

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Estudio de carga inalámbrica en vehículos

Autor: Nerea Vera Carmona

Tutor: Nils Peter Johan Ingemar Wideberg

**Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y
del Transporte
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estudio de carga inalámbrica en vehículos

Autor:

Nerea Vera Carmona

Tutor:

Nils Peter Johan Ingemar Wideberg

Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Autor: Nerea Vera Carmona

Tutor: Nils Peter Johan Ingemar Wideberg

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

Agradecimientos

No puedo creer que hace cuatro años comenzase esta carrera, una etapa que ha supuesto un crecimiento personal enorme con muchos obstáculos, pero a pesar de ellos, he conseguido terminar sintiéndome orgullosa y realizada, alrededor de personas increíbles.

A mis padres, por hacer que esto fuese posible y por esforzarse tanto en ayudarme a cumplir mis sueños.

A mi hermano, mis abuelos y mis tíos, por creer siempre en mí.

Y, por último, a mis amigos, mi segunda familia. Ellos, los que siempre han estado cuando me caía, pero también cuando me levantaba. Gracias, esto no podría haberlo conseguido sin vosotros.

Nerea Vera Carmona

Sevilla, 2023

Resumen

Una nueva tecnología que está ganando popularidad a medida que más personas cambian a formas de transporte más respetuosas con el medio ambiente es la carga inalámbrica. Este sistema es más cómodo y sencillo de usar porque permite a los usuarios recargar sus vehículos eléctricos sin tener que enchufarlos a una toma de corriente. Además, esta tecnología ofrece una serie de ventajas para el medio ambiente y la economía, incluida una menor dependencia de los combustibles fósiles y una menor huella de carbono.

El presente trabajo de fin de grado consiste en un estudio de la carga inalámbrica para vehículos eléctricos junto con una investigación extensa sobre los diferentes tipos de baterías, convertidores de potencia y sistemas de carga existentes actualmente. Además, se plantean distintas alternativas para hacer los sistemas de carga inalámbrica más eficientes y óptimos, tratando los principales inconvenientes de este tipo de carga como el desalineamiento entre bobinas y la separación de las mismas. Asimismo, se presentan soluciones para reducir al mínimo las emisiones de los gases de efecto invernadero que conllevan los vehículos. Por último, se presentan las líneas futuras de investigación y desarrollo junto con las conclusiones del estudio.

Cabe destacar que para el presente estudio se han considerado turismos eléctricos de baterías, turismos híbridos y camiones eléctricos.

Abstract

A new technology that is gaining popularity as more people switch to more environmentally friendly forms of transportation is wireless charging. This system is more convenient and easier to use because it allows users to recharge their electric vehicles without having to plug them into a power outlet. In addition, this technology offers a number of benefits for the environment and the economy, including reduced reliance on fossil fuels and a smaller carbon footprint.

This final degree project consists of a study of wireless charging for electric vehicles together with an extensive research on the different types of batteries, power converters and charging systems that currently exist. In addition, different alternatives are proposed to make wireless charging systems more efficient and optimal, treating the main drawbacks of this type of charging such as misalignment between coils and their separation. In addition, solutions are presented to minimize greenhouse gas emissions from vehicles. Finally, future lines of research and development are presented together with the conclusions of the study.

It should be noted that for the present study battery electric cars, hybrid cars and electric trucks have been considered.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract.....	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas.....	xvi
Índice de Figuras	xviii
1 Introducción.....	1
1.1. <i>El medio ambiente y su problemática actual</i>	1
1.2. <i>Repercusiones de los medios de transporte al cambio climático</i>	2
1.3. <i>Empleo de la movilidad eléctrica como solución</i>	3
1.4. <i>Vehículos eléctricos para el estudio</i>	7
1.5. <i>Evolución de los vehículos eléctricos en el mercado</i>	8
2 Estado del arte	11
2.1. <i>Inicios de la carga inalámbrica</i>	11
2.2. <i>Modelos actuales de vehículos que utilizan carga inalámbrica</i>	12
3 Baterías.....	15
3.1 <i>Parámetros fundamentales</i>	15
3.2 <i>Baterías plomo-ácido</i>	16
3.3 <i>Baterías basadas en Níquel</i>	17
3.3.1 Níquel-Cadmio	17
3.3.2 Níquel-hidruro metálico.....	17
3.4 <i>Baterías basadas en litio</i>	18
3.4.1 Ión-litio	18
3.4.1.1 Óxido de cobalto-litio (LiCoO ₂ o LCO).....	20
3.4.1.2 Litio ferrofosfato (LiFePO ₄ o LFP)	20
3.4.1.3 Titanato de litio (LTO).....	21
3.4.2 Polímero de litio (LiPo).....	21
3.4.3 Otras baterías	22
3.4.3.1 Litio-sulfuro (Li-S o LSB).....	22
3.4.3.2 Batería de nanocables.....	23
3.5 <i>Baterías de metal-aire</i>	24
3.5.1 Zinc-aire.....	25
3.5.2 Aluminio-aire	25
3.5.3 Litio-aire	25
3.6 <i>Baterías de sal fundida</i>	26

3.6.1	Azufre-sodio	26
3.6.2	NaNiCl o ZEBRA	26
3.6.3	Lón-sodio.....	27
3.7	<i>Baterías de flujo redox (RFB)</i>	27
3.8	<i>Baterías de magnesio</i>	28
3.9	<i>Supercondensadores</i>	29
3.9.1	Características.....	29
3.9.2	Frenado regenerativo.....	30
3.10	<i>Comparaciones</i>	31
4	Electrónica de potencia.....	33
4.1	<i>Motores eléctricos</i>	33
4.1.1	Funcionamiento	33
4.1.2	Motor de inducción	34
4.1.3	Motor de imanes permanentes.....	35
4.1.4	Motor síncrono de reluctancia	36
4.1.5	Comparaciones y distintas configuraciones	37
4.2	<i>Convertidores de potencia</i>	39
4.2.1	Tipos de convertidores y su uso en vehículos eléctricos	39
4.2.2	Convertidor Buck-Boost	40
4.2.3	Inversor trifásico	41
4.2.4	Rectificador	42
5	Carga.....	44
5.1	<i>Carga conductiva</i>	45
5.1.1	CA.....	45
5.1.2	CC.....	48
5.2	<i>Carga por inducción</i>	50
5.2.1	Estática	50
5.2.2	Dinámica.....	51
5.3	<i>Intercambio de batería</i>	53
5.4	<i>Carga inteligente</i>	54
5.5	<i>Comparativa entre los distintos métodos de carga</i>	55
6	Carga inalámbrica	57
6.1	<i>Tipos de carga inalámbrica</i>	57
6.2	<i>Fundamentos y modelado del sistema de carga</i>	59
6.2.1	Modelado de las bobinas acopladas y sistemas de compensación.....	59
6.2.1.1	Efecto de la distancia entre bobinas	62
6.2.1.2	Desalineamiento entre bobinas	62
6.2.2	Convertidores en sistemas inalámbricos	63
6.2.3	Sistema óptimo para carga rápida en vehículos eléctricos	65
6.3	<i>Cargadores inalámbricos</i>	65
6.4	<i>Carga inalámbrica empleando energías renovables</i>	66
6.4.1	El autoconsumo y el impacto de los vehículos eléctricos en la red.....	67
6.4.2	Energía solar	69
6.4.3	Energía eólica	70
6.4.4	Estrategias para la optimización de los sistemas de carga inalámbrica empleando energías renovables.....	71
6.4.4.1	Sistema óptimo para la carga inalámbrica estática mediante placas fotovoltaicas	71
6.4.4.2	Sistema híbrido para la carga inalámbrica dinámica empleando energía solar y eólica.....	72
6.5	<i>Futuro de la carga inalámbrica</i>	73
7	Conclusiones.....	76
	Referencias	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Ventajas y desventajas de las baterías de plomo-ácido.	16
Tabla 3-2. Ventajas y desventajas de las baterías de níquel-cadmio.	17
Tabla 3-3. Ventajas y desventajas de las baterías de níquel-cadmio [27].	18
Tabla 3-4. Ventajas y desventajas de las baterías de ion-litio.	19
Tabla 3-5. Ventajas y desventajas de las baterías de óxido de cobalto-litio.	20
Tabla 3-6. Ventajas y desventajas de las baterías de litio ferfosfato.	20
Tabla 3-7. Ventajas y desventajas de las baterías de titanato de litio.	21
Tabla 3-8. Ventajas y desventajas de las baterías de polímero de litio.	22
Tabla 3-9. Ventajas y desventajas de las baterías litio-sulfuro.	22
Tabla 3-10. Ventajas y desventajas de las baterías de nanocables de oro.	24
Tabla 3-11. Ventajas y desventajas de las baterías metal-aire.	24
Tabla 3-12. Ventajas y desventajas de las baterías azufre-sodio.	26
Tabla 3-13. Ventajas y desventajas de las baterías ZEBRA.	26
Tabla 3-14. Ventajas y desventajas de las baterías ión-sodio.	27
Tabla 3-15. Ventajas y desventajas de las baterías de flujo redox con vanadio.	28
Tabla 3-16. Ventajas y desventajas de las baterías de magnesio.	28
Tabla 3-17. Ventajas y desventajas de los supercondensadores [50].	29
Tabla 3-18. Comparativa entre los distintos tipos de baterías del estudio.	31
Tabla 4-1. Ventajas y desventajas del motor de inducción.	35
Tabla 4-2. Ventajas y desventajas del motor de imanes permanentes.	36
Tabla 4-3. Ventajas y desventajas del motor síncrono de reluctancia.	36
Tabla 5-1. Ventajas y desventajas de la carga conductiva de CA.	47
Tabla 5-2. Ventajas y desventajas de la carga conductiva de CC.	50
Tabla 5-3. Ventajas y desventajas de la carga por inducción estática.	51
Tabla 5-4. Ventajas y desventajas de la carga por inducción dinámica.	53
Tabla 5-5. Ventajas y desventajas del intercambio de batería.	54
Tabla 6-1. Ventajas y desventajas del empleo de la energía solar en vehículos.	70
Tabla 6-2. Ventajas y desventajas del empleo de la energía eólica en vehículos.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Evolución de las emisiones de CO2 [1].	1
Figura 1-2. Energías de uso mundial [3]	2
Figura 1-3. Emisiones del transporte en la UE[5]	3
Figura 1-4. Tren de potencia típico de un turismo eléctrico con baterías [7].	5
Figura 1-5. Motor eléctrico de un Nissan Leaf [8].	5
Figura 1-6. Tren de potencia de un híbrido en paralelo [7].	6
Figura 1-7. Tren de potencia de un híbrido en serie [7].	6
Figura 1-8. Tren de potencia de un híbrido en serie-paralelo [7].	7
Figura 1-9. Tren de potencia de un camión eléctrico Mercedes-Benz [11].	8
Figura 1-10. Evolución de los vehículos eléctricos en el mercado mundial [13].	9
Figura 1-11. Estimación de las ventas de vehículos eléctricos para 2035 [14].	9
Figura 1-12. Estimación del mercado de los camiones eléctricos para 2022-2027 [17].	10
Figura 3-1. Comparación entre la densidad de energía gravimétrica y volumétrica de los principales tipos de baterías [32].	19
Figura 3-2. Comparación entre baterías ion-litio y litio-azufre [36].	23
Figura 3-3. Comparación de los distintos tipos de materiales para las baterías metal-aire [41].	25
Figura 3-4. Caso demanda baja de potencia [7].	30
Figura 3-5. Caso demanda alta de potencia [7].	30
Figura 3-6. Frenado regenerativo [7].	30
Figura 4-1. Principio de funcionamiento de un motor eléctrico [51].	34
Figura 4-2. Comparativa entre los distintos tipos de motores eléctricos [7].	37
Figura 4-3. Motor único [7].	37
Figura 4-4. Motor dual [7].	38
Figura 4-5. Motor en cada rueda [7].	38
Figura 4-6. Convertidor DC/DC bidireccional conectado con la batería y los supercondensadores [53].	41
Figura 4-7. Inversor trifásico 3B3W [53].	42
Figura 4-8. Rectificador trifásico de onda completa [54].	43
Figura 5-1. Clasificación de los tipos de carga actuales según el tipo de cargador.	44
Figura 5-2. Método de carga conductiva de CA [7].	45
Figura 5-3. Funcionamiento de un cargador de CA [7].	45
Figura 5-4. Conector tipo 1 [7].	46
Figura 5-5. Conector tipo 2 [7].	47

Figura 5-6. Conector de Tesla en EEUU [7].	47
Figura 5-7. Método de carga conductiva de CC [7].	48
Figura 5-8. Funcionamiento de un cargador de CC [7].	48
Figura 5-9. Conector CCS-combo 1 [7].	49
Figura 5-10. Conector CCS-combo 2 [7].	49
Figura 5-11. Conector Chademo [7].	49
Figura 5-12. Sistema de carga por inducción estática [7].	51
Figura 5-13. Sistema de carga por inducción dinámica [55].	52
Figura 5-14. Tecnología de intercambio de batería [7].	54
Figura 5-15. Comparativa de los distintos métodos de carga [7].	55
Figura 6-1. Tipos existentes de carga inalámbrica.	58
Figura 6-2. Modelo de bobinas acopladas [20].	59
Figura 6-3. “Circuito de transmisión de energía por inducción con acoplamiento de aire” [7].	60
Figura 6-4. Compensación en serie para un circuito de transmisión de energía por inducción con acoplamiento de aire. [7]	61
Figura 6-5. Ejemplo circuito IPT sin compensar. [59]	61
Figura 6-6. Esquema de transmisión de energía de un sistema de carga inalámbrica junto con los convertidores de potencia [60].	63
Figura 6-7. Ejemplo de un inversor ZVS full-bridge [61].	64
Figura 6-8. Circuito de transferencia de carga inalámbrica por inducción con compensación SPS [59].	65
Figura 6-9. Curva agregada de la demanda eléctrica diaria para tres tipos de recarga [69].	68
Figura 6-10. Incremento de los costes de inversión debido a la penetración de VE en la red de distribución ejemplo, incluyendo costes de la red de baja tensión, en el centro de transformación y refuerzos en la red de media tensión [69].	69
Figura 6-11. Sistema óptimo para la carga inalámbrica estática de un vehículo empleando placas fotovoltaicas.	71
Figura 6-12. Sistema óptimo para la carga inalámbrica dinámica de un vehículo empleando placas fotovoltaicas y aerogeneradores.	72
Figura 6-13. Mapa de puntos de carga de la REE prevista para 2030 [75].	74
Figura 6-14. Análisis de la evolución del coste de las baterías de los vehículos eléctricos [76].	75

1 INTRODUCCIÓN

“El clima está cambiando, nosotros también deberíamos”.

- Svante Arrhenius (1896) -

1.1. El medio ambiente y su problemática actual

No es ningún engaño el hecho de que cada año que pasa aumenta la mortalidad de seres vivos debido a las alteraciones en el clima. Podemos observar como a lo largo de los años han habido cambios sobre la Tierra en cuanto a la temperatura, precipitaciones y nivel del mar, entre otros aspectos, todos ellos provocados principalmente por los gases de efecto invernadero.

