recarga elegido permitiendo a los usuarios ahorrar en su factura de la luz.

Buscando adaptar el sistema a las necesidades de los usuarios, el enchufe dispone de tres modos de recarga, que determinan la forma en que se recargará el vehículo. Cuando un usuario acuda a recargar su vehículo, bastará con que lo enchufe y pulse el botón seleccionando el modo de recarga deseado. El enchufe dispone de tres modos:

CAPÍTULO 5. ENCHUFE INTELIGENTE PARA LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

- **Plug&Charge:** método tradicional de recarga. Cuando se selecciona este modo, comienza la recarga de manera inmediata, de la misma forma que lo haría un enchufe común. Este modo de recarga sería el indicado cuando el nivel de la batería del vehículo sea extremadamente bajo.
- **Save:** modo de recarga económico que recarga el vehículo primando el ahorro. El usuario deberá proporcionar el porcentaje de batería que dispone el vehículo y la fecha y hora de salida prevista, datos que serán enviados al servidor. El sistema buscará el periodo óptimo de inicio de la recarga en términos económicos, devolviendo la información al enchufe para que se active cuando tenga que comenzar el proceso de recarga.
- **Safe:** modo de recarga seguro. Asegura que el vehículo dispondrá de un porcentaje mínimo en caso de que el usuario pueda requerirlo por alguna urgencia. Al igual que en el método anterior, el usuario deberá proporcionar el porcentaje de batería que dispone el vehículo y la fecha y hora de salida prevista. De esta forma, se recargarán las baterías de manera inmediata hasta que se alcance el 60 % de carga (este parámetro puede ser modificado), y el resto se recargará utilizando el modo Save.

El sistema está compuesto por elementos de bajo coste, como Raspberry Pi, relés, y leds. Además de seleccionar el periodo óptimo de recarga, el sistema permite monitorizar en tiempo real el consumo del enchufe, almacenando los datos en una base de datos para su posterior análisis o consulta. También permite encender y apagar el enchufe en caso de ser necesario, e incluso variar la potencia con la que se va a recargar el vehículo eléctrico. El sistema está compuesto por los siguientes elementos, que se muestran en la Figura 5.2:

- **Enchufe inteligente:** el funcionamiento será el de un dispositivo cliente, enviando las peticiones al servidor y ejecutando las órdenes que le devuelva.
- **Servidor:** será el encargado de recibir peticiones de los usuarios, de consultar sus datos, obtener las tarifas, planificar la recarga y enviarle las instrucciones al enchufe.
- **Base de Datos (DB):** contendrá los datos del perfil del usuario, las características de su vehículo, del punto de recarga y el histórico de datos de recargas. Según el tipo de tarifa eléctrica que disponga el usuario, el precio de la electricidad en cada instante también se encontrará almacenado en la base de datos.
- **Compañía eléctrica:** en caso de que la tarifa eléctrica no se encuentre en la base de datos, se accederá a ella a través del *Web Service* (WS) de la compañía eléctrica.

El funcionamiento del sistema será de la siguiente manera: el usuario debe enchufar el vehículo al enchufe inteligente. Posteriormente con un dispositivo (teléfono inteligente, ordenador portátil, o tableta) accederá a través de Internet a la aplicación accediendo a su perfil. El usuario tendrá que introducir la fecha y

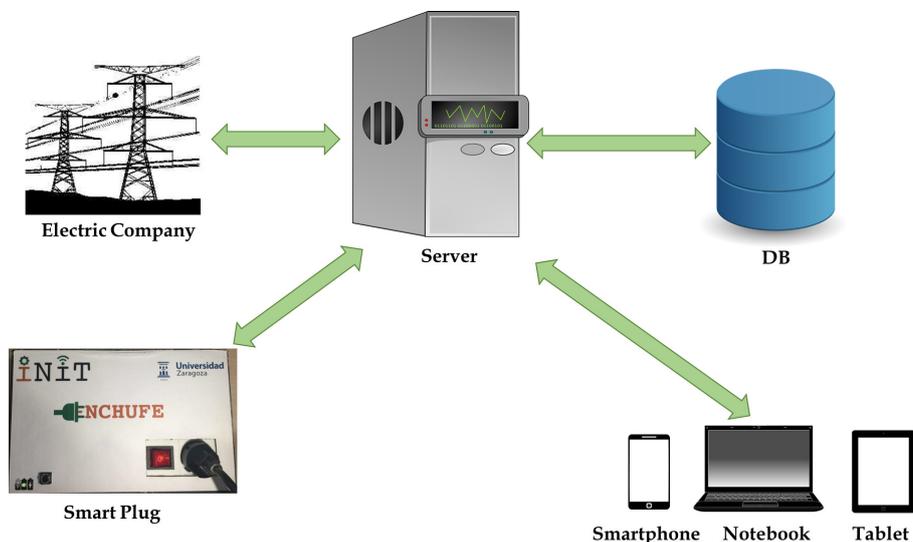


Figura 5.2: Arquitectura general del sistema de recarga inteligente.

hora de salida que tiene prevista, y el nivel en que se encuentran las baterías (State of Charge, (SOC)). Conociendo la hora de salida se puede planificar el mejor momento para iniciar la recarga del vehículo. El servidor, con estos datos buscará las características del vehículo y del punto de recarga en el perfil del usuario. Además, también realizará una búsqueda de la tarifa eléctrica del usuario en su perfil, y en caso de no tenerla la obtendrá del web service de la compañía eléctrica. Con todos estos datos determinará el periodo óptimo de recarga, buscando maximizar el SOC final, y minimizando el precio pagado por la electricidad que se va a consumir. Una vez planificada la recarga le enviará los parámetros al enchufe inteligente, que de manera automática ejecutará las ordenes suministradas por el servidor.

A su vez, el enchufe registrará los datos de la recarga, proporcionándoselos al servidor, que los almacenará en la base de datos para guardar el histórico de recargas del usuario, que podrá ser consultado en cualquier momento en el perfil de usuario.

5.3.1. Hardware

El sistema tiene conectado un conjunto de componentes (ver Figura 5.3), que hacen que desde el punto de vista hardware, la Raspberry Pi funcione como un sistema PLC en tiempo real. Los componentes utilizados son los siguientes:

- **Raspberry Pi:** actúa como computadora del enchufe. Dado que la Raspberry Pi estará interconectada al servidor mediante Internet, será la encargada de enviar las peticiones al servidor, de recibir sus órdenes, así como de administrar su respuesta activando y desactivando los componentes necesarios en cada caso.

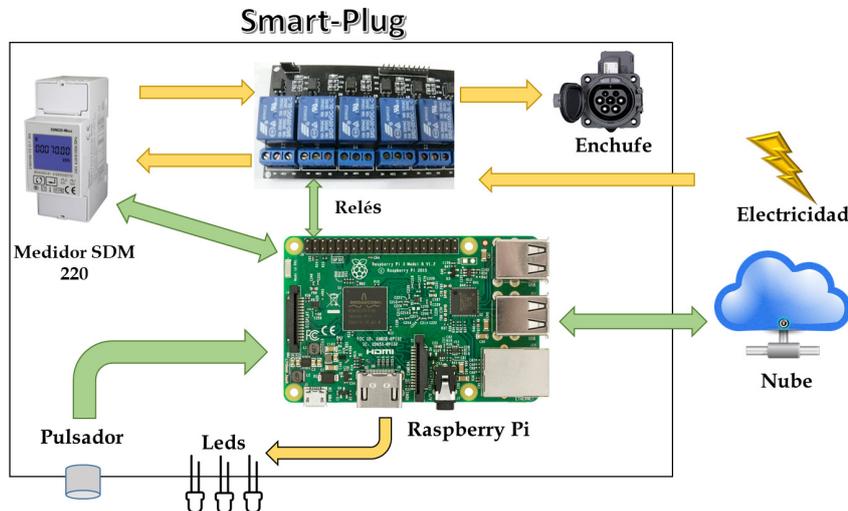


Figura 5.3: Diagrama de componentes del enchufe inteligente.

- **Protoboard:** tablero utilizado para realizar las conexiones eléctricas e interconectar los diferentes componentes electrónicos.
- **Relés:** controlados por la Raspberry, permiten activar y desactivar el paso de electricidad para recargar uno o varios vehículos.
- **SDM220 Modbus:** contador de energía inteligente utilizado para medir el consumo de electricidad. Incluye el estándar IEC 62053-21, y es capaz de soportar una intensidad máxima de 100 A y un voltaje de hasta 276 V.
- **Pulsador:** presionando el pulsador del enchufe se selecciona el modo de recarga deseado.
- **Leds:** cuando el usuario pulsa el botón para indicar el modo de recarga deseado, los leds se apagan y encienden indicando, de manera visual, el modo seleccionado.

En el modelo actual, la potencia máxima de recarga es de 7.36 kW, y el consumo del sistema en reposo es de sólo (230 mA). En la Figura 5.4 se observa el primer prototipo del enchufe inteligente en funcionamiento.

5.3.2. Software

En la sección 5.3.1 se ha presentado la arquitectura del sistema propuesto desde el punto de vista del hardware. En esta sección se presenta el sistema desde el punto de vista del software, mostrando su arquitectura y funcionamiento. Para ello, se utilizan dos aplicaciones software: (i) Enchufe y (ii) Servidor. La arquitectura software del sistema puede observarse con más detalle en la Figura 5.5.

5.3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE RECARGA DE EVS



Figura 5.4: Primer prototipo del enchufe inteligente.

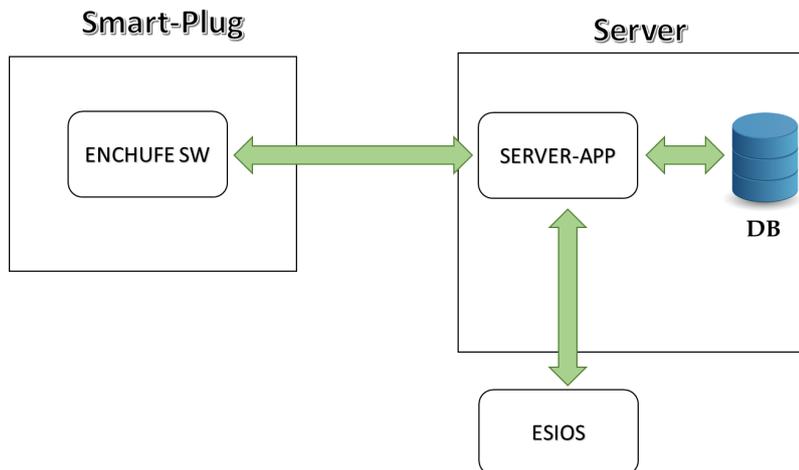


Figura 5.5: Arquitectura Software del enchufe inteligente.

- **Enchufe:** aplicación Java instalada sobre Raspberry Pi. Para ello hace uso de la librería Pi for Java (Pi4J), que permite el acceso y la gestión de las clavijas de Entrada/Salida de propósito general (GPIO pins) de la Raspberry Pi utilizando Java. Esta aplicación es la encargada de detectar cuándo un usuario selecciona un modo de recarga, de gestionar la comunicación con el Servidor (Server-App), y de iniciar la recarga según los parámetros indicados por éste. Para ello, habilitará mediante una señal eléctrica el relé cuando deba comenzar la recarga.
- **Server-App:** aplicación instalada en el Servidor. Es la encargada de recibir las peticiones de los enchufes inteligentes, gestionarlas, realizar los cálculos para determinar el inicio de una recarga óptima, de acuerdo al modo seleccionado por el usuario, y responder las peticiones.

Un aspecto a tener en cuenta es el funcionamiento de las tarifas eléctricas en España. A modo de resumen, para la recarga de vehículos eléctricos las dos tarifas más utilizadas son: (i) Tarifas Reguladas o PVPC, establecidas por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo en las cuales el precio varía a cada hora en base al coste de producción de la electricidad, y las (ii) Tarifas de libre mercado, en las que el usuario contrata cualquiera de las diversas ofertas establecidas por las empresas distribuidoras. En las primeras el precio se conoce el día anterior a través del Sistema de Información del Operador del Sistema (ESIOS) [Red17], mediante el uso de un *Web Service* proporcionado por Red Eléctrica de España (REE). En las segundas, aunque su precio varía a lo largo del día, suele permanecer constante a lo largo del año. En este caso, la tarifa del usuario será almacenada en la base de datos del sistema y consultada cada vez que el usuario recargue su vehículo.

El funcionamiento del sistema, que aparece en la Figura 5.6, es el siguiente:

1. El primer paso sería seleccionar el modo de recarga deseado, indicar el nivel de porcentaje de batería y la fecha y hora prevista de salida. El modo seleccionado será indicado mediante leds, que se encenderán y apagarán mostrando al usuario el modo que está seleccionando. Estos datos son enviados al servidor.
2. Los datos son obtenidos por el servidor; éste consultará los datos del usuario en la base de datos, obteniendo el tipo de vehículo, la capacidad y el tipo de batería. Si su tarifa eléctrica es de Libre mercado se consultará en la base de datos. En caso contrario se obtendría la tarifa a través del Web Service de Red Eléctrica de España, llamado ESIOS, obteniéndose el precio de la electricidad.
3. Una vez recabada toda la información, el servidor procederá a realizar los cálculos necesarios para obtener el inicio de la recarga en función del modo de recarga seleccionado. En el caso de utilizarse el modo P&C la recarga se inicia de manera automática. En caso de utilizarse el modo Save, el servidor obtiene el inicio óptimo de la recarga, que será cuándo el enchufe la inicie. Si se elige el modo Safe la recarga se iniciará de manera automática, pero sólo en caso de que el nivel de la batería sea inferior al configurado, si no se comportará igual que el modo Save.

5.4. EVALUACIÓN DE LAS PRESTACIONES DEL ENCHUFE INTELIGENTE

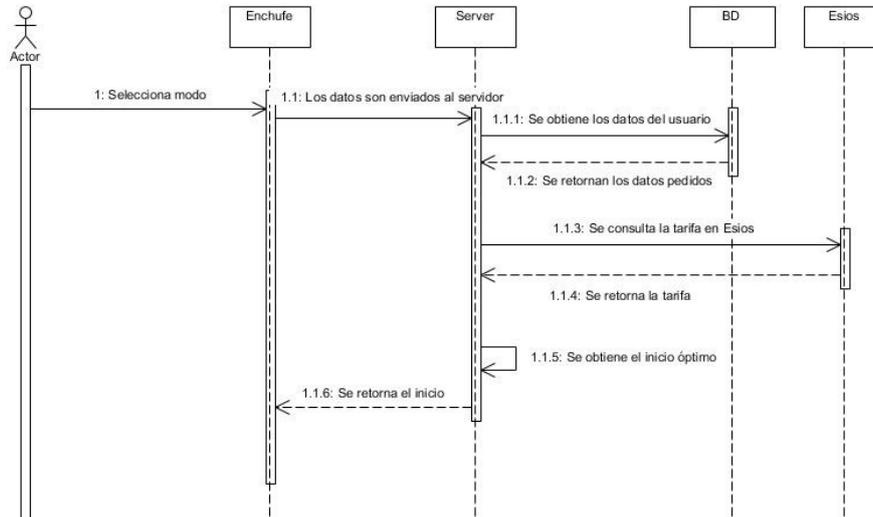


Figura 5.6: Diagrama de secuencia que refleja el funcionamiento del sistema.

- Una vez determinado el inicio de la recarga, se le envía la información al enchufe inteligente, que será el encargado de programarlo, en base a los datos recibidos.

5.4. Evaluación de las prestaciones del enchufe inteligente

Para demostrar los beneficios del enchufe inteligente propuesto en términos de reducción de coste de las recargas, se realizó una simulación con 1.000 vehículos a lo largo de un año. Los vehículos utilizados en la simulación reflejan la situación del mercado español, ya que el modelo y las características específicas de los vehículos simulados siguen los datos de cuota de mercado (ver Tabla 5.2). Se tuvieron en cuenta dos tarifas reales de electricidad (la PVPC, en concreto la destinada para vehículos eléctricos (SuperValle), y la de libre mercado). El resto de los parámetros utilizados en las simulaciones se muestran en la Tabla 5.3.

En el primer escenario se ha utilizado la tarifa eléctrica PVPC para recargar el vehículo. La Tabla 5.4 muestra los resultados obtenidos en este escenario. En particular se presenta: (i) el coste total de recargar un vehículo promedio durante un año, (ii) las diferencias entre los modos de recarga Save y Safe respecto a Plug&Charge, y (iii) el precio medio en euros del kWh.

Se observa que el coste de recargar el vehículo utilizando el método P&C a lo largo de un año es de 605.41 €, mientras que si se utiliza el modo Save el coste sería de 163.86 €, lo que supone un ahorro de un 72.93 % respecto al modo P&C. Si por el contrario se recarga el vehículo utilizando el modo Safe, el coste de la electricidad consumida es de 278.06 €, un ahorro de un 54.1 % respecto al P&C.

CAPÍTULO 5. ENCHUFE INTELIGENTE PARA LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Cuadro 5.2: Datos de los EVs utilizados en la simulación (España, 2015)

Modelo	Batería (kWh)	Cuota de Mercado
Renault Zoe	22	21.58 %
Nissan Leaf	24	18.72 %
Mitsubishi Outlander	12	16.51 %
Volkswagen Golf	24.2	10.57 %
KIA Soul	27	9.03 %
BMW i3	22	8.81 %
Audi A3	22	5.72 %
Porsche Cayenne	10.8	3.52 %
Smart fortwo	17.6	3.30 %
Volkswagen Up	18.7	2.24 %

Cuadro 5.3: Parámetros de simulación

Parámetros	Valores
Número de vehículos	365,000 (1,000 * 365 days)
Modelo de llegada de vehículos	Normal: $\mu = 1,080$ min., $\sigma = 120$ min.
Modelo de duración del viaje	Weibull: $\alpha = 45$ min., $\beta = 1,9$, $\gamma = 0$
Modelo de tiempo de carga	Normal: $\mu = 700$ min., $\sigma = 150$ min.
Modelo de nivel de batería	Normal: $\mu = 50\%$, $\sigma = 10\%$
Potencia del punto de recarga	3.68 kWh (IEC 62196 Mode 1)
Pérdidas por calor	10 %

Cuadro 5.4: Resultados obtenidos aplicando la tarifa eléctrica "PVPC"

Métrica	P&C	Save	Safe
precio de la electricidad consumida (€/al año)	605.41	163.86	278.06
diferencia de precio comparado con P&C (%)	-	-72.93 %	-54.10 %
precio medio del kWh (€)	0.1404	0.0577	0.0656

Cuadro 5.5: Resultados obtenidos aplicando la tarifa eléctrica "libre mercado"

Métrica	P&C	Save	Safe
precio de la electricidad consumida (€/al año)	654.24	190.52	326.17
diferencia de precio comparado con P&C (%)	-	-70.87 %	-50.14 %
precio medio del kWh (€)	0.1519	0.0519	0.0761

5.4. EVALUACIÓN DE LAS PRESTACIONES DEL ENCHUFE INTELIGENTE

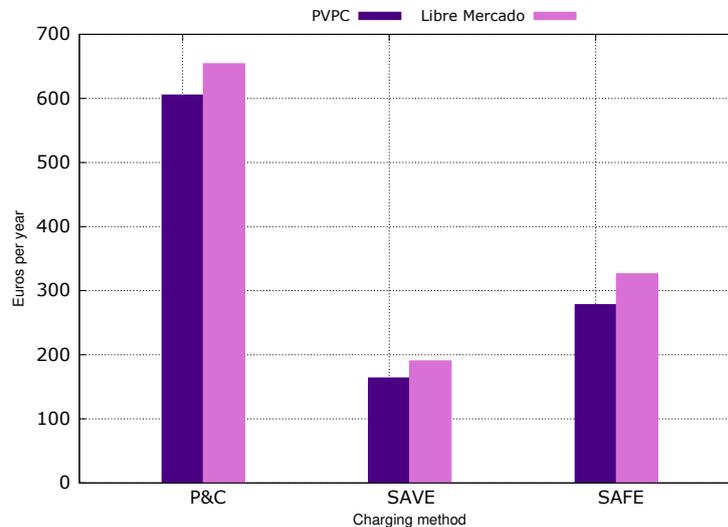


Figura 5.7: Coste de la recarga para un año para cada modo de carga con las dos tarifas analizadas.

En el segundo escenario se ha utilizado la tarifa de libre mercado para recargar el vehículo. Como se muestra en la Tabla 5.5, el coste de recargar con el modo P&C con esta tarifa a lo largo de un año sería de 654.24 €, mientras que el coste asociado al modo de recarga Save sería de 190.52 €, lo que supone un ahorro de un 70.87% respecto al modo P&C. Si por el contrario se optase por el modo de recarga Safe, el coste de la recarga sería de 326.17 €, un 50.14% inferior al ofrecido por el modo P&C.

Cabe destacar que en los dos escenarios planteados se obtienen resultados muy similares, algo que se observa en la Figura 5.7. También puede observarse que si se utiliza el método P&C resulta más económica utilizar la tarifa PVPC que la tarifa de libre mercado, algo que se repite con el resto de métodos. Esto parece indicar que la tarifa PVPC es más económica que la de libre mercado, por lo que sería la más idónea para la recarga de vehículos eléctricos.

En lo que respecta al nivel de carga, la Figura 5.8 muestra cómo el método Safe tiene unos niveles de carga similares a los obtenidos con P&C. Sin embargo, el método Save no termina de cargar las baterías al completo. Esto es debido a que este modo da prioridad a reducir el coste de la recarga, sin tener en cuenta si las baterías van a ser recargadas por completo o no, ya que sólo recarga en los periodos en que el precio de la electricidad es más económico. También se observa que utilizando la tarifa de libre mercado se recarga más porcentaje de batería que si se utiliza la tarifa PVPC. Esto es debido a que con esa tarifa la recarga comienza más temprano, por lo que da más tiempo a que el vehículo pueda recargarse.