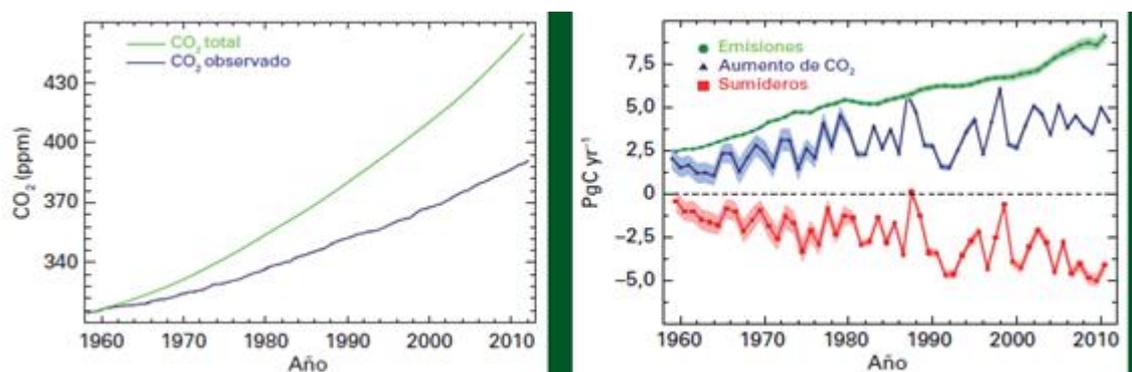


Figura 1-1. Evolución de las emisiones de CO₂ [1].

El gas que más se emite por excelencia a la atmósfera es el CO₂ que, atendiendo a la gráfica superior, podemos observar cómo ha aumentado exponencialmente a lo largo de los últimos años. Este hecho incide directamente sobre el calentamiento global. Es de esperar que para finales del siglo XXI la Tierra se caliente hasta 4°C más de lo habitual. [2]

Para paliar este problema, se han propuesto distintas alternativas como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, mediante el cual muchos países se han ido comprometiendo para disminuir las emisiones de este tipo de gases. No obstante, a pesar de que estos años se ha conseguido menguar la cifra, hay una gran controversia debido a los combustibles fósiles ya que son la principal causa por la cual no se alcanza el objetivo.

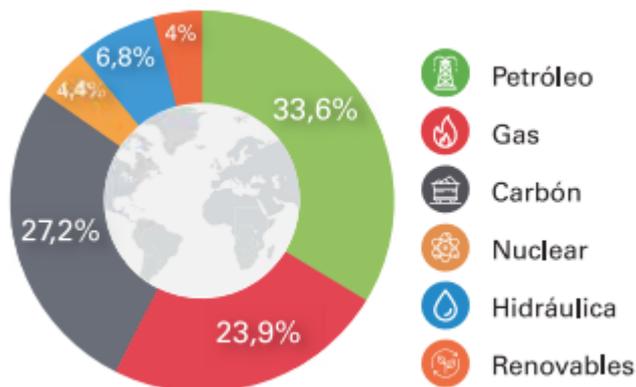


Figura 1-2. Energías de uso mundial [3]

Cabe destacar que este tipo de energía conlleva un uso del 84,7% mundial mientras que solo un 10,8% pertenece a energías renovables junto con la energía hidráulica.

Aquí entra en juego varios factores como la política y la economía ya que si se dejasen de emplear los combustibles fósiles, afectaría negativamente a los países que los extraen como Estados Unidos, Rusia, China y La India entre otros.

Sin embargo, al dilema del cambio climático se le suma el fin de las reservas de petróleo, carbón y gas natural que cada vez está más cerca, lo que supone el empleo de otras formas de energía renovables como lo son la energía solar, eólica o hidráulica, las cuales no contaminan.

1.2. Repercusiones de los medios de transporte al cambio climático

Ante la problemática actual sobre el cambio climático, uno de los sectores que más repercute es el transporte. La sociedad ha estado bajo la creencia de que las fuentes de energía eran inagotables, no queriendo dejar de emplear los vehículos de combustión interna, ciegos ante la catástrofe que ello acarrea. Atendiendo a la Agencia Internacional de Energía (AIE): “El 19% del consumo mundial de energía corresponde al transporte, que genera el 23% de emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, que de seguir con las tendencias actuales llegaría en torno al 50% en 2030 y al 80% en 2050”. [4]

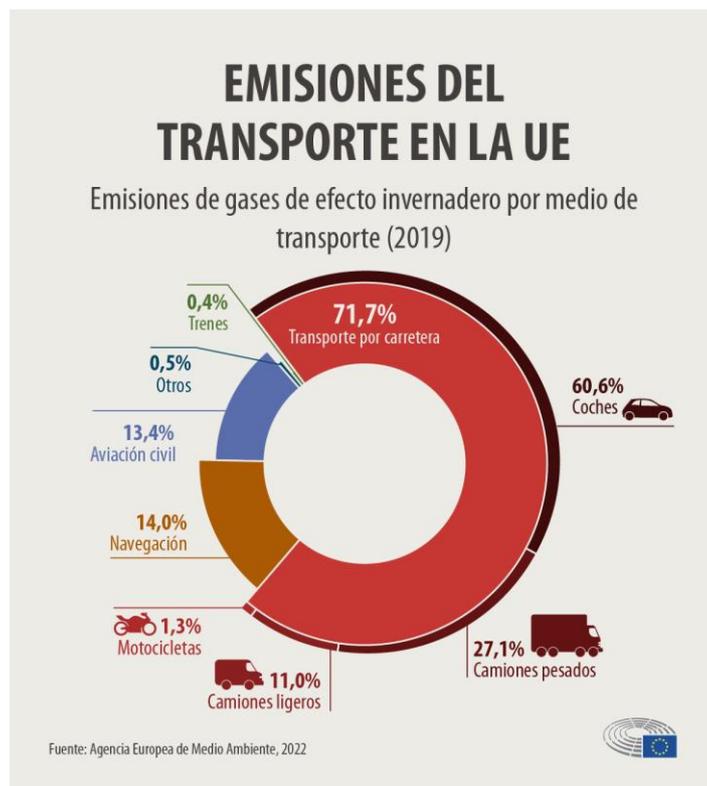


Figura 1-3. Emisiones del transporte en la UE[5]

En concreto, en la Unión Europea, los coches son los que más contaminan suponiendo un 60,6% de las emisiones de gases de efecto invernadero junto con los camiones al que les pertenece un 38,1%. Estos datos no son de extrañar ya que la expansión de los turismos y los vehículos pesados va en aumento. Asimismo, existe un aspecto que está íntimamente relacionado con estos porcentajes: los motores diesel y de gasolina.

A lo largo de los años se ha descubierto que los motores Diésel emitían gases nocivos en menor proporción que los motores de gasolina. Esto, unido al hecho de que los transportes de gasolina tienen un mayor coste económico, hizo que la venta de los coches Diésel se incrementase notablemente estos últimos años. Sin embargo, hace relativamente poco se ha demostrado que éste último produce partículas sólidas, las cuales son extremadamente dañinas para la salud.[6]

Estas son cifras que llaman la atención y de las cuales deberíamos tomar medidas sostenibles efectivas, de lo contrario, estas cuantías seguirán incrementándose hasta llegar a una desgracia irreversible.

1.3. Empleo de la movilidad eléctrica como solución

Si sustituimos los vehículos de combustión interna por los eléctricos, estaremos menguando considerablemente

los efectos dañinos al medio ambiente. Esto se refleja en la siguiente tabla:

Combustible\Emisiones		NOx	PM	NMVOC	CO
Motor combustión interna (MCI)	Biodiesel	↑	↓	↓	↓
	Bioetanol	→	↓	→	↓
	Biomasa a líquido (BTL)	No se tienen datos fiables			
	Etanol lignocelulósico	No se tienen datos fiables			
	Gas natural	↓	↓	↓	↓
	Gas licuado de petróleo	↓	↓	→	→
	Gas a líquido (GTL)	→	↓	↓	↓
	Hidrógeno en MCI	↓	↓	↓	↓
No basados en MCI	Pila de Hidrógeno	↓*	↓*	↓*	↓*
	Vehículo eléctrico	↓*	↓*	↓*	↓*

Como podemos observar, las alternativas más sostenibles son la pila de hidrógeno y los vehículos eléctricos ya que las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOCs), material particulado (PM) y monóxido de carbono (CO) son prácticamente nulas al extraer el hidrógeno y generar la electricidad mediante fuentes de energía renovables. No obstante, la pila de hidrógeno es una tecnología que, actualmente, no ha conseguido llegar a ser óptima ya que la extracción de este elemento químico es cara e ineficiente. Por otro lado, se ha demostrado que obtener electricidad es factible y está al alcance de cualquiera, como también que las baterías cada vez son más viables, livianas y de menor coste gracias a los avances científicos. Todo ello hace que la movilidad eléctrica sea la solución más ventajosa.

Cabe destacar que, para el caso de los vehículos pesados, la movilidad eléctrica es una alternativa excelente ya que pasan la mayoría del tiempo en circulación por carreteras. Asimismo, si se logra alcanzar una carga rápida, esta elección sería todavía más óptima.

Actualmente, los países ya están tomando medidas para reducir los porcentajes de gases nocivos queriendo implementar en la sociedad el uso de vehículos eléctricos cuya venta se prevé que incrementará exponencialmente a corto plazo. La Unión Europea tiene el objetivo de mermar un 55% los gases perjudiciales procedentes de los turismos y un 50% de las furgonetas en 2030, llegando a obtener emisiones nulas en 2035. [5]

1.4. Vehículos eléctricos para el estudio

A continuación, se van a mostrar los distintos trenes de potencia de los automóviles que se van a emplear para el estudio: turismos eléctricos e híbridos y camiones.

Tal y como se muestra en la Figura 1-5, un turismo eléctrico de baterías se suele componer de un sistema de carga, la batería y el BMS (sistema de gestión de baterías), los convertidores, uno o más motores eléctricos y la transmisión. Estos componentes se verán en profundidad a lo largo del documento.

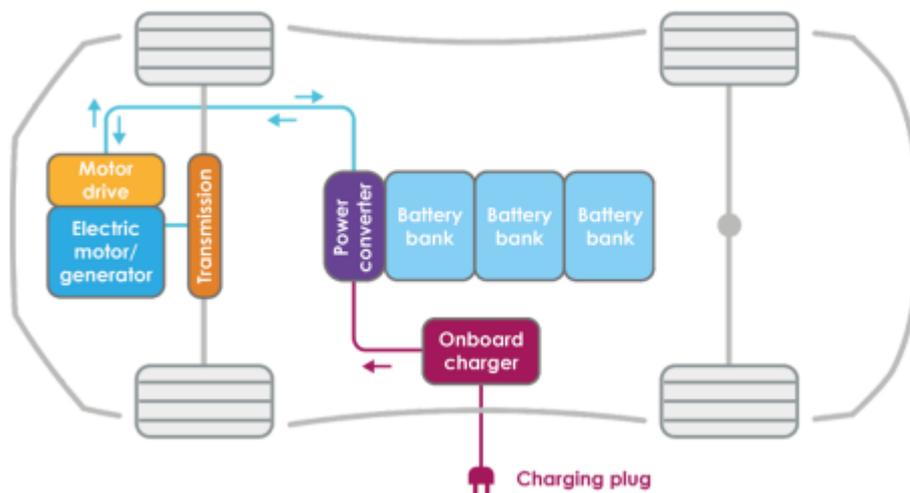


Figura 1-4. Tren de potencia típico de un turismo eléctrico con baterías [7].



Figura 1-5. Motor eléctrico de un Nissan Leaf [8].

Normalmente, en un vehículo que sólo usa un motor eléctrico, el cargador a bordo, los convertidores, la transmisión y la unidad de control del motor suelen ir dispuestos en un mismo bloque para lograr un sistema lo más compacto posible [8].

En cuanto a los vehículos híbridos, en las siguientes figuras podemos observar las configuraciones más comunes que existen de sus trenes de potencia: en serie, en paralelo o serie-paralelo.

Por lo general, este tipo de vehículos se componen de baterías, un motor de combustión, un motor eléctrico, un generador y los convertidores.

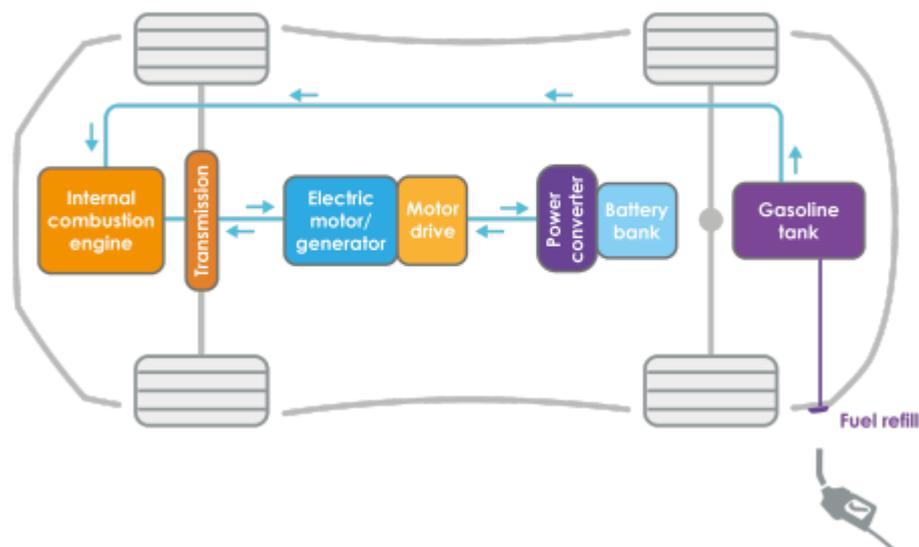


Figura 1-6. Tren de potencia de un híbrido en paralelo [7].

En una configuración en paralelo, tanto el motor eléctrico como el de combustión están dispuestos de manera que pueden trabajar por separado o en conjunto. Según [9]: “los dos motores están unidos al mismo eje” y “habitualmente, el motor de combustión interna, el motor eléctrico y la caja de cambios están conectados por medio de embragues controlados automáticamente”.

Entre las ventajas que presenta este tipo de disposición resalta el hecho de que no emplean generador, por lo que el peso del vehículo es menor y su eficiencia es mayor [10].

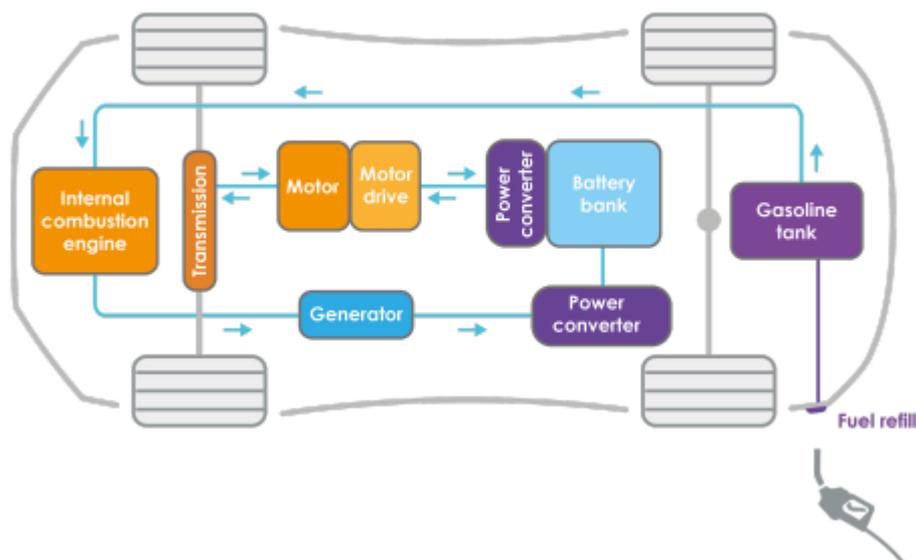


Figura 1-7. Tren de potencia de un híbrido en serie [7].

En la configuración en serie, el motor eléctrico impulsa el vehículo mientras que el motor de combustión sirve como fuente de alimentación de un generador. Este segundo mecanismo se emplea cuando la batería no es capaz de suministrar suficiente energía. Además, el flujo de corriente es unidireccional entre el motor de combustión,

generador y los convertidores de potencia, mientras que el flujo es bidireccional en el frenado regenerativo [10]. Esta disposición es común en locomotoras y barcos.

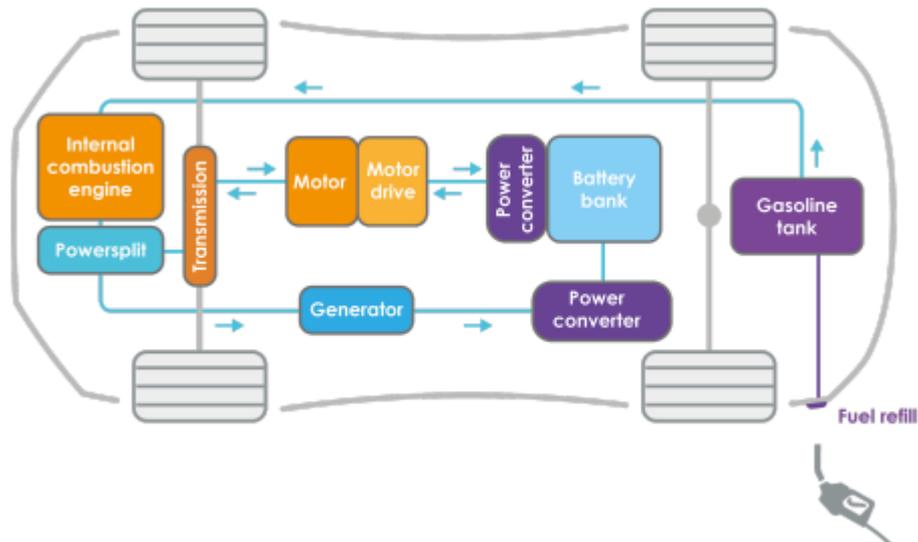


Figura 1-8. Tren de potencia de un híbrido en serie-paralelo [7].

Por último, los híbridos en serie-paralelo usan el motor eléctrico para arrancar y el de combustión interna para la conducción, el cual está conectado al generador. Además, ofrece la posibilidad de trabajar en conjunto cuando se demande una potencia mayor.

Asimismo, tiene la ventaja de emplear motores de menor tamaño y de mayor eficiencia.

En cuanto a los vehículos pesados, vamos a estudiar los camiones, los cuales tienen un tren de potencia compuesto principalmente por: motor, batería, transmisión y controlador.

La transmisión se encarga de transferir la potencia del motor eléctrico a las ruedas del camión, mientras que el controlador regula la cantidad de energía que fluye desde la batería hacia el motor eléctrico.

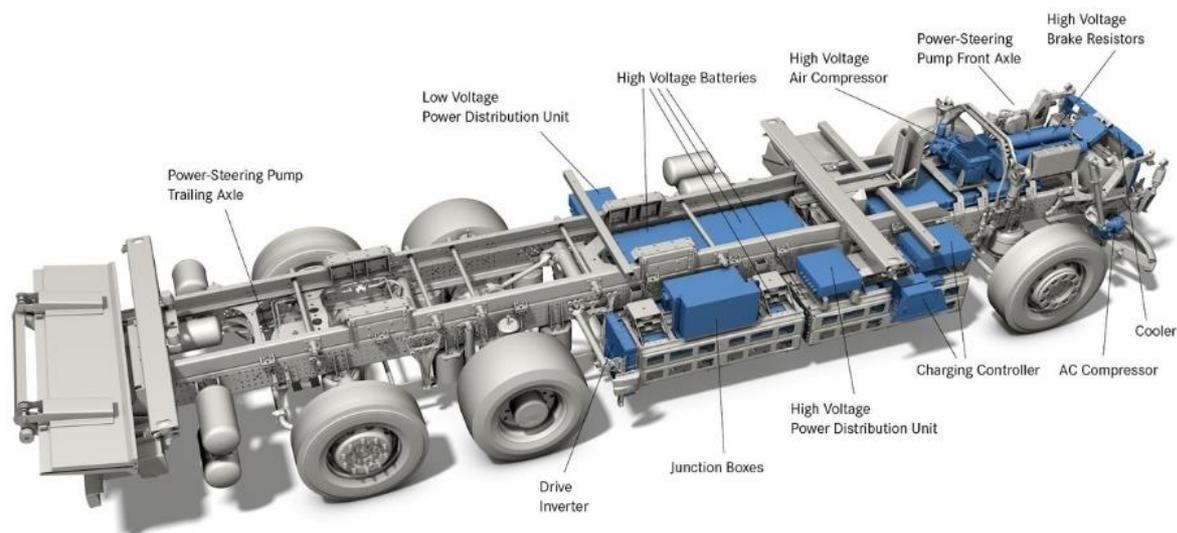


Figura 1-9. Tren de potencia de un camión eléctrico Mercedes-Benz [11].

Cabe destacar que, el tren de potencia de un camión eléctrico es similar al de un automóvil eléctrico, pero debe ser diseñado para soportar cargas más pesadas y distancias de manejo más largas. Además, los camiones eléctricos pueden requerir sistemas de refrigeración para mantener la temperatura de la batería dentro de un rango seguro durante el funcionamiento del vehículo.

1.5. Evolución de los vehículos eléctricos en el mercado

Históricamente, el primer vehículo eléctrico fue creado por Gustave Trouvé en 1881, el cual inventó el primer triciclo con motor y batería. No obstante, no fue hasta 1888 cuando Andreas Flocken creó el primer coche eléctrico en Alemania compuesto por una calesa, cuatro ruedas, un motor y una batería de 100 kg, llegando a alcanzar el invento hasta los 15 km/h [12].

Desde estos hitos históricos hasta hoy en día han transcurrido décadas hasta que se han logrado implantar definitivamente los vehículos eléctricos en el mundo. Según la Agencia Internacional de Energía, atendiendo a la Figura 1-10, en 2021 se alcanzó una cifra de 6,6 millones de vehículos eléctricos vendidos mundialmente, lo cual supone el triple que la cifra obtenida en 2019 y un dato muy atractivo comparado con los 16 millones de automóviles eléctricos que se estima que hay internacionalmente hoy en día. [13]

Asimismo, en 2020 se alcanzó una venta de 3 millones de vehículos, menos de la mitad de unidades que se logró en 2021. Por si fuera poco, en 2010 la cuota de mercado era aproximadamente de 0,01 % y en 2021 llegó a un 8,57 %.

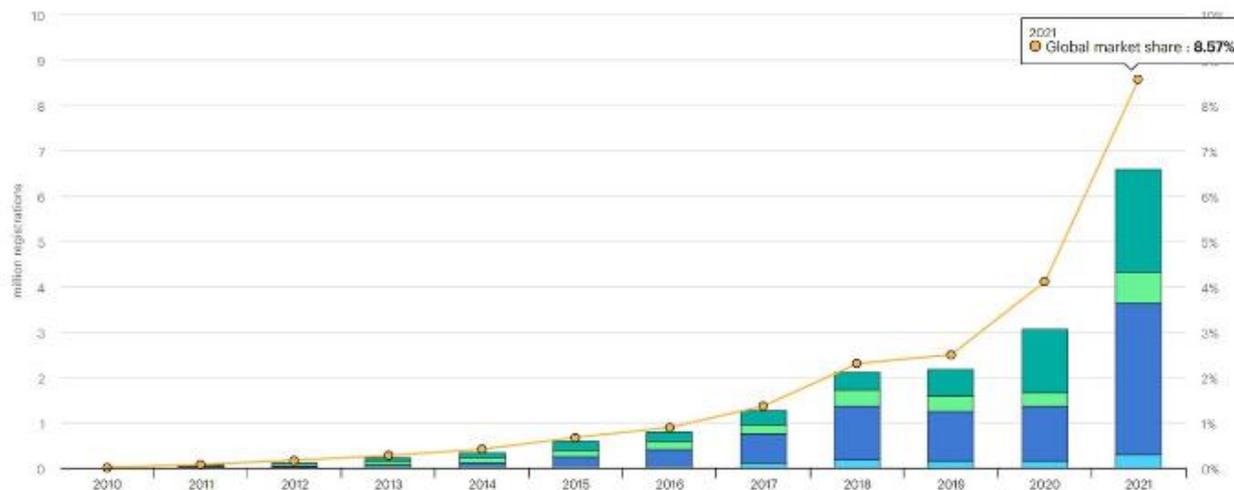


Figura 1-10. Evolución de los vehículos eléctricos en el mercado mundial [13].

Cabe destacar que China y Europa fueron los líderes de ventas de vehículos eléctricos en 2021, vendiendo China una cifra de 3,4 millones de unidades. Por otro lado, Europa vendió 2,3 millones, de los cuales se estima que la mitad fueron vehículos híbridos. El tercer país con más ventas en el mercado mundial fue Estados Unidos gracias a Tesla, que consiguió aproximadamente el doble de unidades vendidas de un año para otro. [13]

En cuanto a las ventas futuras, si observamos la Figura 1-11, según un estudio de Fuji Keizai realizado en 2018, se estima que para 2035 China seguirá liderando el ranking del mercado de los automóviles eléctricos, con una cifra de 6,42 millones de unidades de vehículos eléctricos con baterías (trayectoria verde) frente a los 11,25 millones que se venderán en total mundialmente. Además, se estima que Europa seguirá siendo la segunda potencia con una cifra de 2,17 millones de ventas y Estados Unidos la tercera con 1,36 millones. [14]

Por otro lado, se prevé que en 2035 se alcanzarán 12,43 millones de vehículos híbridos enchufables (trayectoria naranja) vendidos que, junto con los 11,25 millones de vehículos eléctricos con baterías, supone una venta global de 23,68 millones de unidades para la fecha. Por último, el estudio incluía una estimación de ventas para los vehículos híbridos (trayectoria azul), los cuales aumentarán en número, pero no supondrán un aumento tan exponencial como los otros vehículos objeto del estudio. [14]

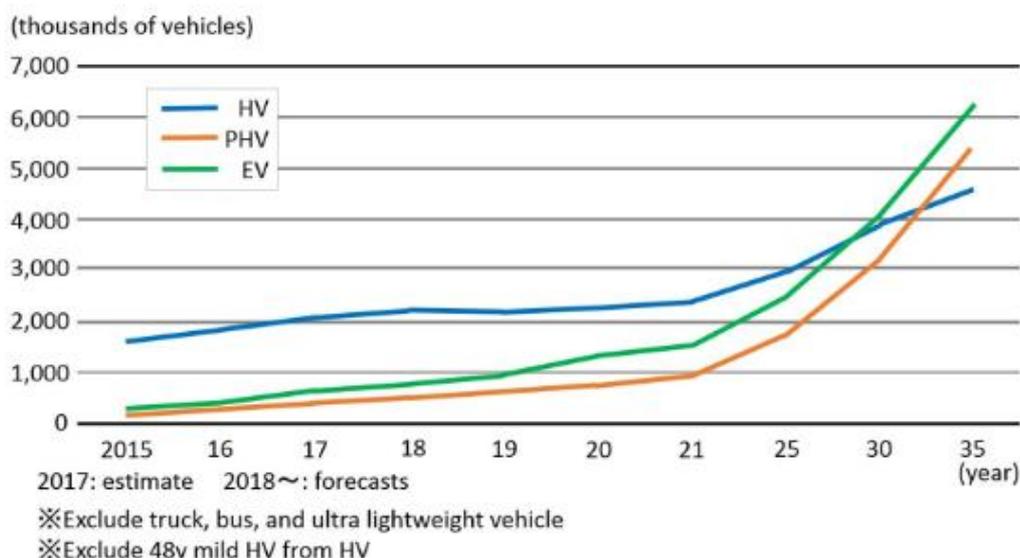


Figura 1-11. Estimación de las ventas de vehículos eléctricos para 2035 [14].

En cuanto a los camiones eléctricos, estos vehículos todavía están en proceso de inclusión en el mercado mundial. En 2020, el 96,4 % de los camiones vendidos en la Unión Europea fueron diésel y el resto eléctricos, de los cuales tan sólo un 0,1 % del total eran híbridos [15]. Estos datos hacen ver que, efectivamente, los camiones eléctricos no están actualmente extensamente incluidos en el mercado. No obstante, se prevé que para 2035 el 50 % de los mismos sean eléctricos, alcanzando un valor del 85 % en 2040 [16]. Además, observando la Figura 1-12, las regiones líderes serán Europa, América del Norte, Asia y Oceanía, quedando atrasados América del Sur y África.



Figura 1-12. Estimación del mercado de los camiones eléctricos para 2022-2027 [17].

Actualmente, existen varios modelos de camiones eléctricos como el DAF XD Electric, el Volvo Trucks Electric y el Renault Trucks E-Tech. El camión DAF XD Electric cuenta con dos modelos que logran una autonomía de aproximadamente 200 km y 500 km, dependiendo del tamaño de la batería empleada. Además, son vehículos de carga rápida usando corriente continua y son capaces de cargar un 80 % de las baterías en 45 minutos. Por otro lado, Volvo Trucks es una de las compañías líderes en el mercado de camiones eléctricos. En concreto, esta empresa se posiciona en la cabeza del ranking europeo en ventas con una cuota del 42 % [18]. Su modelo Volvo Trucks Electric proporciona una autonomía de 300 km y se estiman 9,5 horas de carga para corriente alterna y 2 horas para corriente continua. Por último, el modelo de Renault alcanza 400 km de autonomía y un tiempo de media hora para alcanzar un 80 % de carga. [19]

Otros modelos que se incluirán próximamente en el mercado serán: el camión Tesla Semi y el MAN e-Truck. El modelo Tesla Semi es el primer camión eléctrico fabricado por Tesla, el cual ofrecerá una autonomía de entre 482 y 804 km. Asimismo, “Tesla promete hasta 650 kilómetros de autonomía con tan sólo 30 minutos de carga” [19]. Por otro lado, el MAN e-Truck alcanzará una autonomía de unos 800 km. [19]

2 ESTADO DEL ARTE

“Aquel que no conoce su historia está condenado a repetirla”.

- Napoleón Bonaparte -

A raíz de la controversia con el calentamiento global, se han ido desarrollando múltiples posibles soluciones dentro del campo de la automoción. Una de las ideas más actuales y todavía en progreso es la carga inalámbrica, método de transmisión de electricidad factible y alcanzable para cargar sistemas eléctricos. Además, es una tecnología eficiente, económica y más segura que otros métodos de alimentación ya que no emplea cables para transferir la electricidad.

2.1. Inicios de la carga inalámbrica

Este tipo de transmisión de energía tiene su origen en el siglo XIX, época en la que Michael Faraday demostró que se inducía una corriente eléctrica cuando se interaccionaba un imán con una bobina. Este descubrimiento descendió de la invención de Oersted en 1820, quien logró obtener un campo magnético al hacer circular una corriente por un conductor. Estos hechos convergieron en la ley de Faraday-Henry y la ley de Ampère, las cuales relacionan el vínculo existente de un campo magnético con un campo eléctrico variantes en el tiempo. Posteriormente, de ambos principios surgieron las leyes de Maxwell en 1865.

Más tarde, aparecieron los primeros descubrimientos de transferencia inalámbrica como lo fueron el nacimiento del efecto fotoeléctrico y la propagación de ondas gracias a Heinrich Hertz. Asimismo, uno de los precursores de este tipo de tecnología fue Nikola Tesla, padre de la corriente alterna, quien quiso crear una manera de transportar la electricidad sin necesidad de cableado. Esto lo consiguió tras muchos años de investigación, patentando la “bobina de Tesla”, lo que le permitió encender bombillas a cortas distancias sin el empleo de cables. De esta manera, Tesla logró su primera patente en carga inalámbrica en 1897. [20]

Otras de las grandes invenciones en este campo fue la “Torre de Tesla”, lo cual podría haber desembocado en una gran revolución científica. En 1901, Tesla pretendió innovar en el campo de las telecomunicaciones transportando señales y electricidad a través del aire. No obstante, las centrales nunca llegaron a ser viables debido a las largas distancias y a la falta de financiación.