Otro aspecto a tener en cuenta es el importe del kWh consumido en las recargas. En la Figura 5.9 se observa cómo con el método P&C se obtiene un precio del kWh mayor con la tarifa de libre mercado frente a PVPC. Con este dato se puede deducir

CAPÍTULO 5. ENCHUFE INTELIGENTE PARA LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

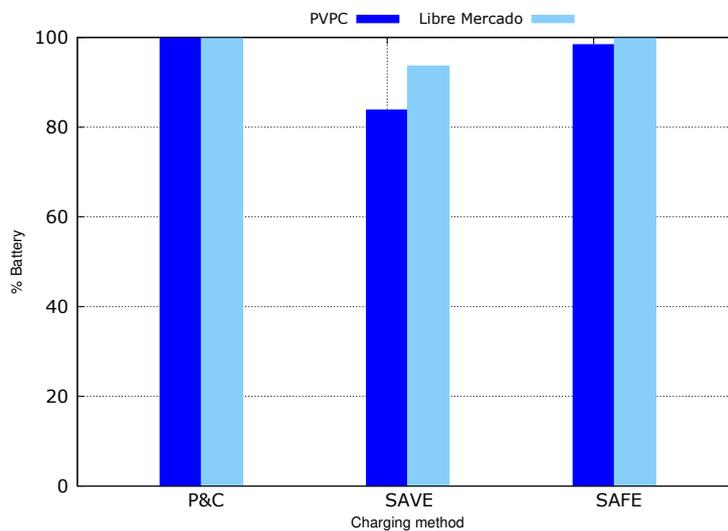


Figura 5.8: Porcentaje del nivel de la batería medio después de recargar el vehículo para cada modo de carga con las dos tarifas analizadas.

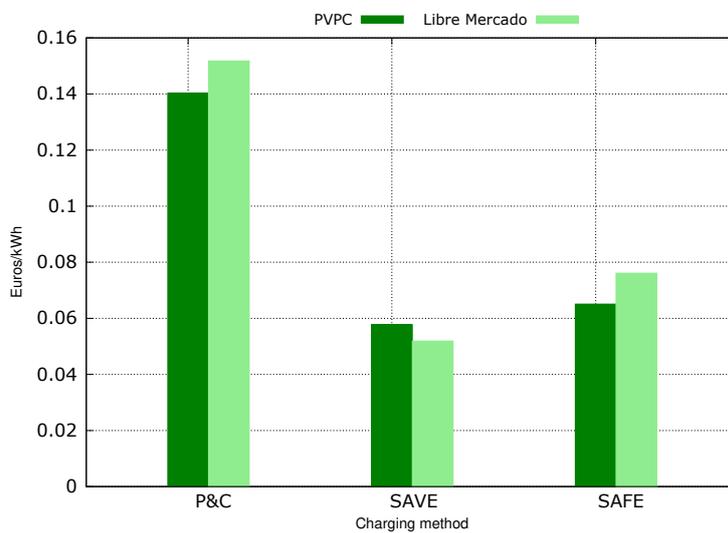


Figura 5.9: Promedio de euros/kWh para cada modo de carga con las dos tarifas analizadas.

que en los momentos en los que existe una mayor demanda de electricidad, esta tarifa ofrece unos precios más elevados. Sin embargo, utilizando el modo Save se consigue un precio menor utilizando la tarifa de libre mercado. Esto es debido a que en el periodo de baja demanda esta tarifa ofrece unos precios inferiores a los ofrecidos por la tarifa PVPC.

5.5. Conclusiones

Las ventas de vehículos eléctricos están aumentando de manera significativa. Por otro lado, se están consiguiendo mejoras en los sistemas de comunicación encaminándonos a lo que podríamos llamar como Internet de los Vehículos (IoV). Para una correcta implantación del vehículo eléctrico será necesario realizar las recargas evitando los picos de demanda, buscando reducir el coste de las recargas y realizar un uso eficiente de los recursos.

De acuerdo con esto, presentamos un enchufe inteligente que ofrece tres modos de recarga: (i) Plug&Charge, (ii) Save y (iii) Safe. De esta manera se permite al usuario elegir aquel modo que mejor se ajuste a sus necesidades. El enchufe inteligente ha sido probado con dos tarifas eléctricas, obteniéndose resultados muy parejos en ambas pruebas.

Los resultados obtenidos muestran que con la tarifa PVPC, utilizando el modo Save y el Safe, nuestra propuesta permite un ahorro de un 72.93% y un 54.1% respecto al modo P&C. Si por el contrario se opta por utilizar la tarifa de libre mercado, la utilización del modo Save permite un ahorro del 70.87%, mientras que si se utiliza el modo Safe se obtiene un ahorro del 50.14%.

Sin embargo, los resultados nos indican que pese a que la tarifa de libre mercado es en principio más cara, al usar nuestro enchufe (en el modo Save) pasa a ser más económica para el consumidor que la tarifa PVPC, ya que el coste en términos de €/kWh es ligeramente menor.

Estos resultados muestran que la utilización de puntos de recarga inteligentes, basados en adaptar el proceso de recarga a parámetros como la demanda eléctrica y el precio de la electricidad, son muy convenientes. Su uso permitiría al usuario obtener una reducción drástica del precio de las recargas de su vehículo, y también sería beneficioso para las empresas eléctricas, ya que les permitiría amortiguar los picos de demanda que, sin duda, van a producir la recarga de estos vehículos en el futuro.

Como resultado aplicado de este trabajo se ha presentado una solicitud de patente del enchufe inteligente, se ha solicitado también su extensión (PCT) para poder protegerlo a nivel internacional, y además, se ha firmado una licencia de explotación con una empresa para comercializarlo.

Capítulo 6

Conclusiones, Publicaciones y Trabajo futuro

Los vehículos propulsados por combustibles fósiles siguen siendo, a día de hoy, el modo de transporte elegido mayoritariamente por los usuarios. Sin embargo, aspectos como la constante variación en el precio del petróleo y sobre todo la contaminación, están provocando que esta situación cambie. Además, en el último año grandes ciudades como Berlín, Londres, Madrid, París o Roma, se han visto obligadas a tomar medidas restrictivas para atenuar los altos niveles de contaminación producida por el tráfico. Las instituciones públicas y las empresas privadas han puesto en marcha medidas para fomentar la electromovilidad, estableciendo incentivos en la compra y uso de vehículos eléctricos. Incluso se ha anunciado por parte de varias regiones y países la intención de prohibir la circulación o la venta de vehículos propulsados por combustibles fósiles, lo que puede provocar un incremento en las ventas de vehículos eléctricos.

Teniendo en cuenta que las ventas de vehículos eléctricos están aumentando considerablemente, y que se prevé que éstas aumenten todavía más, será necesario desarrollar una red de puntos de recarga, para que los usuarios puedan recargar sus vehículos de forma rápida, cómoda y barata. El método más común utilizado para recargar los vehículos eléctricos es el conocido Plug&Charge, en el que el vehículo comenzaría a recargarse inmediatamente después de ser enchufado a la corriente. Sin embargo, este método no es muy eficiente ya que no tiene en cuenta ningún parámetro que pueda reducir el coste de la recarga o aumentar su eficiencia.

Por otro lado, las personas suelen moverse por patrones de movilidad, que suelen basarse en hábitos y costumbres de la sociedad. Esto provoca que, por ejemplo, a cierta hora las personas abandonen mayoritariamente sus trabajos para dirigirse a sus hogares. En caso de utilizar vehículos eléctricos, esto puede ser un factor clave, puesto que sería el momento en que comenzarían a recargar sus vehículos, produciendo un aumento masivo de la demanda eléctrica. Este proceso podría incluso producir un colapso del sistema de suministro eléctrico, provocando apagones y averías en subestaciones eléctricas, siendo necesarias grandes inversiones económicas para satisfacer dicha demanda.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, PUBLICACIONES Y TRABAJO FUTURO

Durante el desarrollo de esta Tesis, se han generado una serie de contribuciones, procedemos a enumerar las más relevantes:

- Revisión de la situación actual del vehículo eléctrico, de sus características más importantes, de las tecnologías utilizadas en sus baterías, y de los aspectos más importantes que hay que tener en cuenta para el proceso de recarga, incluyendo los estándares disponibles en la actualidad.
- Creación de un simulador que permite recrear escenarios para predecir la demanda y simular métodos de recarga para vehículos eléctricos.
- Propuesta de nuevas metodologías de recarga para los vehículos eléctricos. En concreto, se han propuesto cuatro nuevos métodos: (i) Cheapest, (ii) Cheapest Starting, (iii) Low Cost y (iv) Last Period. Estos métodos, con los escenarios planteados, han conseguido un ahorro del coste de las recargas de entre un 46.9% y un 75.2% respecto al método Plug&Charge, el método de recarga más utilizado actualmente.
- Implementación de un prototipo de enchufe inteligente para la recarga adaptativa y económica de vehículos eléctricos. El prototipo creado se ha protegido intelectualmente a través de la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la Universidad de Zaragoza. En concreto, en marzo de 2017 se solicitó una Patente Nacional, y justo un año después se presentó la extensión PCT para protegerlo a nivel internacional. Además, se ha firmado un acuerdo de explotación con la empresa LugEnergy para la explotación comercial de la invención.

Habiendo alcanzado todos nuestros objetivos predefinidos, consideramos que el objetivo final de esta Tesis se ha alcanzado con éxito, y así concluimos esta disertación. A continuación, pasamos a presentar las publicaciones, patentes y otros resultados relacionados con el trabajo realizado.

6.1. Publicaciones relacionadas con la Tesis

El trabajo de investigación relacionado con esta Tesis ha resultado en 5 publicaciones; entre ellos tenemos 3 artículos de revista (2 de ellos actualmente en proceso de revisión), todos indexados en la base de datos de Journal Citation Reports (JCR), 1 congreso internacional, 1 congreso nacional y 1 solicitud de patente (con extensión internacional y contrato de explotación en vigor). A continuación presentamos cada uno de ellos, junto a una breve descripción.

6.1.1. Revistas

[TSSM⁺18b] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Francisco J. Martinez, Piedad Garrido, and Johann M. Marquez-Barja, “Enhancing the charging process of electric vehicles at residential homes”, en *IEEE Access*, April, Vol. 6, pp. 1-14, 2018. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2829158>

Debido al aumento de las ventas de vehículos eléctricos, parece esencial establecer estrategias de carga eficientes, especialmente teniendo en cuenta que muchos de estos vehículos se recargarán en estacionamientos privados, donde las características de los puntos de recarga suelen ser bastante limitadas. En este artículo, proponemos cuatro métodos de carga diferentes: Cheapest (C), Cheapest Starting (CS), Low Cost (LC), y Last Period (LP), como una alternativa al tradicional Plug and Charge (P&C). Nuestro objetivo es encontrar mejores estrategias, que permitan un proceso automático, eficiente y programado de la recarga de vehículos eléctricos, promoviendo las recargas en horas de menor actividad y así evitar las demandas pico de energía, donde los precios de la electricidad son mayores. De acuerdo con esto, un cargador inteligente podría incorporar nuestros métodos propuestos para mejorar y abaratar el proceso de recarga en los hogares. Para evaluar esta propuesta, se simula la recarga de la batería de 1,000 vehículos por día durante un año completo, considerando el uso de enchufes eléctricos domésticos y los precios reales de la electricidad. Además, se han simulado tres escenarios diferentes: (i) un escenario de demanda habitual (simulando la recarga diaria de los vehículos), (ii) un escenario de alta demanda (en el que consideramos que los vehículos requieren más energía para recargar completamente sus baterías), y (iii) un escenario de demanda extra, en el que los vehículos llegan con un nivel promedio de batería de sólo un 25%. Los resultados de la simulación demuestran que, al usar estos métodos de carga, podemos ahorrar entre un 46.9% y un 75.2% de coste de las recargas, mientras que una vez finalizado el proceso de carga mantenemos unos niveles de batería muy similares al tradicional P&C.