Después de que los esfuerzos de Tesla por implantar estas estaciones fueran en vano, este tipo de tecnología quedó en un segundo plano durante un largo período de tiempo hasta los años 80, etapa en la que sus investigaciones mostraron sus frutos en varias aplicaciones. Una de ellas fue en el sector de la automoción, en el que se realizó un estudio en California tratando la transferencia de energía inductiva (IPT) en un autobús. Este experimento alcanzó un 60% de eficiencia y supuso un gran logro a pesar de que más tarde renunciaron al proyecto. [21] Durante las últimas décadas, se han ido desarrollando numerosos avances gracias a la electrónica de potencia. De esta manera, cada vez se ha hecho más incapié en solventar las pérdidas que se producían entre

el emisor y el receptor a través del aire, añadiendo nuevos elementos como condensadores o más bobinas. [6]

En 2013, Bosh logró revolucionar el sector automovilístico creando cargadores inductivos que fueron empleados en un modelo Nissan. Más adelante, otras compañías como BMW, Audi, Qualcomm y Continental, han ido innovando en nuevos tipos de estos cargadores y los han implementado en sus propios modelos de vehículos. En concreto, BMW introdujo cargadores de 3,2 kW de potencia en sus vehículos eléctricos e híbridos [6].

Asimismo, en 2018, empresas como Witricity o Evaltran comenzaron a producir específicamente tipos de estos cargadores para venderlos a otras grandes empresas de automoción. Estos dispositivos han conseguido llegar a los 11 kW de potencia para la carga, con un 93% de rendimiento [6].

Entre los avances en España destacan el proyecto “UNPLUGGED” y el proyecto “VICTORIA” en 2017. El primero de ellos consiguió transferir carga inalámbrica con 50 kW y el segundo consistió en cargar inalámbricamente un autobús en varias paradas siguiendo una ruta específica [6].

Hasta aquí, los modelos citados son sistemas de transferencia inalámbrica estática. No obstante, a lo largo de los años tomaron gran importancia los sistemas dinámicos, es decir, la transmisión inalámbrica en movimiento.

Uno de los mayores avances en este tipo de tecnología fue el proyecto “FABRIC”, el cual fue un programa de investigación desarrollado por la Unión Europea, en el que colaboraron Qualcomm y Renault. “Se logró satisfactoriamente cargar el automóvil a una potencia máxima de 20 kW, siendo la longitud del carril de pruebas de 100 metros, y con una velocidad máxima del vehículo de 100 km/h” [6].

Otra de las innovaciones más pioneras fue la invención de un tipo de hormigón que puede transmitir ondas electromagnéticas, desarrollado por la compañía Magment en 2018. Así, no se requiere el uso de cables y es el propio hormigón el que hace la función de una bobina primaria. “En investigaciones sobre dicho asfalto, se ha llegado a obtener un rendimiento de hasta un 95 %, a una distancia de la bobina secundaria de 20 cm (pensado para los coches) y del 86 % para una distancia de 40 cm (pensado para camiones)” [6].

A finales de 2019 se llevó a cabo la construcción de la primera carretera capaz de cargar inalámbricamente un vehículo pesado, concretamente autobuses y camiones eléctricos. Este sistema comprobó su funcionalidad cargando un camión con 45 kW, esperando llegar a un valor de 125 kW. Además, se observó que no se producían alteraciones ante condiciones climatológicas adversas [6].

Hoy en día, la carga inalámbrica está aún en desarrollo y en plena investigación siendo una tecnología innovadora y con gran impacto en el sector del transporte. Asimismo, cada vez los ingenieros y los científicos están más cerca de lograr que este método sea más eficiente y económico, haciendo de éste un sistema de transmisión de energía potencialmente fructífero a nivel mundial y clave para el desarrollo tecnológico.

Uno de los grandes avances actuales ha sido el desarrollo de un sistema de inducción llevado a cabo por la Universidad de Chalmers, en Suecia, logrando una eficiencia del 98 % con potencias de carga de hasta 500 kW usando corriente continua [22].

Otro de los avances recientes ha sido el desarrollo del V2G que se basa en la conexión del vehículo a la red. De esta manera, se quiere usar las baterías como sistema de almacenamiento, empleando la red para cargar o descargar estos dispositivos. Lo ideal sería que hubiesen puntos de recarga en el trabajo, gasolineras, supermercados, es decir, en lugares de interés. De esta manera, menguaría notablemente el tiempo de recarga en los vehículos y se solucionaría el problema que conlleva actualmente este tipo de tecnología [6].

2.2. Modelos actuales de vehículos que utilizan carga inalámbrica

Aunque la carga inalámbrica es aun una tecnología que está en desarrollo, existen compañías como Tesla, BMW y Toyota que ya la han implementado en algunos de sus modelos. Algunos de los modelos más populares son el Tesla Model S, el Mercedes S550e 2017, el modelo BMW 530e iPerformance y el vehículo híbrido enchufable Toyota Prius Prime.

El modelo inalámbrico más famoso de Tesla es su modelo Tesla Model S, el cual usa carga por inducción estática y se basa en el estándar Qi de carga inalámbrica utilizado en muchos dispositivos móviles. Cabe destacar que este sistema emplea el cargador “Plugless” creado por Evaltran. Con este cargador estos modelos se cargan a una potencia de 7,2 kW, lo que se traduce en 32 km de autonomía [23].

Otro de los modelos más señalables en la industria automovilística es el híbrido S550e de Mercedes, disponible desde 2017 gracias a Qualcomm. Este vehículo ofrece una potencia de carga de 3,6 kW mediante una distancia entre plataformas de aproximadamente 25 cm. [24]

En cuanto a la marca BMW, destaca su modelo híbrido BMW Serie 530e iPerformance disponible desde 2018. Este sistema proporciona una carga en aproximadamente tres horas a una potencia de 3,2 kW [25]. Además, cuenta con un servicio opcional de carga digital con la finalidad de recargar los vehículos dependiendo de la demanda de la red eléctrica.

Por último, destaca el Toyota Prius Prime, el cual es un vehículo híbrido enchufable que emplea cargadores de WiTricity a 3,3 kW de potencia de carga. Este dato se recogió en 2014, mientras que para 2016 se esperaba conseguir un cargador que operase al doble de potencia con eficiencias aproximadamente del 90 %. [26]

3 BATERÍAS

“Si buscas resultados distintos no hagas siempre lo mismo”.

- Albert Einstein -

La batería es el elemento que se encarga de almacenar electricidad en los vehículos eléctricos. Este dispositivo se compone de un conjunto de celdas conectadas entre sí en serie y/o paralelo cuyo objetivo es alcanzar unas condiciones establecidas de diseño. En cada una de las celdas se produce una reacción reducción-oxidación, en la que hay un intercambio de electrones. Esta reacción es reversible, lo que permite a las baterías usar la energía almacenada para mover el automóvil.

Para que las baterías sean factibles deben cumplir ciertos requisitos [7]:

- Potencia específica alta
- Energía específica alta
- Alta durabilidad, sin necesidad de mantenimiento en su ciclo de vida
- Funcionamiento seguro y estable
- Impacto ambiental mínimo al final de su ciclo de vida
- Alta eficiencia en los ciclos de carga y descarga

El mayor inconveniente de los vehículos eléctricos es la propia batería debido a su peso ya que, a más masa mayor consumo de energía. Por lo tanto, estos dispositivos están en continua investigación para lograr un equilibrio entre peso y precio, de manera que lleguen a ser lo más eficientes posibles.

3.1 Parámetros fundamentales

- Capacidad específica: Cantidad de energía que es capaz de almacenar o entregar una batería (mAh/g).
- Densidad energética: Cantidad de energía que puede almacenar una batería por unidad de volumen (Wh/m³).
- Energía específica: Cantidad de energía que puede almacenar una batería por unidad de masa (Wh/kg)
- Potencia específica: Potencia que puede suministrar una batería por unidad de masa (W/kg). Este parámetro define cuánta corriente puede proporcionar la batería. Además, a mayor intensidad mayor velocidad del automóvil. Por lo tanto, interesan potencias altas. No obstante, una mayor potencia específica se traduce en una energía específica menor. Esto conlleva grandes velocidades pero con menor distancia recorrida.

Por otro lado, la potencia específica es limitada ya que está restringida por la reacción que se produce en las celdas. Esto provoca pérdidas por efecto Joule y una disminución en la capacidad de las baterías.

- Número de ciclos: Veces que una batería puede llegar a cargar y descargarse. Hay que tener en cuenta el efecto de la temperatura ya que una batería puede llegar antes a su fin si está sometida a altas temperaturas.
- Estado de carga (SOC): Representa el porcentaje de energía almacenada en una batería, siendo 0 el estado cuando está vacía y 1 cuando está al 100% de su capacidad.
- Profundidad de descarga (DoD): Representa el porcentaje necesario para llegar a cargar la batería al completo.

3.2 Baterías plomo-ácido

Este tipo de baterías es de las más antiguas. Se suelen emplear en vehículos con motores convencionales, que no sean híbridos, cuyas baterías tienen celdas de 2 V que pueden llegar a 6 V o incluso 12 V [27]. Consiste en unas placas de plomo dispuestas en paralelo, las cuales están sumergidas en ácido sulfúrico y agua. Además, existe un aislante que las separa el cual debe cumplir ciertas condiciones para ser compatible con el ácido. Las reacciones que intervienen son [28]:

- Reacción de oxidación: $Pb + H_2SO_4 \rightarrow PbSO_4 + 2H^+ + 2e^-$
- Reacción de reducción: $PbO_2 + H_2SO_4 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$

Es importante señalar que este proceso a veces no es reversible debido a la formación de cristales de sulfato de plomo. A esto se le llama proceso de sulfatación irreversible y cuando ocurre hay que reemplazar la batería por una nueva. Además, es una de las causas más habituales de fallo en este tipo de baterías [28].

Otro de los motivos de fallo se debe a la corrosión que se produce en las placas de plomo, sobre todo cuando la concentración del electrolito es baja y el sulfato de plomo es más soluble. Este fenómeno ocurre bajo la siguiente reacción [28]:

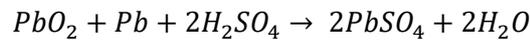


Tabla 3-1. Ventajas y desventajas de las baterías de plomo-ácido.

Ventajas	Desventajas
Alta capacidad de descarga en períodos cortos de tiempo	Baja energía específica
Baratas	El plomo es nocivo
Reciclable	Pesadas
Buena eficiencia	Vida útil baja
	No compatible con carga rápida
	Necesidad de mantenimiento
	Sensible a temperaturas elevadas

Cabe destacar que uno de los mayores inconvenientes de este tipo de baterías es su baja energía específica que ronda entorno a 33-42 Wh/kg. No obstante, tiene una potencia específica de 180 W/kg y pueden llegar a alcanzar unos 100 km. Por otro lado, los ciclos de vida oscilan entre 500 y 800 ciclos. Para lograr una mayor vida útil habrá que realizar descargas poco profundas, alrededor de un 50% de su capacidad [29].

Actualmente, los científicos se han centrado en intentar incrementar su vida útil, en disminuir su peso y tiempo de recarga, así como también, evitar la necesidad del mantenimiento de las mismas. De esta manera, surgieron las baterías plomo-ácido de válvula regulada capaces de reducir las pérdidas de electrolito en las sobrecargas y,

a su vez, la necesidad del mantenimiento periódico [27]. Sin embargo, en las recargas no ocurre esto.

3.3 Baterías basadas en Níquel

3.3.1 Níquel-Cadmio

Estos dispositivos se componen de hidróxido de níquel que actúa como electrodo positivo y cadmio que se emplea como electrodo negativo. Además, se usa un electrolito de hidróxido de potasio. Las ecuaciones que la gobiernan son las siguientes [29], siendo la reacción de descarga de izquierda a derecha y la de recarga de derecha a izquierda:

- Reacción en el cátodo: $NiO(OH) + H_2O + e^- \leftrightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$
- Reacción en el ánodo: $Cd + 2OH^- \leftrightarrow Cd(OH)_2 + 2e^-$

Tabla 3-2. Ventajas y desventajas de las baterías de níquel-cadmio.

Ventajas	Desventajas
Admiten sobrecargas	Necesidad de mantenimiento
Resistentes frente a altas temperaturas	Coste alto
Alta vida útil	El cadmio no es sostenible con el medio ambiente
Reciclables	Efecto memoria
Fiabiles	Celdas de 1,2 V
Alta corriente de descarga	Degradación

Cabe destacar que tienen una energía específica aproximadamente de 50 Wh/kg y una potencia específica de 150 W/kg [29]. Asimismo, puede llegar hasta los 2000 ciclos de carga/descarga .

Hoy en día, este tipo de baterías no es de las más usadas debido a sus desventajas de entre las que destacan su coste y el hecho de que el cadmio contamina. Además, presenta efecto memoria (pérdida de capacidad de carga ante ciclos de carga incompletos). Sin embargo, se emplean en aeronaves por la seguridad que ofrecen y “es la única batería química que permite un proceso de carga ultrarápida con mínimo de estrés” [30].

3.3.2 Níquel-hidruro metálico

Este tipo de baterías son similares a las de níquel-cadmio con la diferencia de que en este caso se usa hidróxido de níquel como cátodo en vez de cadmio e hidruro metálico como ánodo. De esta manera, se consigue dejar de usar el cadmio que es perjudicial para el medio ambiente, así como también, aumentamos la capacidad de la batería, disminuimos su peso y el efecto de la memoria [27].

Las reacciones que intervienen son [29]:

- Reacción en el cátodo: $NiO(OH) + H_2O + e^- \leftrightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$
- Reacción en el ánodo: $OH^- + MH \leftrightarrow M + H_2O + e^-$

Tabla 3-3. Ventajas y desventajas de las baterías de níquel-cadmio [27].

Ventajas	Desventajas
Mayor densidad energética y mayor energía específica que las baterías níquel-cadmio	Menor fiabilidad que las Ni-Cd
No poseen cadmio	No soportan descargas bruscas
Seguras	Alta razón de autodescarga, entre un 15-20% al mes
Pueden cargarse con un cargador convencional	Tensión nominal de 1,2 V/celda
	Vida útil entre 300-500 ciclos carga/descarga
	Son menos resistentes ante temperaturas y corrientes altas
	Necesidad de mantenimiento periódico
	Efecto memoria

Las baterías de níquel-hidruro metálico tienen un nivel de energía específica mucho mayor que las de níquel-cadmio, pudiendo llegar hasta los 120 Wh/kg y una potencia específica de 250-1000 W/kg [29].

Actualmente tienen gran aplicación en vehículos híbridos.

3.4 Baterías basadas en litio

Las baterías de litio tienen dos grupos principales: las de ion-litio líquido y las polímero de litio. Dentro de las líquidas, las tres más distinguidas según el material empleado como cátodo son: baterías de óxido de cobalto y litio, litio ferfosfato y titanato de litio.

Además, en la actualidad, los científicos están desarrollando nuevos tipos de baterías basadas en litio junto con otro tipo de materiales con la finalidad de lograr mejores prestaciones ya que han llegado a ser ampliamente exitosas en el sector del transporte.

3.4.1 Ión-litio

Estos dispositivos emplean carbono como ánodo y compuestos basados en litio como cátodos, los cuales se detallan más adelante. Además, se suele usar sal de litio como electrolito.

Tabla 3-4. Ventajas y desventajas de las baterías de ion-litio.

Ventajas	Desventajas
Vida útil elevada	Necesidad de un circuito de protección
No requieren mantenimiento	Caras
Energía y potencia específica elevada	Capacidad de descarga
Tiempo de carga bajo	
Alta eficiencia	
Elevada densidad de energía	
No tienen efecto memoria	
Menor peso que las baterías anteriores	

Por lo general, las baterías de ion-litio tienen una energía y potencia específica de unos 265 Wh/kg y 300 W/kg, respectivamente. Asimismo, tienen una eficiencia que ronda al 98% y puede llegar a proporcionar tiempos de carga llamativos de hasta un 80% de recarga en cortos períodos de tiempo [29].