IEEE Access es una revista electrónica de carácter abierto y multidisciplinar, que publica resultados originales de investigación, y cuyo alcance comprende todos los campos de interés de IEEE (Informática, Electrónica, Comunicaciones, etc.), haciendo especial hincapié en los artículos orientados a aplicaciones y temas interdisciplinarios.

En el JCR del año 2016, la revista IEEE Access tiene un Factor de Impacto de **3.244**, lo que la coloca en la posición **27/146, (Q1)**, de la categoría *COMPUTER SCIENCE, INFORMATION SYSTEMS*.

[TSSG+18] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Piedad Garrido, Francisco J. Martinez, and Johann M. Marquez-Barja, “A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges”, en *Energies*. 2018. En proceso de revisión.

Los vehículos eléctricos (EVs) están ganando impulso debido al incremento del precio de los carburantes, a las ventajas e incentivos fiscales para su compra, así como al aumento de la conciencia ecológica. En este artículo

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, PUBLICACIONES Y TRABAJO FUTURO

presentamos brevemente su historia y realizamos un análisis de la situación actual del mercado y de sus perspectivas de futuro. Además, dado que uno de los aspectos fundamentales en este tipo de vehículos es la batería, se expondrán las tecnologías utilizadas desde las primeras Lead-acid batteries, hasta las de Lithium-ion, que son las más utilizadas en la actualidad. También revisamos los diferentes estándares disponibles para la recarga de EVs, y finalizamos el trabajo, presentando algunas ideas interesantes sobre lo que se espera en un futuro cercano en este campo, así como los aspectos de investigación que todavía quedan abiertos para la comunidad científica.

Energies es una revista de investigación científica de libre acceso, relacionada con el desarrollo de tecnología, ingeniería, fundamentos de la energía y sistemas de conversión energéticos.

En el JCR del año 2016, la revista Energies tiene un Factor de Impacto de **2.262**, lo que la coloca en la posición **45/92, (Q2)**, de la categoría *ENERGY & FUELS*.

[TSSGM18b] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Piedad Garrido, and Francisco J. Martinez, “Smart Money-Saving Plug for charging Electric Vehicles”, en *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2018. En proceso de revisión.

En el futuro, nuestras ciudades van a enfrentarse a diferentes retos, como la administración sostenible de los recursos, la intercomunicación de múltiples y diversos dispositivos, o la implantación masiva del vehículo eléctrico (EV). Teniendo en cuenta estos factores, en este artículo, presentamos un enchufe inteligente que permite la recarga eficiente y económica de los EVs, evitando hacerlo en aquellos momentos en los que se producen picos de demanda cuando el precio de la electricidad es más alto. En concreto, este enchufe ofrece tres métodos de recarga: (i) Plug&Charge, (ii) Save y (iii) Safe, pudiendo el usuario elegir aquél que mejor se adapte a sus necesidades. De acuerdo a las simulaciones realizadas, los usuarios españoles podrían obtener un ahorro en la factura de la luz de entre un 50.14 % y un 72.93 % al recargar sus EVs.

IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine (ITSM) es una revista que publica ideas de investigación innovadoras, resultados de aplicaciones, y casos de estudio de aplicaciones en todas las áreas relacionadas con los Sistemas Inteligentes de Transporte.

En el JCR del año 2016, la revista IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine tiene un Factor de Impacto de **3.654**, lo que la coloca en la posición **8/34, (Q1)**, de la categoría *TRANSPORTATION SCIENCE & TECHNOLOGY*.

6.1.2. Congresos internacionales

[TSSG⁺17] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Piedad Garrido, Francisco J. Martinez, Carlos T. Calafate, and Johann M. Marquez-Barja, “On the Prediction of Electric Vehicles Energy Demand by using Vehicular Networks”, en *9th IFIP Wireless Days Conference*, Oporto, Portugal, pp. 198-200, Marzo 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/WD.2017.7918143>

En este artículo, proponemos una arquitectura integral basada en las tecnologías de comunicación vehicular, considerando las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V) y vehículo a infraestructura (V2I). Además, presentamos un estudio sobre el proceso de carga de EVs. Esta propuesta aborda tres cuestiones principales: (i) el conocimiento de la cantidad de vehículos que recargarán sus baterías en un momento y lugar, (ii) el conocimiento de los puntos de recarga disponibles, y (iii) la predicción de la demanda de electricidad. Los resultados obtenidos muestran que este sistema puede predecir la cantidad de electricidad que los vehículos eléctricos necesitarán para recargar sus baterías con una antelación de hasta 180 minutos.

Wireless Days Conference es un importante congreso internacional que tiene como objetivo reunir a investigadores, tecnólogos y visionarios del mundo académico, centros de investigación e industria, ingenieros y estudiantes para intercambiar, discutir y compartir sus experiencias, ideas y resultados de investigación sobre los aspectos teóricos y prácticos de las redes inalámbricas. En 2017, recibieron **78** trabajos procedentes de 38 países diferentes y seleccionaron los mejores, presentando una tasa de aceptación del **33.3** %.

6.1.3. Congresos nacionales

[TSSGM16] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Piedad Garrido, y Francisco J. Martinez, “Arquitectura para integrar los vehículos eléctricos en las Smart Cities del futuro”, en *XXIII Jornadas Sarteco*, Salamanca, España, pp. 385-390, Septiembre 2016.

El continuo desarrollo de las tecnologías de información y de la comunicación está facilitando que cada vez estemos más conectados. Estos avances, junto con el desarrollo de otras disciplinas como la Inteligencia Artificial permiten que nos dirijamos más rápidamente hacia las ciudades del futuro, las Smart Cities.

Las disciplinas en las que más se está investigando dentro de las ciudades inteligentes son los Sistemas de Transporte y las Redes Vehiculares. Sin

embargo, uno de los actores comúnmente olvidados y que tendrá un papel importante en los próximos años es el vehículo eléctrico. En este artículo, proponemos una arquitectura que, mediante la utilización de la comunicación entre vehículos (V2V) y la infraestructura (V2I), facilitará la integración del vehículo eléctrico en las Smart Cities, añadiendo funcionalidades que beneficiarán tanto a usuarios como a empresas.

Las Jornadas Sarteco es un congreso científico-técnica nacional que se celebra anualmente desde 1990. El objetivo básico de este congreso es reunir investigadores españoles para intercambiar sus experiencias, presentar y discutir resultados de investigación, promover la coordinación entre grupos españoles y compartir sus ideas sobre tendencias relacionadas con paralelismo, arquitectura y redes de computadoras.

6.1.4. Patentes

[TSSGM18a] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Piedad Garrido, y Francisco J. Martínez, “Procedimiento y Sistema de Recarga de Vehículos Eléctricos”, *Oficina Española de Patentes y Marcas*, Madrid, España, Marzo 2017.

Solicitud P201730453 de patente nacional con referencia 901 517, depositada el 28 de marzo de 2017 en la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM). Hace unos meses se firmó una licencia de explotación con la empresa LugEnergy que posibilitará que la invención pueda ser desplegada con exclusividad en cualquier parte del territorio español.

Además, el pasado mes de marzo se solicitó la extensión PCT que permite extender la protección de la invención a nivel internacional en más de 150 países.

6.1.5. Otros méritos

A continuación, se muestran otros trabajos y proyectos en los que también he colaborado, pero que no se enmarcan dentro de mi Tesis Doctoral.

[SNTS⁺16] J. A. Sanguesa, F. Naranjo, V. Torres-Sanz, M. Fogue, P. Garrido, and F. J. Martínez. “On the Study of Vehicle Density in Intelligent Transportation Systems”, *Mobile Information Systems*. Vol. 2016, 13 pages. 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8320756>

En el JCR del año 2016, la revista *Mobile Information Systems* tiene un Factor de Impacto de **0.849**, lo que la coloca en la posición **121/146, (Q4)**, de la categoría *COMPUTER SCIENCE, INFORMATION SYSTEMS*.

[STN⁺15b] J. A. Sanguesa, V. Torres, F. Naranjo, M. Fogue, P. Garrido, J. Gallardo, F. J. Martínez. “Vehicle Density and Roadmap Topology Issues when

Characterizing Vehicular Communications” 14th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA’15), Cambridge, MA USA, September 2015

El congreso NCA aparece como CORE B según la lista publicada por la Computing Research and Education Association of Australasia (CORE).

[STN⁺15a] J. A. Sanguesa, V. Torres, F. Naranjo, M. Fogue, P. Garrido, J. Gallardo, F. J. Martínez. “Considerations on the Number of Vehicles and the Roadmap Topology in Vehicular Communications” XXVI Jornadas de Paralelismo. Córdoba, septiembre de 2015

Las Jornadas Sarteco es un congreso científico-técnica nacional que se celebra anualmente desde 1990. El objetivo básico de este congreso es reunir investigadores españoles para intercambiar sus experiencias, presentar y discutir resultados de investigación, promover la coordinación entre grupos españoles y compartir sus ideas sobre tendencias relacionadas con paralelismo, arquitectura y redes de computadoras.

Por otra parte, también he participado en los siguientes proyectos:

- Proyecto Nacional: Smart@CarPhone: Integración del Smartphone y el vehículo para conectar conductores, sensores y entorno a través de una arquitectura de servicios funcionales, TEC2014-52690-R.
- Proyecto OTRI (2016/0224): Aplicación Integral para la Optimización del Transporte Sanitario No Urgente.
- Proyecto OTRI (2016/0305): OEE-RT: Sistema para la captación de datos de líneas de producción en Tiempo Real.

6.2. Trabajo Futuro

En el desarrollo de esta Tesis, existen diferentes aspectos a los que, en mi opinión, se les debe prestar una mayor atención y que deben de ser trabajados en el futuro. Los más relevantes son los siguientes:

- Mejora del simulador de recargas. Sería muy interesante incluir la posibilidad de recrear escenarios como garajes comunitarios, en los que la potencia máxima contratada debe repartirse entre todos los vehículos para su recarga. Otro aspecto a tener en cuenta en el simulador puede ser incorporar el

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, PUBLICACIONES Y TRABAJO FUTURO

impacto que tendría la recarga de EVs en la demanda nacional. En la actualidad, se ha solicitado financiación para realizar un proyecto de investigación para incorporar estos aspectos, haciendo especial hincapié en los factores económicos y sociales, y de esta forma, hacerlo más realista.

- El desarrollo de nuevos métodos de carga discontinua. Las recargas discontinuas pueden ser útiles para asegurar que el vehículo carga hasta un porcentaje de batería, recargando el resto cuando la electricidad sea más económica. Otro método que puede ser implementado es el que denominamos ecológico, que recargaría las baterías en el periodo en que se emitan menos elementos contaminantes. También puede ser interesante incluir métodos que utilicen técnicas basadas en Inteligencia Artificial.
- Otras potencias de recarga. Un aspecto a tener en cuenta es la potencia de recarga utilizada. De hecho, el comportamiento de los métodos propuestos puede variar si se modifica la potencia de recarga, por lo que puede ser interesante realizar simulaciones utilizando puntos de recarga con diferentes niveles de potencia.
- Evolución del sistema de recarga de vehículos eléctricos. Gracias al acuerdo llegado con una empresa para la explotación de la patente, se podrán crear nuevas versiones del enchufe. También se podrían obtener datos reales de recargas y costumbres de los usuarios. Esto da la posibilidad de aplicar técnicas como el Machine Learning o el Data Mining para mejorar el proceso de recarga, adaptándolo al máximo a las características específicas del vehículo y a las necesidades del usuario.

Bibliografía

- [ACRC12] Fábio. Andrade, Juan José Cardenas, L. Romeral, and J. Cusido. Modeling and studying of power flow in a parking lot with plug-in vehicles and the impact in the public utility. In *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pages 1–7, Jan 2012.
- [ADE06] Haitham Al-Deek and Emam B Emam. New methodology for estimating reliability in transportation networks with degraded link capacities. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 10(3):117–129, 2006.
- [AFGM⁺15] Ala Al-Fuqaha, Mohsen Guizani, Mehdi Mohammadi, Mohammed Aledhari, and Moussa Ayyash. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):2347–2376, 2015.
- [AGS11] Salvador Acha, Tim C Green, and Nilay Shah. Optimal charging strategies of electric vehicles in the uk power market. In *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pages 1–8, 2011.
- [AHB⁺15] Philipp Adelhelm, Pascal Hartmann, Conrad L Bender, Martin Busche, Christine Eufinger, and Juergen Janek. From lithium to sodium: cell chemistry of room temperature sodium–air and sodium–sulfur batteries. *Beilstein journal of nanotechnology*, 6:1016–1055, 2015.
- [AM14] Jonathan D Adler and Pitu B Mirchandani. Online routing and battery reservations for electric vehicles with swappable batteries. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70:285–302, 2014.
- [AMH⁺15] Maytham S. Ahmed, Azah. Mohamed, Raad Z. Homod, Hussain Shareef, Ahmad H. Sabry, and Khairuddin Bin Khalid. Smart plug prototype for monitoring electrical appliances in home energy management system. In *IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, pages 32–36, Dec 2015.
- [ANF17] ANFAC. Anual Report 2016. Technical report, Asociación española de fabricantes de automóviles y camiones, 2017. <http://www.anfac.com/documents/tmp/MemoriaANFAC2016.pdf> (último acceso el 1 de marzo de 2018).

BIBLIOGRAFÍA

- [AVM18] AVM. Avm official website, 2018. <https://en.avm.de/products/fritzbox/> (último acceso el 18 de enero de 2018).
- [AZC⁺16] Oscar Alvear, Willian Zamora, Carlos Tabares Calafate, Juan Carlos Cano, and Pietro Manzoni. Ecosensor: Monitoring environmental pollution using mobile sensors. In *IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pages 1–6, June 2016.
- [BAG⁺12] Michael Batty, Kay W. Axhausen, Fosca Giannotti, Alexei Pozdnoukhov, Armando Bazzani, Monica Wachowicz, Georgios Ouzounis, and Yuval Portugali. Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, 214(1):481–518, 2012.
- [Bar04] Ivan Barofsky. Quality of life research: A critical introduction. *Quality of Life Research*, 13(5):1021–1024, 2004.
- [Bel18] Belkin. Edimax official website, 2018. <http://www.belkin.com> (último acceso el 18 de enero de 2018).
- [BFFB16] Francisco Brito, Inácio Fonseca, José Torres Farinha, and Fernando Maciel Barbosa. Integrating low cost platforms on electrical power systems for control and condition monitoring. In *51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pages 1–5, Sept 2016.
- [BGF⁺12a] J. Barrachina, P. Garrido, M. Fogue, F. J. Martinez, J.-C. Cano, C. T. Calafate, and P. Manzoni. D-RSU: A Density-Based Approach for Road Side Unit Deployment in Urban Scenarios. In *International Workshop on IPv6-based Vehicular Networks (Vehi6), collocated with the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 1–6, Jun. 2012.
- [BGF⁺12b] Javier Barrachina, Piedad Garrido, Manuel Fogue, Francisco J. Martinez, Juan-Carlos Cano, Carlos Tabares. Calafate, and Pietro Manzoni. D-RSU: A Density-Based Approach for Road Side Unit Deployment in Urban Scenarios. In *International Workshop on IPv6-based Vehicular Networks (Vehi6), collocated with the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 1–6, Jun. 2012.
- [BGF⁺14] Javier Barrachina, Piedad Garrido, Manuel Fogue, Francisco J. Martinez, Juan-Carlos Cano, Carlos Tabares. Calafate, and Pietro Manzoni. Reducing emergency services arrival time by using vehicular communications and evolution strategies. *Expert Systems with Applications*, 41(4):1206–1217, 2014.
- [BM10] Jorge Blázquez and José María Martín Moreno. Eficiencia energética en automoción: el vehículo eléctrico, un reto del presente. *Economía industrial*, (377):76–85, 2010.

-
- [BMZB15] Hao Bai, Shihong Miao, Pipei Zhang, and Zhan Bai. Reliability evaluation of a distribution network with microgrid based on a combined power generation system. *Energies*, 8(2):1216–1241, 2015.
- [BNN16] Kristin Ystmark Bjerkan, Tom E Nørbech, and Marianne Elvsaaas Nordtømme. Incentives for promoting battery electric vehicle (BEV) adoption in Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 43:169–180, 2016.
- [CC01] CC Chan and KT Chau. *Modern electric vehicle technology*, volume 47. Oxford University Press on Demand, 2001.
- [CC15] Silvia Cestau Cubero. *Sostenibilidad técnica, económica y ambiental de flotas comerciales de vehículos eléctricos*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [CCNY13] Lidan Chen, CY Chung, Yongquan Nie, and Rongrong Yu. Modeling and optimization of electric vehicle charging load in a parking lot. In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), (IEEE PES Asia-Pacific)*, pages 1–5. IEEE, 2013.
- [Ceb13] Oscar Andrés Vargas Ceballos. *Estudio de materiales basados en grafeno para su uso como ánodos en baterías de li-ión*. PhD thesis, Universidad de Córdoba, 2013.
- [CHA] CHAdeMO Association. CHAdeMO’s fast charging station in the world. <http://www.chademo.com/>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [CHA16] CHAdeMO Association. Chademo announces high power (150kw) version of the protocol. Technical report, CHAdeMO Association, 2016.
- [Che] Cheat Sheet. 10 best-selling electric vehicles of all time. <https://www.cheatsheet.com/automobiles/best-selling-electric-vehicles-of-all-time.html/?a=viewall>. (último acceso el 25 de abril de 2017).
- [Chi] China Quality Certification. <http://www.cqc.com.cn/dynamic/contentcore/resource/download?ID=32242>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Cle13] Cleantechica. Sodium-air batteries may best lithium-air batteries. <https://cleantechica.com/2013/03/20/sodium-air-batteries-may-best-lithium-air-batteries/>, 2013. (último acceso el 14-05-2018).
- [Cle17] Clean Technica. Tesla batteries 101 — production capacity, uses, chemistry, & future plans, 2017. <https://cleantechica.com/2017/12/02/tesla-batteries-101-production-capacity-uses-chemistry-future-plans/> (último acceso el 18 de enero de 2018).

BIBLIOGRAFÍA

- [Cle18] Clean Energy Ministerial. Accelerating the global clean energy transition, 2018. <http://www.cleanenergyministerial.org/> (último acceso el 2 de marzo de 2018).
- [CNN] CNN. These countries want to ban gas and diesel cars. <http://money.cnn.com/2017/09/11/autos/countries-banning-diesel-gas-cars/index.html>. (último acceso el 25 de abril de 2017).
- [CNN11] CNN. Tesla unveils 90-second battery-pack swap. <http://money.cnn.com/2013/06/21/autos/tesla-battery-swap/>, 2011. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [CNW⁺12] Hafedh Chourabi, Taewoo Nam, Shawn Walker, Jose Ramon Gil-Garcia, Sehl Mellouli, Karine Nahon, Theresa A Pardo, and Hans Jochen Scholl. Understanding smart cities: An integrative framework. In *45th Hawaii International Conference on System Science (HICSS)*, pages 2289–2297, 2012.
- [CSC13] Michael Coldwell, Danielle Strickland, and Laurence Chittock. Impact of electric vehicles on GB electricity demand and associated benefits for system control. In *48th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pages 1–6, Sept 2013.
- [D-L18] D-Link. D-link official website, 2018. <http://www.dlink.com> (último acceso el 18 de enero de 2018).
- [dE09] Gobierno de España. Estrategia española de movilidad sostenible. Technical report, Ministerio de Fomento and Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Gobierno de España, 2009.
- [DPPMA03] Aurelien Du Pasquier, Irene Plitz, Serafin Menocal, and Glenn Amatucci. A comparative study of li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 115(1):171–178, 2003.
- [dTdA11] Sociedad de Técnicos de Automoción. *El Vehículo Eléctrico. Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio*. Libbooks, 2011.
- [Edi18] Edimax. Edimax official website, 2018. <http://www.edimax.com> (último acceso el 18 de enero de 2018).
- [Efe18] Efergy. Efergy official website, 2018. <http://efergy.com/home/> (último acceso el 18 de enero de 2018).
- [Elea] Electric car use by country. https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country. (último acceso el 25 de marzo de 2018).

-
- [Eleb] Electric car use by country. The Electric Vehicles world Sales Database. <http://www.ev-volumes.com/>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Elec] Elering. Electricity-market-price. <http://elering.ee/electricity-market-price/>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Ele10] Electroenchufe. mennekes.de - electro enchufe SAC. Technical report, Electroenchufe, 2010. <http://studylib.es/doc/7040878/mennekes.de---electro-enchufe-sac>.
- [Ele18] Electrek. Rome latest city to announce car ban, will ban diesel cars from historical center starting 2024. <https://electrek.co/2018/02/28/rome-bans-diesel-cars-2024/>, 2018. (último acceso el 25 de abril de 2018).
- [Ene] Energy storage inter-platform group. State of the art of energy storage regulations and technology. http://www.futured.es/wp-content/uploads/2016/06/GIA-Maqueta_eng.pdf. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Ene09] Alternative Energy. New battery technology charges in seconds. <http://www.alternative-energy-news.info/new-battery-technology-charges-in-seconds/>, 2009. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Ene11] EU Energy. Transport in figures'—statistical pocketbook 2011. *European Commission, DG TREN in co-operation with Eurostat*, 2011.
- [Ene17] Energy Innovation. The Future of Electric Vehicles in the U.S. Technical report, 2017. http://energyinnovation.org/wp-content/uploads/2017/09/2017-09-13-Future-of-EVs-Research-Note_FINAL.pdf (último acceso el 25 de octubre de 2017).
- [Eur] European Alternative Fuels Observatory. <http://www.eafo.eu/>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Eur07] European Commission. EU action against climate change-Research and development to fight climate change. Technical report, 2007. <http://www.pedz.uni-mannheim.de/daten/edz-bn/gdu/07/research.pdf> (último acceso el 1 de marzo de 2018).
- [Exe] Exelon Company. My hourly Pricing Account. <https://hourlypricing.comed.com/live-prices/>.
- [Ext] Extremetech. Aluminium-air battery can power electric vehicles for 1,000 miles, will come to production cars in 2017. <https://www.extremetech.com/extreme/151801-aluminium->