Todas estas características desembocan en una capacidad teórica total de 3860 mAh/g, valor notablemente alto frente a las baterías de níquel-cadmio (480 mAh/g) y níquel-hidruro metálico (372 mAh/g) [31].

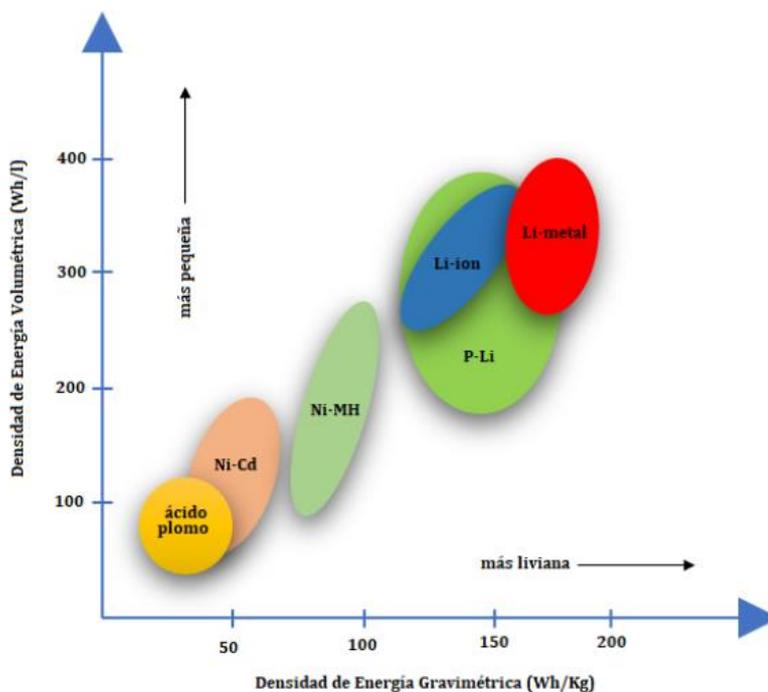


Figura 3-1. Comparación entre la densidad de energía gravimétrica y volumétrica de los principales tipos de baterías [32].

Sin embargo, uno de los mayores problemas es la inseguridad que ocasiona el litio debido a su reacción con el aire, así como también, su comportamiento frente al efecto de la temperatura. A bajas temperaturas pueden aparecer cristales y ocasionar daños mientras que a altas temperaturas puede conllevar presiones excesivas en las celdas. Por esta razón, en este tipo de baterías se usa un sistema para monitorizar algunas variables de las celdas como la tensión, la temperatura y la corriente, entre otras. Este equipo se llama Sistema de Gestión de Baterías o más conocido como BMS y permite evitar sobrecargas u otros posibles daños, lo que se traduce en una mayor vida útil.

3.4.1.1 Óxido de cobalto-litio ($LiCoO_2$ o LCO)

Estas baterías usan como electrodo positivo óxido de cobalto y tiene una amplia aplicación en el sector electrónico.

Tabla 3-5. Ventajas y desventajas de las baterías de óxido de cobalto-litio.

Ventajas	Desventajas
Mayor densidad energética y mayor energía específica que las baterías anteriores	Caras
No tienen efecto memoria	Frágiles
Eficiencia elevada	Sensibles a temperaturas extremas
Livianas	El cobalto no es sostenible con el medio ambiente

Algunas de sus características son: nivel de energía específica mucho mayor que las basadas en níquel, con un rango entre 100-250 Wh/kg y son capaces de proporcionar hasta 1200 ciclos de carga/descarga.

3.4.1.2 Litio ferrofosfato ($LiFePO_4$ o LFP)

Estas baterías están formadas mediante láminas de fosfato de hierro que se emplean como electrodo positivo.

Tabla 3-6. Ventajas y desventajas de las baterías de litio ferrofosfato.

Ventajas	Desventajas
Mayor seguridad al no usar cobalto	Caras
Más estables al emplear hierro	Menor energía específica que las de óxido de cobalto
Mayor potencia	
Mayor número de ciclos carga/descarga	
Exento de componentes nocivos	

Este tipo de dispositivos tienen una energía específica de 100 Wh/kg aproximadamente, menor que otras baterías, por lo que si se quieren emplear en el sector del transporte habrá que aumentar su tamaño, lo que se traduce en un incremento de peso. No obstante, proporciona un alto número de ciclos pudiendo llegar a los 2000 ciclos. Un aspecto señalable es que, aunque son costosas, son más baratas comparadas con las de óxido de

cobalto ya que se componen de hierro como alternativa. Además, presentan mejor conductividad al tener nanotubos de carbono y poseen mejores prestaciones en cuanto a su seguridad gracias a una mejora en su estabilidad química [27].

Según [33]: “Su voltaje se mantiene cerca de los 3,2 V durante la descarga hasta que la pila se vacía” y “se pueden conectar en serie cuatro celdas para un voltaje nominal de 12,8 V. Este voltaje se acerca mucho al voltaje nominal de una batería de plomo de seis celdas”. Esto quiere decir que, las baterías de litio-ferrofosfato presentan mejores prestaciones y son muy competitivas frente a las de ácido-plomo, por lo que pueden ser una gran opción para reemplazarlas.

Actualmente, los científicos predicen que este tipo de baterías son más aptas para vehículos pesados que para ligeros. A pesar de ello, algunas compañías como Tesla, Renault y Volkswagen quieren implementarlas en sus modelos [34].

Además, es ampliamente aplicable a energías renovables.

3.4.1.3 Titanato de litio (LTO)

Estas baterías se basan en reemplazar el carbono por nanocristales de titanato de litio.

Tabla 3-7. Ventajas y desventajas de las baterías de titanato de litio.

Ventajas	Desventajas
Alta seguridad	Capacidad baja
Elevada vida útil	Densidad de energía baja
Recarga rápida	

Aunque la capacidad de estas baterías está en torno a 175 mAh/g, se espera que a corto plazo los científicos incrementen esta cifra. Lo llamativo de estas baterías es que pueden alcanzar hasta 10.000 ciclos de carga/descarga y se pueden cargar en pocos minutos.

Según [35]: “Comparando las baterías LTO y LiFePO₄, los ciclos de vida de LTO son diez veces mayores que las LiFePO₄”. Además, “LTO puede usarse por debajo de los 0 °C, mientras que LiFePO₄ no podría”. Haciendo ensayos concluyeron que este tipo de baterías puede cargar un 80% en 6 minutos y se espera que tengan una durabilidad de 7 años.

Actualmente, este tipo de batería está en investigación, siendo muy atractiva en aplicaciones como autobuses eléctricos.

3.4.2 Polímero de litio (LiPo)

Este tipo de dispositivos se diferencian principalmente de las ion-litio en el electrolito ya que estas emplean un sólido, normalmente un gel.

Tabla 3-8. Ventajas y desventajas de las baterías de polímero de litio.

Ventajas	Desventajas
Mayor densidad energética y potencia que las baterías ion-litio líquidas	Más costosas que las ion-litio
Livianas	Vida útil menor
Eficiencia elevada	Baja conductividad
No requiere mantenimiento	

Por lo general, tienen una potencia específica entre 100 y 300 W/kg. Uno de sus inconvenientes frente a las baterías de ion-litio es que proporcionan menor cantidad de ciclos carga/descarga, aproximadamente de 1000 ciclos.

Uno de los mayores inconvenientes es que presentan baja conductividad. Esto se debe a que tienen una resistencia interna elevada, lo que hace que sean ineficientes en la descarga. Además, pueden llegar a temperaturas altas alrededor de los 60 °C. Para paliar este problema, se incorporó un gel como electrolito [27].

Al ser livianas, se emplean sobre todo en dispositivos electrónicos.

3.4.3 Otras baterías

Con la finalidad de mejorar las prestaciones de las baterías de litio, los expertos están continuamente investigando posibles materiales que sirvan como sustituto de las baterías anteriores. A continuación, se presentan algunas opciones novedosas y atractivas actuales en la industria.

3.4.3.1 Litio-sulfuro (Li-S o LSB)

Estas baterías están compuestas por litio como electrodo negativo, azufre y carbono como electrodo positivo y un electrolito.

Tabla 3-9. Ventajas y desventajas de las baterías litio-sulfuro.

Ventajas	Desventajas
Capacidad específica alta	Reciclado
El azufre es barato	Producen gases tóxicos (H_2S y SO_2)
El azufre es abundante en la naturaleza	Baja seguridad
Sostenibilidad con el medio ambiente	Mayor degradación y menor vida útil

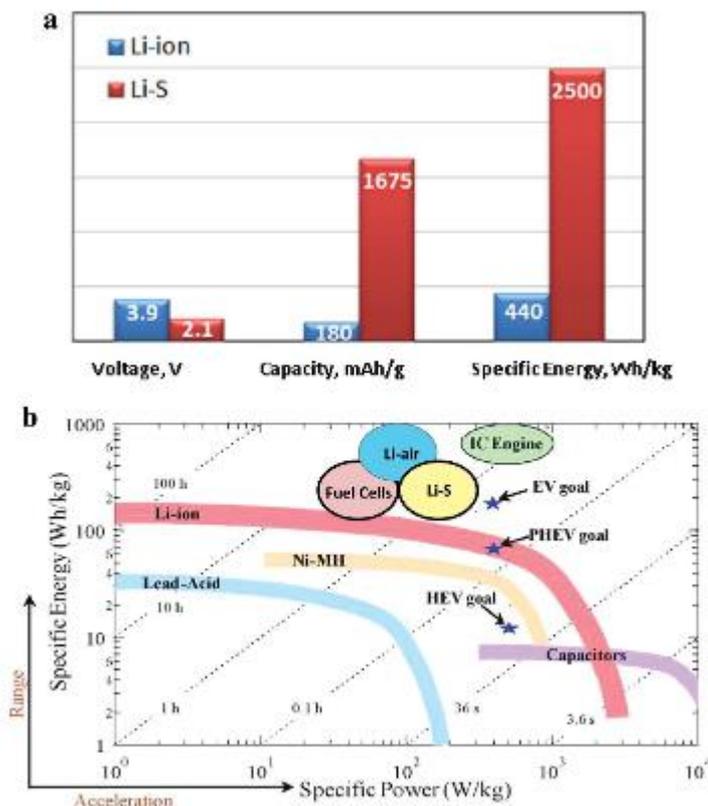


Figura 3-2. Comparación entre baterías ion-litio y litio-azufre [36].

Las baterías litio-azufre son bastante atractivas ya que ofrecen una densidad energética de 2600 Wh/kg y capacidad teórica de 1675 mAh/g. Como es de observar, estos datos la hacen notablemente competitiva respecto a las de ion-litio, pudiendo llegar a ser una gran opción para reemplazarlas en un futuro. Además, como el azufre es barato y abundante, este tipo de baterías puede llegar a alcanzar un éxito en el mercado [37].

No obstante, la reacción química que se produce en la batería provoca que se corra el ánodo de litio, provocando una disminución de su vida útil [38]. A esto se le llama “efecto Shuttling”. Además, se emiten gases nocivos que pueden causar un sobrecalentamiento de las celdas, llegando a poder ocasionar explosiones [37].

Actualmente, los expertos apuestan por este tipo de baterías para los vehículos eléctricos y los híbridos enchufables, aunque todavía es una tecnología que está estudiándose. Entre los avances destacan la aplicación de los electrodos nanoestructurados en ellas y el empleo de membranas nanofibras de aramida provenientes del kevlar como solución ante la degradación [38].

Algo interesante es la posible aplicación en energías renovables y en vehículos pesados.

3.4.3.2 Batería de nanocables

Esta batería es una tecnología emergente que se basa en el empleo de nanocables como ánodo. Los dos hallazgos más relevantes de este tipo de baterías son con nanocables de silicio y con nanocables de oro.

La primera de ellas se descubrió en 2007, en la Universidad de Stanford, la cual consiste en una batería de ion-litio con nanocables de silicio. Éstos otorgan una elevada densidad energética aproximadamente de 2000 Wh/kg y un peso bajo. Además, permiten la carga rápida y según [39] “la batería trabaja al 85% de su capacidad tras 6.000 ciclos de carga/descarga, comparada con las baterías de ion de litio que se agotan tras 1000 cargas”. No obstante, el mayor inconveniente es su inestabilidad.

Recientemente, Mya Le Thai realizó una serie de ensayos en la Universidad de California usando nanocables de oro como electrodo negativo y un gel como electrolito. La experta descubrió que el

rendimiento y la vida útil de los nanocables eran ineficientes debido a la fragilidad de los mismos, por lo que optó por envolverlos de oro con una capa de manganeso y usó un gel particular como electrolito [40]. Fue un descubrimiento muy atractivo ya que “esto permitió que el electrodo aguantara más de 200.000 ciclos de carga durante los tres meses de prueba, no detectándose ninguna pérdida de capacidad o potencia, ni tampoco fractura de los nanocables” [40].

Tabla 3-10. Ventajas y desventajas de las baterías de nanocables de oro.

Ventajas	Desventajas
Bajo peso	Los nanocables son frágiles
Elevada vida útil	El oro es caro
Recarga rápida	

Actualmente, se están investigando otros materiales que no sean oro para lograr desarrollar baterías económicas.

3.5 Baterías de metal-aire

Estas baterías se consideran actualmente las baterías del futuro. Se suelen emplear electrolitos de líquido iónico u orgánicos, pero son más usados los primeros debidos a sus mejores características. Además, tienen un cátodo basado en oxígeno y un ánodo de metal.

Tabla 3-11. Ventajas y desventajas de las baterías metal-aire.

Ventajas	Desventajas
Energía específica alta	Eficiencia baja
Económicas	Densidad de potencia baja
Compactas	Degradación
Gran autonomía	
No son tóxicas	
Alta vida útil	

Tecnología metal-aire	Coste (\$ kg ⁻¹)	Wh kg ⁻¹	Wh L ⁻¹	Voltaje (V)	Naturaleza del electrolito
Li	68	3458	6102	2.96	Orgánico
Na	1.7	1580	4430	2.27	Orgánico
K	20	935	1913	2.48	Orgánico
Mg	2.75	2840	6670	3.09	Acuoso
Al	1.75	2790	6790	2.71	Acuoso
Zn	1.85	1086	5960	1.65	Acuoso
Fe	0.4	763	1431	1.28	Acuoso

Figura 3-3. Comparación de los distintos tipos de materiales para las baterías metal-aire [41].

Atendiendo a la Figura 3-3, podemos observar que el litio-aire es el tipo de material que más energía específica puede proporcionar de este tipo de tecnología, siguiéndole muy de cerca el aluminio-aire. El zinc-aire también es muy atractivo debido a su bajo voltaje y a la estabilidad que presenta en agua. Además, son de las más económicas [41].

Hoy en día, las investigaciones se centran en mejorar sus valores de densidad energética, estabilidad y seguridad del ánodo [42].

3.5.1 Zinc-aire

Este tipo de baterías tiene 1000 Wh/kg de densidad energética teórica y son una de las más económicas dentro de este tipo de tecnología. Además, tienen alta densidad energética teórica, de 5960 Wh/L. Su mayor inconveniente es la degradación de los elementos que lo constituyen [42].

3.5.2 Aluminio-aire

Este tipo tiene una energía específica de 1000-2000 Wh/kg, valor alto. Además, según [43]: “un vehículo eléctrico con baterías de aluminio tiene el potencial para un máximo de ocho veces la autonomía de una batería de iones de litio, con un peso total significativamente menor”. Otra de las grandes ventajas que presentan es su seguridad y abundancia en la naturaleza.

Por otro lado, todavía no se ha llegado a predecir exactamente su vida útil y uno de sus mayores inconvenientes es su compleja recarga debido a que requiere un recambio del ánodo cada cierto tiempo [44].

3.5.3 Litio-aire

En cuanto a estas baterías, se espera poder llegar a obtener un valor entre 11.000 y 13.000 Wh/kg de densidad energética, casi igual que la de la gasolina. Asimismo, se están realizando varios estudios con distintos electrolitos con la intención de mejorar la eficiencia, la cual se encuentra por debajo del 70% [42]. Además, tienen poca vida útil y son inestables.

Un estudio reciente, asegura haber conseguido una batería de este tipo de 500 Wh/kg a 1200 ciclos carga/descarga.

3.6 Baterías de sal fundida

Estas baterías se componen de sal fundida como electrolito. Se caracterizan por tener alta energía específica y poder operar a elevadas temperaturas sin presentar fallos (incluso hasta 300°C) [45].

3.6.1 Azufre-sodio

Estos dispositivos usan un ánodo de azufre líquido y un electrolito cerámico de beta alúmina [45].

Tabla 3-12. Ventajas y desventajas de las baterías azufre-sodio.

Ventajas	Desventajas
Elevada densidad de energía	Contaminante
Eficientes	Baja vida útil
Viabiles económicamente	Inflamable
	Baja capacidad de energía
	Reciclaje

Uno de sus inconvenientes es que se produce polisulfuro de sodio en las descargas, el cual es muy corrosivo [31].

Actualmente están en desarrollo pero ya se han hecho novedosos avances entre los que destaca una investigación por medio de pirólisis simple y electrodos de carbono. Así se ha mejorado notablemente su rendimiento y capacidad energética, siendo ésta de 1017 mAh/g, y se ha aumentado su vida útil a temperatura ambiente a un valor de 1000 ciclos [46].

3.6.2 NaNiCl o ZEBRA

Estos dispositivos usan un ánodo de sodio triturado y dos electrolitos: uno cerámico como separador (beta-alúmina) y otro de sodio-níquel-cloro triturado en el lado del cátodo. Además, se usa un cátodo de níquel cuando los dispositivos están descargados y cloruro de níquel cuando están cargados [45].

Tabla 3-13. Ventajas y desventajas de las baterías ZEBRA.

Ventajas	Desventajas
Mayor voltaje	Sufren pérdidas cuando no están operando
Menor corrosión	
Alta densidad energética	
El sodio, cloro y aluminio son abundantes en la naturaleza	
Bajo peso	
No necesita mantenimiento	

Este tipo tiene una energía específica de 90 Wh/kg y una potencia específica de 150 W/kg. Tiene una vida útil de 1500 ciclos carga/descarga, que pueden llegar a ser de 3000 ciclos [45].

Tienen gran aplicación en vehículos pesados como autobuses, camiones o furgonetas eléctricas y se espera mejorar sus prestaciones en un futuro cercano, siendo una gran promesa para el sector automovilístico.

3.6.3 Ión-sodio

Estos dispositivos suelen emplear óxidos estratificados y compuestos polianiónicos para el cátodo y materiales basados en carbono, aleaciones metálicas, orgánicos y metales de transición como ánodo [47]. Son parecidas a las baterías ión-litio.

Cabe destacar que el sodio no se suele usar como ánodo debido a la formación de dendritas que hace cortocircuitar el sistema. Además, el material es muy reactivo [47].

Tabla 3-14. Ventajas y desventajas de las baterías ión-sodio.

Ventajas	Desventajas
Más baratas que las ión-litio El sodio es abundante en la naturaleza en comparación con el litio	Menores prestaciones con respecto a su densidad de energía gravimétrica y volumétrica a diferencia del litio Necesita un circuito de protección

Una de las ventajas de estas baterías es según [42]: “el sodio no forma aleaciones con el aluminio, por ello, el aluminio puede utilizarse como colector de corriente para los dos electrodos resultando en una mejora del peso y coste de las baterías”.

Actualmente, se han logrado desarrollar baterías de entre 100-160 Wh/kg de este tipo, valor que se prevé incrementar. Además, Natron, compañía que fabrica baterías, ha llegado a alcanzar hasta 50.000 ciclos carga/descarga.

3.7 Baterías de flujo redox (RFB)

Las baterías redox se basan en las reacciones químicas de reducción-oxidación de distintas especies líquidas. Estos dispositivos se componen de dos tanques con electrolitos de ácido sulfúrico normalmente, celdas divididas por membranas, bombas hidráulicas y conductos.

Dentro de este grupo, las más relevantes son las compuestas por vanadio (VRFB). Su principal ventaja es que no sufren contaminación por difusión, lo que se traduce es una disminución en el coste. Además, poseen una alta eficiencia, que ronda el 85%, y pueden llegar hasta los 10.000 ciclos de carga/descarga. Sin embargo, hay que tener cuidado con las reacciones ya que un desajuste de las mismas pueden ocasionar pérdidas de capacidad [48].

Tabla 3-15. Ventajas y desventajas de las baterías de flujo redox con vanadio.

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia	Baja densidad de potencia y energía
Alta vida útil	Alto coste del electrolito y las membranas
Recarga instantánea	Necesidad de equipos adicionales para controlar la temperatura y la potencia
No requieren apenas mantenimiento	
No sufren contaminación por difusión	
Potencia y capacidad independientes	

Otra de las grandes ventajas de este tipo de baterías es la independencia de la potencia y la capacidad. Este hecho hace que tenga una amplia libertad en el diseño y desarrollo para aplicaciones específicas, pudiendo llegar a tener una capacidad casi infinita.

Hoy en día, pueden llegar a ser atractivas para su aplicación en energías renovables y aplicaciones en las que se necesite mucho espacio de almacenamiento. No obstante, si se quiere emplear en el sector del transporte hay que conseguir materiales que mejoren sus prestaciones, sobre todo su energía específica, coste y fiabilidad.

3.8 Baterías de magnesio

Actualmente, las baterías de magnesio son muy punteras en el sector de la automoción ya que se prevé lograr grandes niveles de energía específica capaces de sustituir a las de ion-litio.

Tabla 3-16. Ventajas y desventajas de las baterías de magnesio.

Ventajas	Desventajas
Capacidad específica y densidad de energía altas	Vida útil baja
Exento de materiales nocivos	Bajo rendimiento
El magnesio es abundante en la naturaleza	Voltaje ineficiente
Sin riesgos de explosión	

Según [49] : “El magnesio tiene dos cargas positivas frente a una única carga positiva del litio, lo que permite almacenar casi el doble de energía en el mismo volumen”.

Hoy en día, se están realizando ensayos con vanadio y manganeso, entre otros, para lograr aumentar el rendimiento y alcanzar una mayor autonomía en vehículos, así como también desembocar en una solución viable económicamente.

3.9 Supercondensadores

3.9.1 Características

Los supercondensadores son sistemas de almacenamiento de energía que se usan actualmente como alternativa o complemento de las baterías, sobre todo para conseguir mayor durabilidad.

Tabla 3-17. Ventajas y desventajas de los supercondensadores [50].

Ventajas	Desventajas
Elevado número de ciclos	Capacidad de almacenamiento limitada (bastante menor que las baterías)
Carga y descarga muy rápida	Necesitan reguladores
Elevada eficiencia	Coste alto
Seguros (no explotan si se produce un cortocircuito)	Celdas de bajo voltaje
Capaz de manejar corrientes elevadas	
No necesitan mantenimiento	
No son tóxicos	
Pueden operar en un gran rango de temperaturas y tensiones	
Menor peso que las baterías	

Estos dispositivos se caracterizan por tener mucha más densidad energética que los condensadores convencionales, “miles de veces mayor que un condensador electrolito de una alta capacidad” [27]. Además, son excelentes ante la demanda de elevada potencia en breves instantes de tiempo.

Cabe señalar la cantidad de ciclos carga/descarga que es capaz de proporcionar (se espera llegar a una cifra de entre 100.000 y 1.000.000 ciclos), así como también su eficiencia, la cual es de un 95% aproximadamente. Una de las grandes ventajas que tienen es que los tiempos de carga y descarga son muy breves, del orden de minutos o incluso segundos.

Todas estas características hacen que este tipo de dispositivos sean ampliamente aplicables en vehículos híbridos y eléctricos, en concreto, para el frenado regenerativo.

Lo más óptimo es emplear un sistema híbrido que combine las ventajas de cada dispositivo, es decir, usar un supercondensador que proporcione alta potencia específica y una batería, la cual proporcione alta energía específica. Esto se consigue mediante una configuración en paralelo.

De esta manera, cuando se demande poca potencia, la batería se podrá cargar mediante el supercondensador tal y como se muestra en la Figura 3-4.

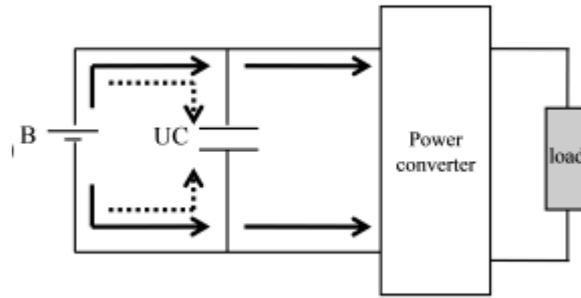


Figura 3-4. Caso demanda baja de potencia [7].

Por el otro lado, si hay alta demanda de potencia, ambos dispositivos contribuirán en la potencia total tal y como se muestra en la Figura 3-5.

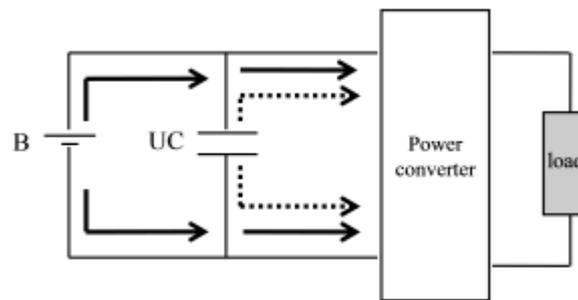


Figura 3-5. Caso demanda alta de potencia [7].

El futuro de este tipo de tecnología está en la integración de nanotubos o aerogeles de carbono con la finalidad de incrementar las cifras de densidad energética de los supercondensadores.

3.9.2 Frenado regenerativo

El frenado regenerativo es un sistema que transforma la energía cinética que se produce en las frenadas, en energía química. Este hecho se puede observar en la Figura 3-6.

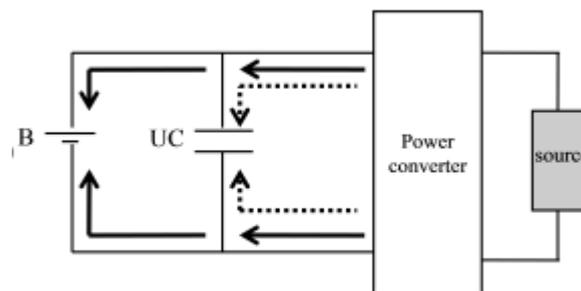


Figura 3-6. Frenado regenerativo [7].

Como se ha dicho anteriormente, lo esencial en este sistema es combinar las ventajas que proporcionan las baterías y los supercondensadores. Es decir, hacer uso de las baterías para almacenar la energía eléctrica producida y los supercondensadores para liberar esa energía rápidamente, ofreciendo una gran cantidad de potencia en poco tiempo. De esta manera, el sistema puede funcionar como motor, es decir, liberando energía, o como generador, almacenando electricidad. Asimismo, utilizar ambos en su conjunto mejora la vida útil del vehículo, su autonomía y su rendimiento.

Cabe destacar, que las baterías por sí solas no son capaces de captar toda la energía que se produce en las frenadas regenerativas. Por esta razón, el empleo de los supercondensadores es una herramienta potente para esta aplicación. Además, los vehículos eléctricos que disponen de este sistema también vienen integrados de frenos de fricción para alcanzar la detención completa del automóvil ya que, en la realidad, los frenos regenerativos tardan en desacelerar el vehículo y tienen limitaciones de potencia. Por esta razón es por lo que el sistema no es capaz de conseguir el 100% de la energía en las frenadas.

3.10 Comparaciones

A continuación, se comparan los distintos tipos de baterías para vehículos eléctricos, incluyendo las descritas anteriormente. Asimismo, vamos a analizar los aspectos clave de cada tipo de batería, como la eficiencia energética, la vida útil, el costo, la energía y potencia específicas.

Tabla 3-18. Comparativa entre los distintos tipos de baterías del estudio.

Tipo de batería	Energía específica (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Vida útil (ciclos)	Eficiencia (en %)	Coste estimado (€/kWh)
Pb-ácido	33-42	180	500-800	50-95	100-150
Ni-Cd	50	150	2000	70-90	250-350
Ni-MH	120	250-1000	300-500	66	300-500
LCO	100-250	150-250	1200	90	180-450
LFP	100	300	2000-3000	80-92	93,54-123,77
LTO	60-80	100-150	Más de 10.000	98	360-550
LiPo	130-200	100-300	1000	99,8	300
LSB	300-500	30-50	Más de 1000	90	En desarrollo
Nanocables de silicio	de 2000	500-1000	6000	85	En desarrollo
Zn-aire	1000	100	1000	70	100-120
Al-aire	1000-2000	200	2000	60	100-120
Li-aire	500	10.000 (teórica)	1200	70	En desarrollo
Na-S	130	100	1000	89-92	200-350
ZEBRA	90-120	150	2500-3000	90	360-730
Na-ion	100-160	150	3000	90-95	En desarrollo
VRFB	10-20	20-50	10.000	85	320-460
Mg	-	-	-	-	En desarrollo
Supercondensadores	30	10-20	-	95	137-275

Atendiendo a la Tabla 3-18, encontramos que las baterías más atractivas a nivel de energía y potencia específicas son las compuestas por nanocables de silicio y las metal-aire, es decir, las baterías Zn-aire, Al-aire y Li-aire. Sin embargo, si atendemos a la vida útil, las baterías LFP, LTO, las de nanocables de silicio, ZEBRA, Na-ion y las VRFB son las más convenientes. No obstante, las metal-aire también presentan cifras atractivas.

En cuanto a la eficiencia, las más llamativas son las de ión-litio (LCO, LFP, LTO), las de polímero de litio, las baterías LSB, las de nanocables de silicio, las sodio-azufre, ZEBRA, ion-sodio, VRFB y los supercondensadores.

Atendiendo al coste, las baterías más económicas actualmente son las plomo-ácido, las LFP, las de Zn-aire y las Al-aire.

Con todo esto, si hacemos un balance entre todas las características de la tabla, podemos observar que las baterías más convenientes son las de nanocables de silicio y las metal-aire. No obstante, actualmente las empresas automovilísticas suelen optar por las baterías de ión-litio debido a que son dispositivos que están comercializados en el mercado y son altamente eficientes, entre otras prestaciones.

Por otro lado, baterías que aún están en desarrollo y se espera mejorar sus prestaciones a corto plazo son las baterías Na-ion, Li-S, Mg y Li-aire, las cuales se prevé que son las baterías del futuro de la movilidad eléctrica.

4 ELECTRÓNICA DE POTENCIA

“Lo que conocemos es una gota, lo que no sabemos es un océano”.

- Isaac Newton -

En este capítulo vamos a realizar una comparativa entre los motores eléctricos más relevantes en la industria automovilística los cuales son: el motor de inducción, el motor de imanes permanentes y el motor síncrono de reluctancia. Además, se mostrarán las distintas configuraciones en las que nos podemos encontrar dispuesto el motor en un vehículo eléctrico.

Por otro lado, se presentarán los distintos tipos de convertidores de potencia que emplean estos automóviles para transformar la corriente alterna en continua y viceversa, junto con el funcionamiento de cada uno de ellos.