BIBLIOGRAFÍA

- air-battery-can-power-electric-vehicles-for-1000-miles-will-come-to-production-cars-in-2017. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Fac14] Facua. Estudio comparativo sobre suministro eléctrico en diez países de Europa. Technical report, Facua, 2014. https://www.facua.org/es/documentos/estudio_electricidad_europa_es.pdf.
- [FCDC11] Fernando Herrero Frutos, José Villar Collado, Cristian Andrés Díaz, and Francisco Alberto Campos. Análisis de la influencia del vehículo eléctrico en la demanda eléctrica. *Universidad Pontificia Comillas*, 2011.
- [FDC09] Ryan Fries, Anne Dunning, and Mashrur Chowdhury. Traveler's value of real-time transit information. In *88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, pages 1–19, 2009.
- [FGM⁺12] Manuel Fogue, Piedad Garrido, Francisco J. Martínez, Juan-Carlos Cano, Carlos T. Calafate, and Pietro Manzoni. Automatic accident detection: Assistance through communication technologies and vehicles. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 7(3):90–100, 2012.
- [FMDdA14] R. Faria, P. Moura, J. Delgado, and AT. de Almeida. Managing the charging of electrical vehicles: Impacts on the electrical grid and on the environment. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(3):54–65, 2014.
- [For] Forocoches Electricos. Los incentivos al coche eléctrico están creciendo en toda europa. <http://forococheselectricos.com/2017/09/incentivos-al-coche-electrico-europa.html>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Fra15] Framework Convention on Climate Change. Adoption of the Paris agreement. Technical Report FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1, United Nations, 12 2015. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf> (último acceso el 1 de marzo de 2018).
- [FSN⁺16] Manuel Fogue, Julio A Sanguesa, Fernando Naranjo, Jesus Gallardo, Piedad Garrido, and Francisco J Martínez. Non-emergency patient transport services planning through genetic algorithms. *Expert Systems with Applications*, 61:262–271, 2016.
- [Fue] Fueleconomy. The official U.S. government source for fuel economy information. <https://www.fueleconomy.gov/>. (último acceso el 18 de marzo de 2018).
- [GÁGV18] Jorge García-Álvarez, Miguel A González, and Camino R Vela. Metaheuristics for solving a real-world electric vehicle charging scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 65:292–306, 2018.

-
- [Gar16] Félix García. La española graphenano presenta una batería que dura 800 kilómetros. <http://www.elmundo.es/motor/2016/02/11/56bc7d6aca4741e31e8b461f.html>, 2016. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [GFK⁺07] Rudolf Giffinger, Christian Fertner, Hans Kramar, Robert Kalasek, Natasa Pichler-Milanovic, and Evert Meijers. Smart cities. ranking of european medium-sized cities, final report, centre of regional science, vienna ut, 2007.
- [Gre] Green Car Reports. Lithium-ion battery packs now 209perkwh, will fall to 100 by 2025: Bloomberg analysis. https://www.greencarreports.com/news/1114245_lithium-ion-battery-packs-now-209-per-kwh-will-fall-to-100-by-2025-bloomberg-analysis. (último acceso el 25 de abril de 2017).
- [GSEE14] Danny Gelman, Boris Shvartsev, and Yair Ein-Eli Ein-Eli. Aluminum–air battery based on an ionic liquid electrolyte. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(47):20237–20242, 2014.
- [GTL11] Lingwen Gan, Ufuk Topcu, and Steven Low. Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging. In *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, pages 5798–5804, 2011.
- [Gua] The Guardian. Four of world’s biggest cities to ban diesel cars from their centres. <https://www.theguardian.com/environment/2016/dec/02/four-of-worlds-biggest-cities-to-ban-diesel-cars-from-their-centres>. (último acceso el 25 de abril de 2018).
- [Gua18] The Guardian. German court rules cities can ban diesel cars to tackle pollution. <https://www.theguardian.com/environment/2018/feb/27/german-court-rules-cities-can-ban-diesel-cars-to-tackle-pollution>, 2018. (último acceso el 25 de abril de 2018).
- [GVB⁺12] Molka Gharbaoui, Luca Valcarengi, Raffaele Brunoi, Barbara Martini, Marco Conti, and Piero Castoldi. An advanced smart management system for electric vehicle recharge. In *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*, pages 1–8. IEEE, 2012.
- [Her15] Heraldo de Aragón. Luz verde al nuevo ramal que dará acceso a Puerto Venecia, 2015.
- [HGS12] Troy R Hawkins, Ola Moa Gausen, and Anders Hammer Strømman. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8):997–1014, 2012.

BIBLIOGRAFÍA

- [HK15] Petter Haugneland and Hans Håvard Kvisle. Norwegian electric car user experiences. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 15(2):194–221, 2015.
- [HKR15] Salman Habib, Muhammad Kamran, and Umar Rashid. Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks—a review. *Journal of Power Sources*, 277:205–214, 2015.
- [HL08] Hannes Hartenstein and LP Laberteaux. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications magazine*, 46(6), 2008.
- [HMB⁺11] Erik Hansson, Kristoffer Mattisson, Jonas Björk, Per-Olof Östergren, and Kristina Jakobsson. Relationship between commuting and health outcomes in a cross-sectional population survey in southern Sweden. *BMC Public Health*, 11(834):1–14, 2011.
- [HMSL16] Junjie Hu, Hugo Morais, Tiago Sousa, and Morten Lind. Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:1207–1226, 2016.
- [Hon] Hong Kong Bussiness. <http://hongkongbusiness.hk/>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [HR07] Ville Helminen and Mika Ristimäki. Relationships between commuting distance, frequency and telework in Finland. *Journal of Transport Geography*, 15(5):331–342, 2007.
- [HR16] Hamid Hussain Hadwan and YP Reddy. Smart home control by using raspberry pi and arduino uno. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(4):2278–1021, 2016.
- [HS86] Friedrich Haschka and Dieter Schlieck. High power nickel-cadmium cells with fiber electrodes (FNC). In *Proceedings of the 32nd international power sources symposium*, 1986.
- [HSCBJ13] Weihao Hu, Chi Su, Zhe Chen, and Birgitte Bak-Jensen. Optimal operation of plug-in electric vehicles in power systems with high wind power penetrations. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(3):577–585, 2013.
- [IE17] Inside-EVs. Ev battery makers 2016: Panasonic and byd combine to hold majority of market. <https://insideevs.com/ev-battery-makers-2016-panasonic-and-byd-combine-to-hold-majority-of-market/>, 2017. (último acceso el 25 de marzo de 2018).

- [IEC] IEC. 62196-1 plugs, socket-outlets, vehicle couplers and vehicle inlets conductive charging of electric vehicles part 1: Charging of electric vehicles up to 250 a ac and 400 a dc, 2003.
- [IEC03] International Standard IEC 62196. Technical report, International Electrotechnical Commission, 2003. http://www.inmetro.gov.br/barreirastecnicas/pontofocal/..%5Cpontofocal\\%5Ctextos%5Cregulamentos%5CSAU_357.pdf (último acceso el 1 de marzo de 2018).
- [IES] IESO. Power Data. <http://www.ieso.ca/Pages/Power-Data/default.aspx#price/>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [IKU⁺15] Rupali Ikhankar, Varun Kuthe, Sarang Ulabhaje, Shruti Balpande, and Mahendra Dhadwe. Pibot: The raspberry pi controlled multi-environment robot for surveillance & live streaming. In *Industrial Instrumentation and Control (ICIC), 2015 International Conference on*, pages 1402–1405. IEEE, 2015.
- [Ins] Institute of Transport Economics, Norwegian Centre for Transport Research. <https://www.toi.no/>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Int] International Energy Agency. Projected electric and plug-in hybrid vehicle sales through 2020. <http://image.slidesharecdn.com/mrfrancoisnguyen-12990572907474-phpapp01/95/mr-francois-nguyen-5-728.jpg?cb=1299035827>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Int15] International Energy Agency. Technical Guidelines on Charging Facilities for Electric Vehicles. Technical report, Government of Hong Kong, 2015. https://www.emsd.gov.hk/filemanager/en/content_444/Charging_Facilities_Electric_Vehicles.pdf (último acceso el 25 de abril de 2018).
- [Int17a] International Energy Agency. Global EV Outlook 2017. Two million and counting. Technical report, 2017. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf> (último acceso el 25 de octubre de 2017).
- [Int17b] International Energy Agency. Global EV Outlook 2017. Two million and counting. Technical report, International Energy Agency, 2017. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEV\\Outlook2017.pdf> (último acceso el 25 de abril de 2018).
- [Int17c] International Energy Agency. Tracking Clean Energy Progress 2017. Technical report, 2017. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/>

BIBLIOGRAFÍA

- TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf (último acceso el 25 de octubre de 2017).
- [Ire07] Sustainable Energy Ireland. Hybrid electric and battery electric vehicles. *AEA Energy & Environment*, 2007.
- [JVK⁺17] A. John, R. Varghese, S. S. Krishnan, S. Thomas, T. A. Swayambu, and P. Thasneem. Automation of 11 kv substation using raspberry pi. In *2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, pages 1–5, April 2017.
- [JYKS16] Wentao Jing, Yadan Yan, Inhi Kim, and Majid Sarvi. Electric vehicles: A review of network modelling and future research needs. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(1):1687814015627981, 2016.
- [KGN⁺14] Joyce Kosivi, Jamie Gomez, Ruben Nelson, Egwu Eric Kalu, and Mark H Weatherspoon. Non-paste based composite cathode electrode for lithium air battery. In *Meeting Abstracts*, number 2, pages 206–206. The Electrochemical Society, 2014.
- [KJ17] Sanjiv Kumar and Ashish Jasuja. Air quality monitoring system based on iot using raspberry pi. In *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, pages 1341–1346, May 2017.
- [KMBM17] Elizabeth Kadiyala, Shravya Meda, Revathi Basani, and S. Muthulakshmi. Global industrial process monitoring through iot using raspberry pi. In *2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2)*, pages 260–262, March 2017.
- [Kom02] Nicos Komninos. *Intelligent cities: innovation, knowledge systems, and digital spaces*. Taylor & Francis, 2002.
- [KP16] Praveen Kumar and Umesh Chandra Pati. Arduino and raspberry pi based smart communication and control of home appliance system. In *Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [KPHK14] Haegyeom Kim, Kyu-Young Park, Jihyun Hong, and Kisuk Kang. All-graphene-battery: bridging the gap between supercapacitors and lithium ion batteries. *Scientific reports*, 4:1–8, 2014.
- [KSG17] R Surya Kumar, P. Kingston Stanley, and A Sanjeevi Gandhi. Raspberry pi based vehicle collision avoidance system. In *2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT)*, pages 211–215, Feb 2017.