4.1 Motores eléctricos

Los motores eléctricos son una parte fundamental para el correcto funcionamiento de los vehículos eléctricos de batería, sobre todo para suministrar la potencia deseada. Entre ellos, actualmente los más usados son: el motor de inducción, el motor de imanes permanentes y el motor síncrono de reluctancia.

Los requisitos principales que debe cumplir un motor eléctrico son:

- Alta densidad energética
- Alta potencia a velocidades altas
- Par a velocidades bajas, para la aceleración
- Buen rendimiento
- Fácil control de la velocidad y par
- Bajas vibraciones y ruido

Además, se debe lograr un diseño lo más óptimo posible, de manera que el motor eléctrico genere la mayor electricidad admisible y que las baterías suministren la energía almacenada lo más eficientemente posible a las ruedas [7].

4.1.1 Funcionamiento

Los motores eléctricos son máquinas que transforman la energía eléctrica en mecánica, siendo algunos de ellos reversibles, es decir, que asimismo pueden convertir la energía mecánica en eléctrica funcionando como generadores. Además, pueden operar mediante corriente continua (empleando por ejemplo baterías o placas solares) o alterna (haciendo uso de la red o inversores de potencia).

Para explicar el principio de funcionamiento, cabe destacar el motor de corriente continua con escobillas del que derivan el resto de motores eléctricos.

Estos dispositivos están compuestos principalmente por un estator, elemento fijo, y un rotor, elemento móvil. El principio de funcionamiento se basa en los campos magnéticos que se generan en las bobinas de ambos elementos, gracias a la corriente que suministra la batería. De esta manera, el rotor gira en el interior del estator debido al par de fuerzas en sentido contrario que se producen en las espiras del rotor.

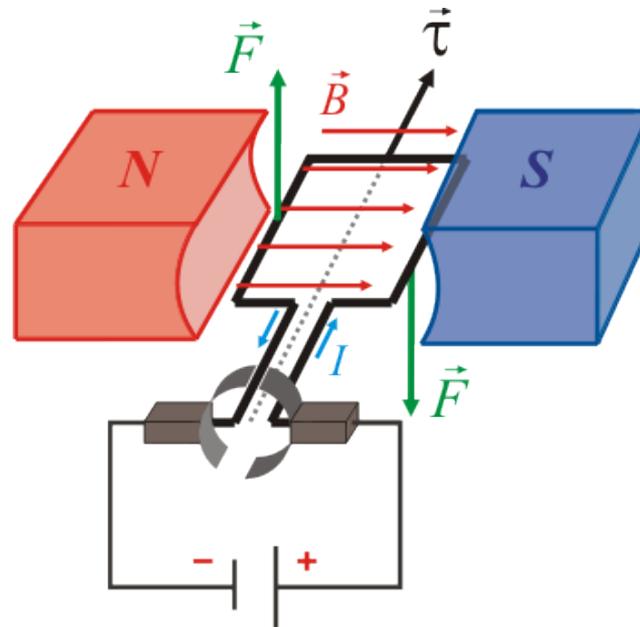


Figura 4-1. Principio de funcionamiento de un motor eléctrico [51].

4.1.2 Motor de inducción

El motor de inducción, también conocido como motor asíncrono, emplea corriente alterna y puede ser monofásico o trifásico.

Este tipo de motor se caracteriza por tener una velocidad de giro del rotor distinta que la del campo magnético del estator. Además, el devanado del rotor se encuentra aislado eléctricamente.

A continuación se muestran las ventajas e inconvenientes del mismo:

Tabla 4-1. Ventajas y desventajas del motor de inducción.

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia (85-97%)	Baja densidad de potencia y energía
Capaz de producir par motor constante	Riesgo de sobrecarga
Permite buen control de la velocidad	Par de arranque limitado
Alta fiabilidad	No es el motor más liviano
Bajas vibraciones	Pérdidas debido a las corrientes inducidas
Construcción sencilla	
Bajo coste	
Sin escobillas ni imanes permanentes	

4.1.3 Motor de imanes permanentes

El motor de imanes permanentes es un motor síncrono, el cual posee imanes permanentes tal y como manifiesta su nombre. Además, pueden emplear corriente continua o alterna.

Este tipo de motor suele utilizar imanes de neodimio ya que se caracterizan por su alta potencia, por tener una mayor durabilidad de campo magnético y son relativamente baratos en el mercado. No obstante, presentan la dificultad de encontrarlos en la naturaleza, así como también, su extracción.

Al ser un motor síncrono, el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético del estátor. Gracias a este fenómeno, permite controlar fácilmente el suministro de potencia.

Tabla 4-2. Ventajas y desventajas del motor de imanes permanentes.

Ventajas	Desventajas
Bajo peso	Necesita un mecanismo de arranque, sensor de posición y un regulador electrónico
Poco tamaño	Los imanes permanentes son caros y perjudiciales para el medio ambiente
Alto rendimiento (sobre todo a bajas velocidades)	
Alta densidad de potencia	
Permite buen control de la potencia	
Menor temperatura de operación	
Menores pérdidas que el motor de inducción	
Alta vida útil	

Actualmente, se están estudiando materiales como el bismuto de manganeso que no procedan de tierras raras, es decir, que no empleen elementos de la tabla periódica como el neodimio, el samario o el terbio en su composición. De esta manera, se podrá disponer de imanes permanentes que no sean difícil de encontrar en la naturaleza.

4.1.4 Motor síncrono de reluctancia

El motor síncrono de reluctancia emplea corriente alterna. La diferencia de este motor está en el rotor, ya que éste se compone de láminas eléctricas de metal apiladas. De esta manera, el rotor tiende a alinearse con el campo magnético del estator y a reducir la reluctancia del rotor-estator. Por lo tanto, el rotor no induce un campo magnético, lo que se traduce en pérdidas notablemente menores.

Tabla 4-3. Ventajas y desventajas del motor síncrono de reluctancia.

Ventajas	Desventajas
Barato de fabricar	Menor densidad de potencia que el motor de imanes permanentes
Seguros en caso de cortocircuito	Requiere sensor de posición
Resistente a altas temperaturas	Menor par que el de imanes permanentes
Menores pérdidas	Mayor ondulación del par
Permite buen control de la velocidad y del par	

4.1.5 Comparaciones y distintas configuraciones

Atendiendo a la Figura 4-2, se observan distintas características para los cuatro tipos de motores eléctricos mencionados, valoradas del 0 al 5, siendo este último el valor máximo.

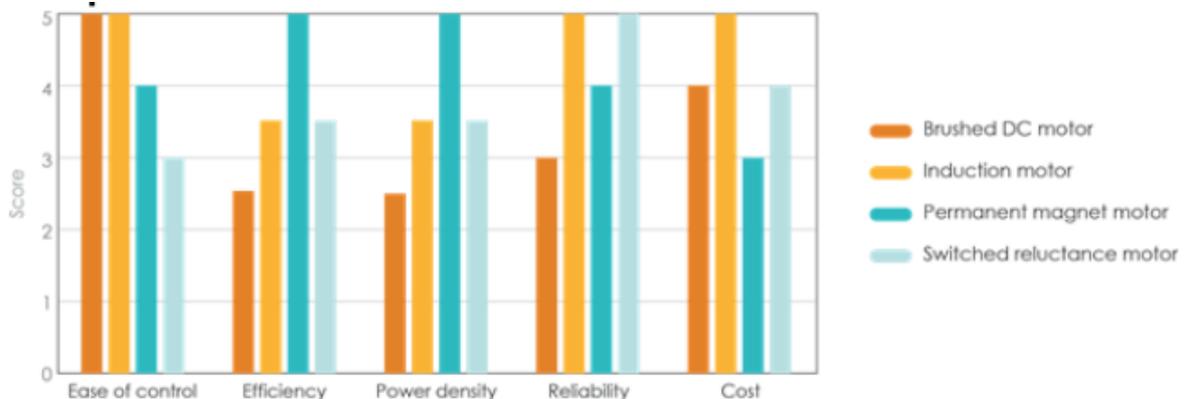


Figura 4-2. Comparativa entre los distintos tipos de motores eléctricos [7].

Haciendo una comparativa entre los distintos tipos de motores, se llega a la conclusión de que el motor que logra mejores prestaciones es el de imanes permanentes ya que consiguen mejores resultados en eficiencia y densidad de potencia. Además, permiten un buen control de la velocidad y no son los más caros.

No obstante, los motores síncronos de reluctancia son los que actualmente tienen mayor margen de mejora en cuanto a sus prestaciones. Por esta razón, son también buenos candidatos para emplearlos en un futuro no muy lejano.

Además, cabe señalar que actualmente los motores que se suelen usar son de corriente alterna y trifásicos debido a que las ondas senoidales que se generan son más suaves. Esto toma gran importancia en los automóviles eléctricos ya que se requiere cierto tiempo para incrementar o disminuir la fuerza [52].

Llegados a este punto la pregunta sería: ¿dónde situamos los motores en el vehículo?. Pues bien, las principales configuraciones que podemos encontrar en un vehículo son las siguientes:

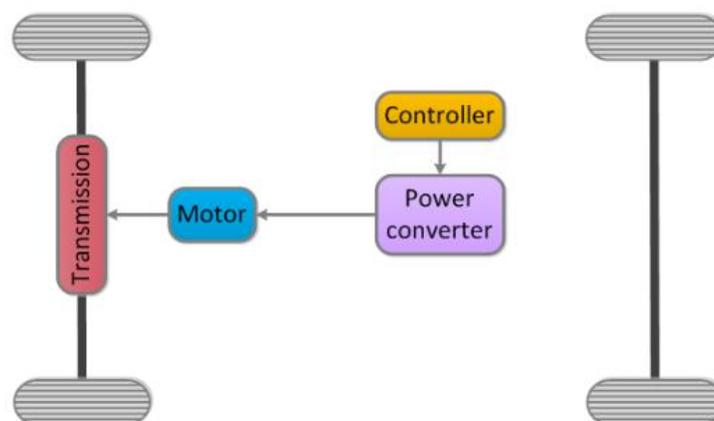


Figura 4-3. Motor único [7].

La configuración más básica es la de motor único, que como su nombre indica, se usa un solo motor, el cual se usa para propulsar el eje trasero de un vehículo o bien el delantero.

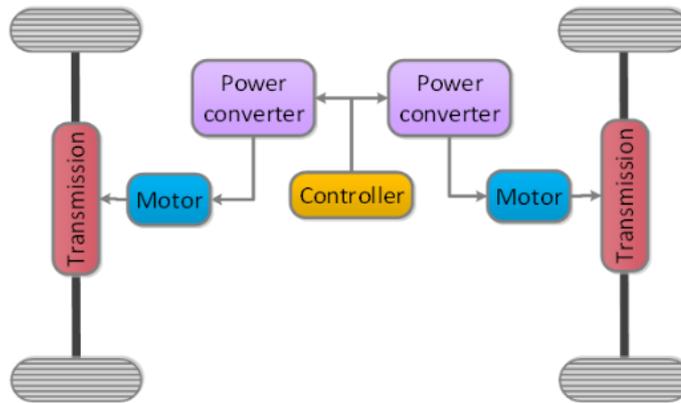


Figura 4-4. Motor dual [7].

La configuración de motor dual consta de dos motores eléctricos, los cuales se pueden disponer a su vez de dos maneras distintas. Una de ellas es usar cada motor para propulsar el eje trasero y el delantero respectivamente, tal y como se muestra en la Figura 4-4. La segunda forma es usar ambos motores para propulsar sólo uno de los ejes y así conseguir un par mucho mayor que en la configuración de motor único.

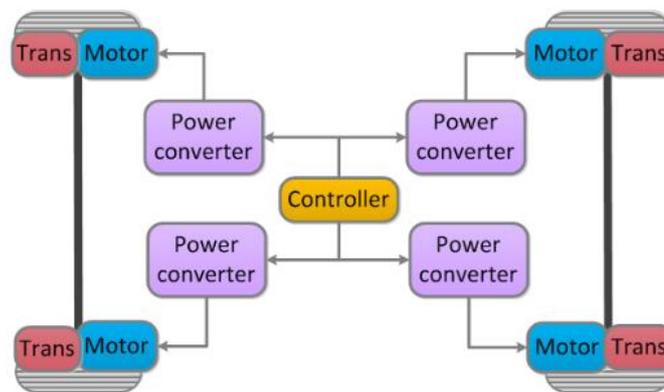


Figura 4-5. Motor en cada rueda [7].

La última posibilidad es disponer de un motor en cada rueda del vehículo y propulsar cada una de ellas de manera independiente. Tal y como se muestra en la Figura 4-5, esta configuración permite conectar asimismo transmisiones de engranajes en las ruedas. Si de lo contrario se decide prescindir de ellas, una ausencia de engranajes puede llegar a lograr eficiencias mayores de transmisión. No obstante, el sistema sería a su vez más complejo ya que sería más difícil controlar la velocidad y el par.

Como podemos observar, esta configuración requiere mayor número de convertidores de potencia, motores y transmisiones, lo que hace que el sistema sea más pesado en su conjunto y más costoso económicamente.

4.2 Convertidores de potencia

Como se ha expresado anteriormente, los motores eléctricos que más se emplean actualmente en la industria de la automoción son los motores de corriente alterna trifásicos ya que proporcionan mayor densidad de potencia y son los más eficientes, sobre todo los de imanes permanentes. No obstante, las baterías que disponen los vehículos para almacenar la energía entregan corriente continua, por lo que será necesario usar algún mecanismo que convierta la corriente alterna en continua. Estos elementos se denominan convertidores de potencia.

4.2.1 Tipos de convertidores y su uso en vehículos eléctricos

Los convertidores están compuestos por semiconductores de alta potencia capaces de transformar la magnitud de la tensión y la corriente que reciben. Algunos de los semiconductores más importantes son los MOSFETs y los IGBTs, que controlan la carga en los motores, solenoides y bobinas, entre otros, y los diodos, que se emplean para alterar la corriente alterna [7].

Los convertidores de potencia que existen son [53]:

- Convertidor CC-CC: modifican la tensión continua que reciben a otro valor mayor o menor también continua.
- Convertidor CC-CA o inversor: transforman la corriente continua en alterna (monofásica o trifásica).
- Convertidor CA-CC o rectificador: transforman la corriente alterna (monofásica o trifásica) en continua.
- Convertidor CA-CA: varían el valor eficaz de la corriente alterna que reciben y conservan la frecuencia de la misma.

Por seguridad, los inversores y los rectificadores llevan un aislamiento entre la batería y la red. No obstante, los convertidores CC-CC y los convertidores CA-CA no incluyen aislamiento.

A continuación, vamos a ver qué tipos de convertidores requiere cada tipo de vehículo eléctrico y para qué se usan.

Para un vehículo eléctrico de baterías (BEV), tal y como se muestra en la Figura 4-6, se requerirá un rectificador unidireccional para convertir la corriente alterna de la red eléctrica a corriente continua para almacenarla en las baterías, un convertidor CC-CC bidireccional para variar las tensiones continuas de valores mayores a menores y viceversa, y un inversor bidireccional para convertir la corriente alterna del motor en corriente continua. Además, se usa un convertidor CC-CC unidireccional auxiliar en el caso de que el vehículo disponga de una batería auxiliar. Esta batería se instala en algunos automóviles con la finalidad de suministrar potencia extra al vehículo en la conducción. Este valor extra oscila entre 12-48 V.

En concreto, el convertidor CC-CC bidireccional que se usa en estos vehículos tiene dos modos de funcionamiento como se muestra en la Figura 4-7: el modo buck para cargar las baterías en el que el motor actúa como un generador y el modo boost para entregar la energía almacenada en las aceleraciones en el que el motor actúa como impulsor.