-
- [LCYC86] Johnsee Lee, KW Choi, NP Yao, and CC Christianson. Three-dimensional thermal modeling of electric vehicle batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 133(7):1286–1291, 1986.
- [LDN15] Hongyang Li, György Dán, and Klara Nahrstedt. Lynx: Authenticated anonymous real-time reporting of electric vehicle information. In *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pages 599–604. IEEE, 2015.
- [LHL⁺13] Languang Lu, Xuebing Han, Jianqiu Li, Jianfeng Hua, and Minggao Ouyang. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of power sources*, 226:272–288, 2013.
- [LKL⁺15] Liansheng Liu, Fanxin Kong, Xue Liu, Yu Peng, and Qinglong Wang. A review on electric vehicles interacting with renewable energy in smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51:648–661, 2015.
- [LL12] James Larminie and John Lowry. *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons, 2012.
- [Mag] Drive Mag. Paris to ban diesel cars from 2024, all internal combustion vehicles from 2030. <https://drivemag.com/news/paris-to-ban-diesel-cars-from-2024-all-internal-combustion-vehicles-from-2030>. (último acceso el 25 de abril de 2018).
- [Mah11] Honor Mahony. Denmark to be electric cars guinea pig. <https://euobserver.com/transport/32458>, 2011. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [McC12] John McCool. *Using the Weibull distribution: reliability, modeling and inference*, volume 950. John Wiley & Sons, 2012.
- [MCH10] Zhongjing Ma, Duncan Callaway, and Ian Hiskens. Decentralized charging control for large populations of plug-in electric vehicles. In *IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 206–212, 2010.
- [MCK16] Saraju P Mohanty, Uma Choppali, and Elias Kougiianos. Everything you wanted to know about smart cities: The internet of things is the backbone. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 5(3):60–70, 2016.
- [MDF17] Ahmed S. Musleh, Mahdi Debouza, and Mohamed Farook. Design and implementation of smart plug: An Internet of Things (IoT) approach. In *2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*, pages 1–4, Nov 2017.

BIBLIOGRAFÍA

- [MDMAS10] Amir S. Masoum, Sara Deilami, Paul S. Moses, and Ahmed Abu-Siada. Impacts of battery charging rates of plug-in electric vehicle on smart grid distribution systems. In *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [Men10] Mennekes. Industrial plugs and receptacles. Technical report, Mennekes, 2010. <http://www.mennekes.com/pdf/int1/MENNEKES%202010%20Short%20Form%20Export%20Catalog.pdf>.
- [MGMC12] Cristian Maxim, Adriana Gogonel, Dorin Maxim, and Liliana Cucu-Grosjean. Estimation of probabilistic minimum inter-arrival times using extreme value theory. In *Proceedings of the 6th Junior Researcher Workshop on Real-Time Computing (JRWRTC 2012)*, pages 1–4, 2012.
- [Mil10] Alan Millner. Modeling lithium ion battery degradation in electric vehicles. In *IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES)*, pages 349–356. IEEE, 2010.
- [Min] Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Consulta de cobertura. <http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/banda-ancha/cobertura/consulta/Paginas/consulta-cobertura-banda-ancha.aspx> (último acceso el 17 de mayo de 2016).
- [MIN10] MINETUR. Comprehensive strategy for Electric Vehicles. Technical report, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Spain, 2010. <http://www.minetad.gob.es/es-es/gabineteprensa/notasprensa/documents/estrategiaintegralthveh\C3\%AD\culoelectrico060410.pdf> (último acceso el 1 de marzo de 2018).
- [MM00] G. Maggetto and J. Van Mierlo. Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey. In *IEE Seminar Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles (Ref. No. 2000/050)*, pages 1–11, 2000.
- [Mov] Movilidad Eléctrica. La exención del iva en noruega para los coches eléctricos se amplía hasta 2020. <https://movilidadelectrica.com/la-exencion-del-iva-en-noruega-se-amplia-2020/>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [MRS13] Ho-Yin Mak, Ying Rong, and Zuo-Jun Max Shen. Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping. *Management Science*, 59(7):1557–1575, 2013.
- [MTC+10] Francisco J. Martinez, Chai-Keong Toh, Juan-Carlos Cano, Carlos T Calafate, and Pietro Manzoni. Emergency services in future intelligent transportation systems based on vehicular communication networks. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2(2):6–20, 2010.

-
- [MTC⁺11] Francisco J. Martinez, Chai-Keong Toh, Juan-Carlos Cano, Carlos T. Calafate, and Pietro Manzoni. A street broadcast reduction scheme (SBR) to mitigate the broadcast storm problem in VANETs. *Wireless Personal Communications*, 56(3):559–572, 2011.
- [MTC⁺12] Francisco J. Martinez, Chai-Keong Toh, Juan-Carlos Cano, Carlos T. Calafate, and Pietro Manzoni. Determining the representative factors affecting warning message dissemination in VANETs. *Wireless Personal Communications*, 67(2):295–314, November 2012.
- [MTL⁺14] Henri Makkonen, Ville Tikka, Jukka Lassila, Jarmo Partanen, and Pertti Silventoinen. Demonstration of smart charging interface in green campus. In *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)*, pages 1–10, 2014.
- [MV17] Rosario Miceli and Fabio Viola. Designing a sustainable university recharge area for electric vehicles: Technical and economic analysis. *Energies*, 10(10):1604, 2017.
- [MVD⁺14] Mirjana Maksimović, Vladimir Vujović, Nikola Davidović, Vladimir Milošević, and Branko Perišić. Raspberry pi as internet of things hardware: performances and constraints. *design issues*, 3:8, 2014.
- [MVH⁺10] Kevin Mets, Tom Verschueren, Wouter Haerick, Chris Develder, and Filip De Turck. Optimizing smart energy control strategies for plug-in hybrid electric vehicle charging. In *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksps)*, pages 293–299. IEEE, 2010.
- [NAS] NASA. A multiscale approach to magnesium intercalation batteries: Safer, lighter, and longer-lasting. https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/strg/nstrf_2017/Magnesium_Intercalation_Batteries. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [New17] Newsweek. Electric cars only: California bill would ban gas-powered cars by 2040. <http://www.newsweek.com/california-ban-gas-powered-cars-2040-740584>, 2017. (último acceso el 25 de abril de 2018).
- [NLT17] NLTimes. New dutch government's plans for the coming years. <https://nltimes.nl/2017/10/10/new-dutch-governments-plans-coming-years>, 2017. (último acceso el 25 de abril de 2018).
- [NMCH09] Kong Soon Ng, Chin-Sien Moo, Yi-Ping Chen, and Yao-Ching Hsieh. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied energy*, 86(9):1506–1511, 2009.

BIBLIOGRAFÍA

- [Obs12] Observatorio Tecnológico de la Energía. Mapa tecnológico movilidad eléctrica. Technical report, Ministerio de Industria, Energía y Turismo e Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Gobierno de España, January 2012.
- [oI18] Times of Israel. Israel aims to eliminate use of coal, gasoline and diesel by 2030. <https://www.timesofisrael.com/israel-aims-to-eliminate-use-of-coal-gasoline-and-diesel-by-2030/>, 2018. (último acceso el 25 de abril de 2018).
- [Pho15] Phoenix Contact. Solutions for e-mobility,”. Technical report, Phoenix Contact, 2015. <http://www.mouser.com/pdfdocs/PhoenixContactsolutionsbrochurefore-mobility.pdf>.
- [Phy13] Phys.org. Sodium-air battery offers rechargeable advantages compared to li-air batteries. <https://phys.org/news/2013-01-sodium-air-battery-rechargeable-advantages-li-air.html>, 2013. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [PLG08] Margarita Préndez and Scarlett Lara-González. Application of strategies for sanitation management in wastewater treatment plants in order to control/reduce greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management*, 88(4):658–664, 2008.
- [Pos12] The Jerusalem Post. Better place unveils battery-swap network. <http://www.jpost.com/Business/Business-News/Better-Place-unveils-battery-swap-network>, 2012. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [PÜC06] Annette Prüss-Üstün and Carlos Corvalán. Preventing disease through healthy environments. *Towards an estimate of the environmental burden of disease*. Geneva: World Health Organization, 2006.
- [QHX⁺15] Jiangfeng Qian, Wesley A Henderson, Wu Xu, Priyanka Bhattacharya, Mark Engelhard, Oleg Borodin, and Ji-Guang Zhang. High rate and stable cycling of lithium metal anode. *Nature communications*, 6:6362, 2015.
- [QZAY10] Kejun Qian, Chengke Zhou, M. Allan, and Yue Yuan. Load model for prediction of electric vehicle charging demand. In *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pages 1–6, Oct 2010.
- [QZAY11] Kejun Qian, Chengke Zhou, Malcolm Allan, and Yue Yuan. Modeling of load demand due to ev battery charging in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(2):802–810, 2011.
- [Red17] Red Eléctrica de España. Término de facturación de energía activa del pvpc, 2017. <https://www.esios.ree.es/es/pvpc> (último acceso el 1 de febrero de 2018).

-
- [Rev15] MIT Technology Review. A battery for electronics that lasts twice as long. <https://www.technologyreview.com/s/534626/a-battery-for-electronics-that-lasts-twice-as-long/>, 2015. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Rev16] MIT Technology Review. Better lithium batteries to get a test flight. <https://www.technologyreview.com/s/602197/better-lithium-batteries-to-get-a-test-flight/>, 2016. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [RGH13] Antonio Ridi, Christophe Gisler, and Jean Hennebert. Automatic identification of electrical appliances using smart plugs. In *8th international workshop on Systems, signal processing and their applications (WoSSPA)*, pages 301–305. IEEE, 2013.
- [Ric13] David B Richardson. Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, impacts, and renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19:247–254, 2013.
- [RLL13] Mariacristina Roscia, Michela Longo, and George Cristian Lazaroiu. Smart city by multi-agent systems. In *IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pages 371–376, 2013.
- [Rob04] Christian P Robert. *Monte carlo methods*. Wiley Online Library, 2004.
- [RVS⁺16] Imran Rahman, Pandian M Vasant, Balbir Singh Mahinder Singh, M Abdullah-Al-Wadud, and Nadia Adnan. Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58:1039–1047, 2016.
- [SAE09] SAE International. Vehicle Architecture For Data Communications Standards – Class B Data Communications Network Interface. Standard, SAE International, 2009.
- [SAR] SAR. electric vehicle inductive charging system - part 1 general requirements.
- [SB10] Olle Sundstrom and Carl Binding. Planning electric-drive vehicle charging under constrained grid conditions. In *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pages 1–6, Oct 2010.
- [SBDP⁺15] Danilo Sbordone, I Bertini, B Di Pietra, Maria Carmen Falvo, A Genovese, and Luigi Martirano. Ev fast charging stations and energy storage technologies: A real implementation in the smart micro grid paradigm. *Electric Power Systems Research*, 120:96–108, 2015.

BIBLIOGRAFÍA

- [Sca10] Scamme. Libera - scame parre s.p.a. Technical report, Scamme, 2010.
- [SCB14] Isha Sharma, Claudio Canizares, and Kankar Bhattacharya. Smart charging of pevs penetrating into residential distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(3):1196–1209, 2014.
- [Sco15] Noah Scovronick. Reducing Global Health Risk. Technical report, World Health Organization, 2015. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/189524/1/9789241565080_eng.pdf (último acceso el 1 de marzo de 2018).
- [SCT⁺16] Sebastian Dambone Sessa, Giorgio Crugnola, Marco Todeschini, Stefano Zin, and Roberto Benato. Sodium nickel chloride battery steady-state regime model for stationary electrical energy storage. *Journal of Energy Storage*, 6:105–115, 2016.
- [SDAT94] D. H. Swan, B. Dickinson, M. Arikara, and G. S. Tomazic. Demonstration of a zinc bromine battery in an electric vehicle. In *Proceedings of 9th Annual Battery Conference on Applications and Advances*, pages 104–109, Jan 1994.
- [See] Seeker. Supercharged! battery power for the future. <https://www.seeker.com/supercharged-battery-power-for-the-future-1766230400.html>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [SF12] Sabine Storandt and Stefan Funke. Cruising with a battery-powered vehicle and not getting stranded. In *AAAI*, volume 3, page 46, 2012.
- [SFG⁺12] Julio A. Sanguesa, Manuel Fogue, Piedad Garrido, Francisco J. Martinez, Juan-Carlos Cano, Carlos T. Calafate, and Pietro Manzoni. Real-time density estimation in urban environments by using vehicular communications. In *IFIP Wireless Days (WD), 2012*, pages 1–6, Nov 2012.
- [SH14] Alexander Schuller and Jan Hoeffler. Assessing the impact of ev mobility patterns on renewable energy oriented charging strategies. *Energy Procedia*, 46:32–39, 2014.
- [SK10] Laura Schewel and Daniel M Kammen. Smart transportation: Synergizing electrified vehicles and mobile information systems. *Environment*, 52(5):24–35, 2010.
- [SLMM13] Rajesh Subbiah, Kristian Lum, Achla Marathe, and Madhav Marathe. A high resolution energy demand model for commercial buildings. In *ETG-Fachbericht-Internationaler ETG-Kongress 2013–Energieversorgung auf dem Weg nach 2050*. VDE VERLAG GmbH, 2013.

-
- [SMP16] Wenjing Shuai, Patrick Maillé, and Alexander Pelov. Charging electric vehicles in the smart city: A survey of economy-driven approaches. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(8):2089–2106, 2016.
- [SNTS⁺16] Julio A Sanguesa, Fernando Naranjo, Vicente Torres-Sanz, Manuel Fogue, Piedad Garrido, and Francisco J Martinez. On the study of vehicle density in intelligent transportation systems. *Mobile Information Systems*, 2016, 2016.
- [SOK⁺10] Hans-Georg Schweiger, Ossama Obeidi, Oliver Komesker, André Raschke, Michael Schiemann, Christian Zehner, Markus Gehnen, Michael Keller, and Peter Birke. Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells. *Sensors*, 10(6):5604–5625, 2010.
- [ST85] James Sudworth and AR Tiley. *Sodium Sulphur Battery*. Springer Science & Business Media, 1985.
- [Sta] Statista. <https://www.statista.com/>. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [STc17] STcars. Time out from commuting, 2017. <http://www.stcars.sg/guides-articles/time-out-from-commuting-73660> (último acceso el 1 de marzo de 2018).
- [STN⁺15a] Julio A Sanguesa, Vicente Torres, Fernando Naranjo, Manuel Fogue, Piedad Garrido, Jesus Gallardo, and Francisco J Martinez. Considerations on the number of vehicles and the roadmap topology in vehicular communications. In *XXVI Jornadas de la Sociedad de Arquitectura y Tecnología de Computadores (SARTECO)*, 2015.
- [STN⁺15b] Julio A Sanguesa, Vicente Torres, Fernando Naranjo, Manuel Fogue, Piedad Garrido, Jesus Gallardo, and Francisco J Martinez. Vehicle density and roadmap topology issues when characterizing vehicular communications. In *IEEE 14th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*, pages 200–203. IEEE, 2015.
- [Sus12] Susilawati. *Modeling urban arterial road travel time variability*. PhD thesis, Transport Systems School of Natural and Built Environments. University of South Australia, 2012.
- [SV11] Ahmed Yousuf Saber and Ganesh Kumar Venayagamoorthy. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 58(4):1229–1238, 2011.
- [Tel11] Fundación Telefónica. *Smart Cities: un primer paso hacia la Internet de las Cosas*, volume 16. Fundación Telefónica, 2011.

BIBLIOGRAFÍA

- [Tes] Tesla. Tesla official website. https://www.tesla.com/en_GB/supercharger?redirect=no. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [Tes14] Tesla. Gigafactory, 2014. https://www.tesla.com/es_ES/blog/gigafactory (último acceso el 18 de enero de 2018).
- [Tes18] Tesla. Tesla official website, 2018. https://www.tesla.com/en_EU/supercharger (último acceso el 18 de enero de 2018).
- [The14] The Guardian. Environment climate change EU to cut carbon emissions by 40 % by 2030, January 2014.
- [Tim11] The New York Times. Better place opens battery-swap station in tokyo for 90-day taxi trial. http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/04/29/better-place-opens-battery-swap-station-in-tokyo-for-90-day-taxi-trial/?_r=0, 2011. (último acceso el 25 de marzo de 2018).
- [TMLP14] Ville Tikka, Henri Makkonen, Jukka Lassila, and Jarmo Partanen. Case study: Smart charging plug-in hybrid vehicle test environment with vehicle-to-grid ability. In *16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)*, pages 1–10. IEEE, 2014.
- [TMZ⁺13] Sergio Martinez Tornell, Javier E Meseguer, Jorge Zaldivar, Carlos T Calafate, Juan-Carlos Cano, Pietro Manzoni, Manuel Fogue, and Francisco J Martinez. Smartphones as the keystone for leveraging the diffusion of its applications. In *9th ITS European Congress*, pages 1–8, 2013.
- [Toh07] Chai-Keong Toh. Future application scenarios for MANET-based Intelligent Transportation Systems. In *Future generation communication and networking (FGCN)*, volume 2, pages 414–417, 2007.
- [TPL17] Shahab Tayeb, Matin Pirouz, and Shahram Latifi. A raspberry-pi prototype of smart transportation. In *2017 25th International Conference on Systems Engineering (ICSEng)*, pages 176–182. IEEE, 2017.
- [TRY16] Kang Miao Tan, Vigna K Ramachandaramurthy, and Jia Ying Yong. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53:720–732, 2016.
- [TSSG⁺17] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Piedad Garrido, Francisco. J. Martinez, Carlos Tabares Calafate, and Johann M. Marquez-Barja. On the prediction of electric vehicles energy demand by using vehicular networks. In *2017 Wireless Days*, pages 198–200, March 2017.

-
- [TSSG⁺18] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Piedad Garrido, Francisco J. Martínez, and Johann M. Marquez-Barja. A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Energies*, 2018. Under Review.
- [TSSGM16] Vicente Torres-Sanz, Julio A Sanguesa, Piedad Garrido, and Francisco J Martínez. Arquitectura para integrar los vehículos eléctricos en las smart cities del futuro. In *XXVII Jornadas de la Sociedad de Arquitectura y Tecnología de Computadores (SARTECO)*, pages 385–390, 2016.
- [TSSGM18a] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Piedad Garrido, and Francisco J. Martínez. Procedimiento y sistema de recarga de vehículos eléctricos, March 2018. Solicitud P201730453.
- [TSSGM18b] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Piedad Garrido, and Francisco J. Martínez. Smart money-saving plug for charging electric vehicles. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2018. Under Review.
- [TSSM⁺18a] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Francisco J. Martínez, Piedad Garrido, and Johann M. Marquez-Barja. Enhancing the charging process of electric vehicles at residential homes. *IEEE access.- New York, NY, 2013, currens*, pages 1–13, 2018.
- [TSSM⁺18b] Vicente Torres-Sanz, Julio A. Sanguesa, Francisco J. Martínez, Piedad Garrido, and Johann M. Marquez-Barja. Enhancing the charging process of electric vehicles at residential homes. *IEEE Access.- New York, NY, 2013, currens*, pages 1–13, 2018.
- [Var93] Pravin Varaiya. Smart cars on smart roads: problems of control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(2):195–207, 1993.
- [VDVL14] Remco A Verzijlbergh, Laurens J De Vries, and Zofia Lukszo. Renewable energy sources and responsive demand. do we need congestion management in the distribution grid? *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(5):2119–2128, 2014.
- [VGZF⁺17] Arturo Valdivia-Gonzalez, Daniel Zaldívar, Fernando Fausto, Octavio Camarena, Erik Cuevas, and Marco Perez-Cisneros. A states of matter search-based approach for solving the problem of intelligent power allocation in plug-in hybrid electric vehicles. *Energies*, 10(1):92, 2017.
- [Vic14] Vicepresidencia del Gobierno. Boletín Oficial del Estado. Technical report, Agencia Estatal, 2014. http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-3376.
- [Vic17a] Vicepresidencia del Gobierno. Boletín Oficial del Estado. Technical report, Agencia Estatal, 2017. <https://www.boe.es/boe/dias/2017/10/07/pdfs/BOE-A-2017-11505.pdf>.

BIBLIOGRAFÍA

- [Vic17b] Vicepresidencia del Gobierno. Boletín Oficial del Estado. Technical report, Agencia Estatal, 2017. <http://www.boe.es/boe/dias/2017/11/15/pdfs/BOE-A-2017-13158.pdf>.
- [VKC⁺13] Matteo Vasirani, Ramachandra Kota, Renato L. G. Cavalcante, Sascha Ossowski, and Nicholas R. Jennings. An agent-based approach to virtual power plants of wind power generators and electric vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3):1314–1322, Sept 2013.
- [VSC11] Johannes Von Stritzky and Casilda Cabrerizo. *Ideas para las ciudades inteligentes del futuro*. Fundación Ideas, 2011.
- [WLJ13] Young-Min Wi, Jong-Uk Lee, and Sung-Kwan Joo. Electric vehicle charging method for smart homes/buildings with a photovoltaic system. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 59(2):323–328, May 2013.
- [WYL09] Jong-Ryul Won, Yong-Beum Yoon, and Kyung-Jin Lee. Prediction of electricity demand due to PHEVs (Plug-In Hybrid Electric Vehicles) distribution in Korea by using diffusion model. In *Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific*, pages 1–4, Oct 2009.
- [WZZL12] Wen Qiang Wang, Xiaoming Zhang, Jiangwei Zhang, and Hock Beng Lim. Smart traffic cloud: An infrastructure for traffic applications. In *IEEE 18th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, pages 822–827, 2012.
- [YRTM15] Jia Ying Yong, Vigna K Ramachandaramurthy, Kang Miao Tan, and N Mithulananthan. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49:365–385, 2015.
- [YYKZ14] Shengjie Yang, Jiangang Yao, Tong Kang, and Xiangqian Zhu. Dynamic operation model of the battery swapping station for ev (electric vehicle) in electricity market. *Energy*, 65:544–549, 2014.
- [ZCHC14] T. Zhang, W. Chen, Z. Han, and Z. Cao. Charging scheduling of electric vehicles with local renewable energy under uncertain electric vehicle arrival and grid power price. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(6):2600–2612, July 2014.
- [ZKF17] Zhirong Zhao-Karger and Maximilian Fichtner. Magnesium–sulfur battery: its beginning and recent progress. *MRS Communications*, 7(4):770–784, 2017.
- [ZTW17] G. Zhang, T. Tan, and G. Wang. Real-time smart charging of electric vehicles for demand charge reduction at non-residential sites. *IEEE Transactions on Smart Grid*, pages 1–1, 2017.

- [ZZC⁺14] Shuang Zeng, Jinguo Zhang, Zhongjun Chi, Xianglong Li, and Yanxia Chen. The research of temporal and spatial uncertainty of electric vehicle charging load impact on power system. In *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pages 3265–3270. IEEE, 2014.