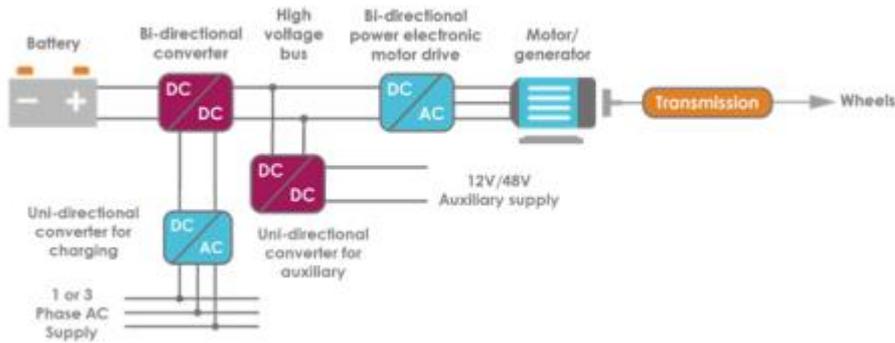


Figura 4-6. Convertidores existentes en un turismo eléctrico con baterías [7].

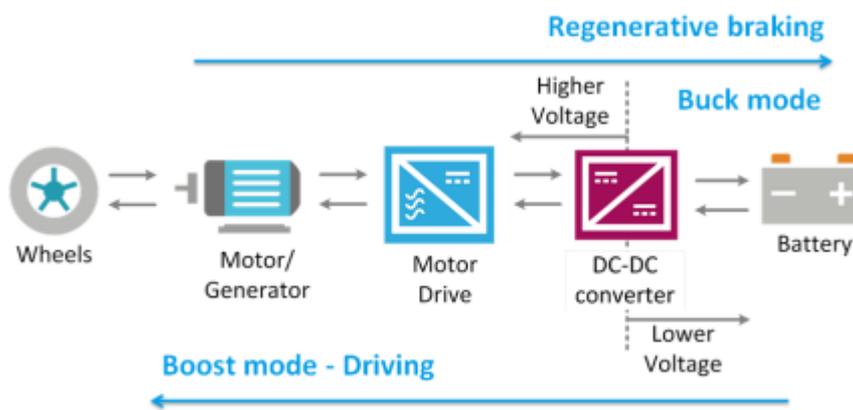


Figura 4-7. Convertidor CC-CC en modo buck y boost [7].

En cuanto a los vehículos híbridos, por lo general, se componen de baterías, un motor de combustión, un motor eléctrico, un generador, un convertidor CC-CC bidireccional y otro CC-CA también bidireccional, mismos convertidores que se usan en un camión eléctrico.

Por lo tanto, llegamos a la conclusión de que los convertidores de potencia que se emplean en los vehículos eléctricos son los CC-CC y los inversores, en concreto, trifásicos (ya que los motores eléctricos actualmente también lo son).

4.2.2 Convertidor Buck-Boost

Un convertidor buck-boost o elevador-reductor es un circuito electrónico que, como se ha explicado anteriormente, es capaz de variar una tensión continua de un valor dado a otro mayor o menor también de corriente continua.

En concreto, se encarga de aumentar la tensión proveniente de la batería para poder circular por el bus de alto voltaje cuando actúa en modo boost (para propulsar el automóvil). Por el otro lado, se encarga de disminuir la tensión procedente del bus para introducirla en la batería cuando actúa en modo buck (en el frenado regenerativo). Estas conversiones se realizan gracias al controlador, es decir, los pedales de acelerador y freno, los cuales accionan los distintos modos de funcionamiento [7].

A continuación, podemos observar el circuito electrónico completo que se suele usar en los vehículos actualmente, incluyendo la batería y los supercondensadores:

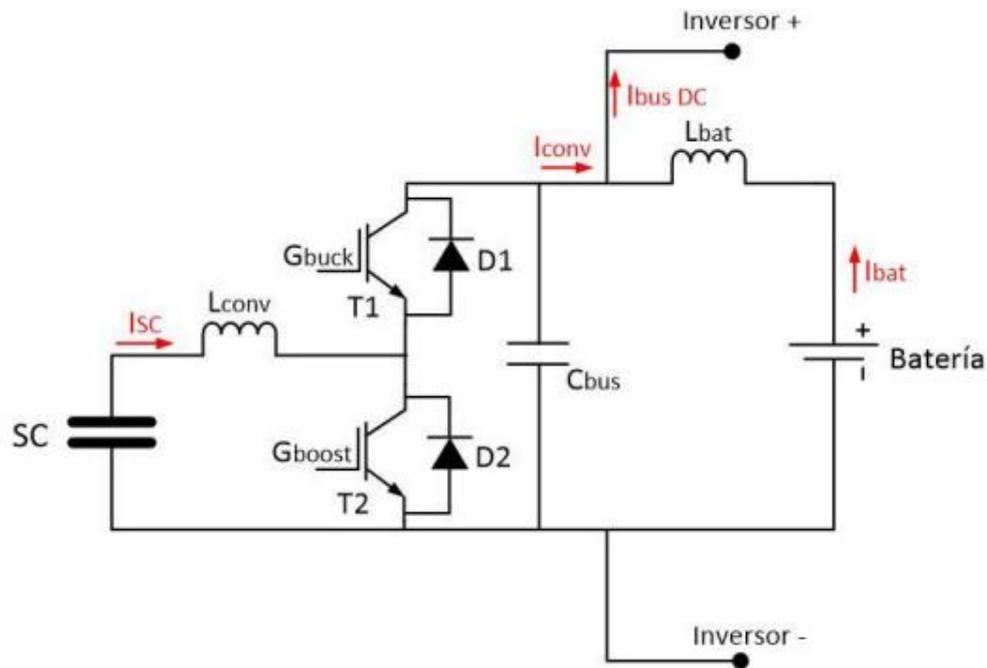


Figura 4-6. Convertidor DC/DC bidireccional conectado con la batería y los supercondensadores [53].

Atendiendo a la Figura 4-12, la finalidad del convertidor va a ser controlar la corriente correspondiente al supercondensador. De esta manera, cuando el automóvil acelera y actúa por consecuente en modo boost, “el transistor T2 se pone en conmutación y la bobina del convertidor se descarga por el diodo D1. T1 permanece en corte y D2 se mantiene bloqueado” [53]. En el caso contrario, en las frenadas y por consecuente en modo buck, el sentido de la corriente se invierte, entrando en acción el transistor T1 y el diodo D2. De esta manera, tanto la batería como el supercondensador se estarían cargando.

Además, podemos observar una bobina en serie con la batería y el supercondensador. Estos elementos se integran en el circuito con el objetivo de atenuar los pulsos de la corriente que circula.

4.2.3 Inversor trifásico

Un inversor es un dispositivo electrónico bidireccional cuya finalidad es convertir la corriente continua en alterna. En el caso de los automóviles eléctricos, se emplean para transformar la corriente continua procedente del bus de alto voltaje a corriente alterna para poder entregarla al motor eléctrico. Asimismo, los inversores pueden controlar la velocidad y el par de los motores eléctricos mediante la modulación de la anchura de pulso (PWM), es decir, ajustando la duración de los pulsos de la corriente suministrados al motor.

Otra función que tienen estos dispositivos es la de convertir la corriente eléctrica procedente del frenado regenerativo para poder almacenarla en las baterías y los supercondensadores.

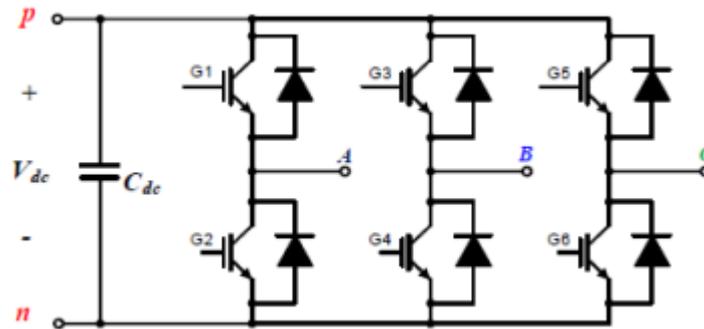


Figura 4-7. Inversor trifásico 3B3W [53].

El inversor trifásico más usado en vehículos es el de topología 3B3W el cual se compone de tres ramificaciones en la que cada una de ellas se dispone de dos transistores y dos diodos en antiparalelo. Además, se incluye un condensador para atenuar el rizado que se produce en el bus de alto voltaje [53].

Cabe destacar que, actualmente se han logrado crear inversores de hasta 800 V los cuales ayudan a alcanzar una carga ultrarrápida. Esto se ha conseguido gracias al empleo de un cableado de carburo de silicio más fino. De esta manera, se generaban menores pérdidas efecto Joule y cabía la posibilidad de disminuir el tamaño y el peso del sistema. “En la práctica, un sistema de 800 V permite recargas del 80% en sólo 20 minutos” [52].

Hoy en día, ya están en el mercado, en concreto, en coches como Porsche, Hyundai Ioniq 5 y Kia EV6, entre otros.

4.2.4 Rectificador

El rectificador en un vehículo eléctrico se encuentra en el sistema de carga, el cual es responsable de convertir la corriente alterna de la red eléctrica o de un cargador externo en corriente continua. Los rectificadores más comunes son el rectificador de onda completa, el rectificador en puente y el rectificador trifásico.

El rectificador de onda completa se compone de cuatro diodos, en el que dos diodos permiten que la corriente fluya en un sentido, mientras que los otros dos diodos la bloquean en sentido contrario.

El rectificador en puente emplea cuatro diodos que permiten que la corriente fluya en un solo sentido.

Por último, un rectificador trifásico de onda completa emplea seis diodos, dos por cada fase. Estos diodos están dispuestos en un puente de diodos tal y como se muestra en la Figura 4-9. En esta configuración, los diodos están conectados en serie, de manera que se permite el paso de la corriente en un sentido y se bloquea en el opuesto. Este hecho provoca que a salida del rectificador la corriente continua tenga una forma de onda pulsante. Además, la frecuencia de este tipo de onda a la salida es el doble de la frecuencia de la corriente alterna de entrada, es decir, que si la frecuencia de entrada es de 60 Hz, la de la onda pulsante sería de 120 Hz.

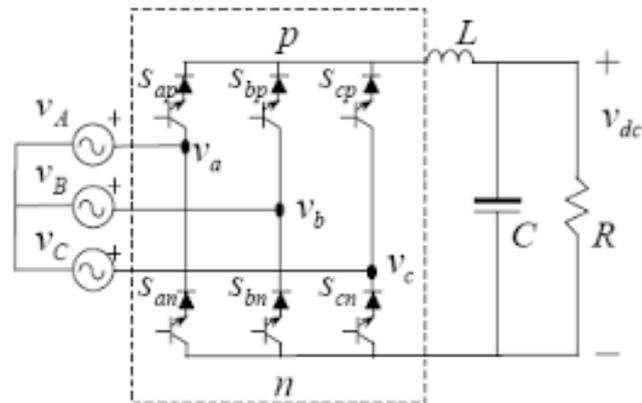


Figura 4-8. Rectificador trifásico de onda completa [54].

Con la finalidad de suavizar la onda pulsante a la salida y reducir el rizado de la corriente, se integra en el sistema un filtro de capacitores dispuestos en paralelo a la carga.

En cuanto a la eficiencia de estos dispositivos, es clave llegar a obtener un rendimiento alto para que se pierda la mínima energía en forma de calor durante el proceso. Actualmente, la eficiencia ronda en torno al 95% y 98%.

5 CARGA

“Nada es demasiado maravilloso para ser cierto si obedece a las leyes de la naturaleza”.

- Michael Faraday -

Los tipos de carga que se usan actualmente son: la carga conductiva (de CA y CC), la carga por inducción (estática y dinámica) y el intercambio de baterías. Además, los cargadores existentes pueden ser internos, es decir, cargadores a bordo de los vehículos, o externos.

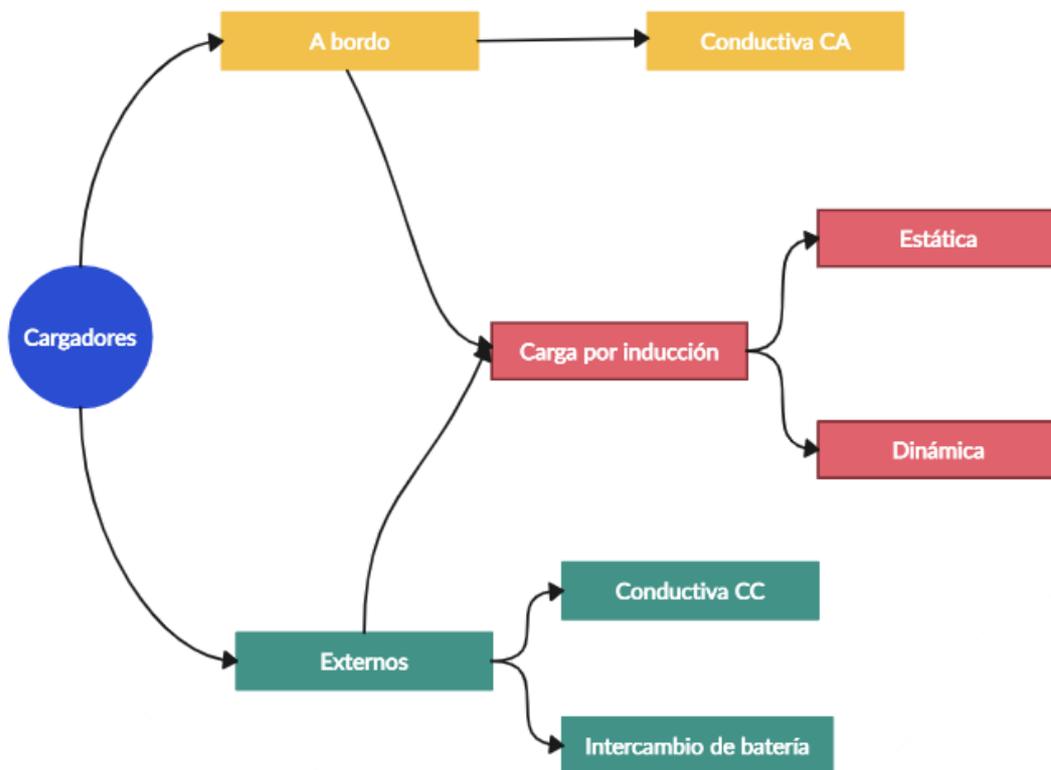


Figura 5-1. Clasificación de los tipos de carga actuales según el tipo de cargador.

Cabe destacar que la potencia de los cargadores a bordo está limitada por el peso y el espacio que ocupan éstos dentro del vehículo. En cambio, los cargadores externos son más flexibles en cuanto a su potencia.

5.1 Carga conductiva

Este método de carga es el más común actualmente. Existen dos tipos a su vez, carga de corriente alterna y carga de corriente continua. La diferencia entre ambas reside en el lugar en el que se lleva a cabo la conversión de la corriente alterna ya que, tal y como se ha dicho anteriormente, la red eléctrica es de este tipo. Por lo tanto, en carga de CA la conversión se realiza dentro del vehículo en el cargador a bordo (convertidor de CA a CC) mientras que en carga de CC tiene lugar fuera del mismo.

5.1.1 CA

La carga de CA es el tipo de carga conductiva más usada actualmente ya que permite cargar un vehículo directamente haciendo empleo de la red eléctrica de cualquier hogar, trabajo o estación apta para ello. De esta manera, haciendo uso de un cable de carga, la conversión de corriente alterna en continua se lleva a cabo en el cargador a bordo del vehículo, que no deja de ser un rectificador trifásico. Cabe destacar que los vehículos tienen una entrada estandarizada (conector), por lo que el cargador tendrá que tener la misma forma de la boca de entrada.

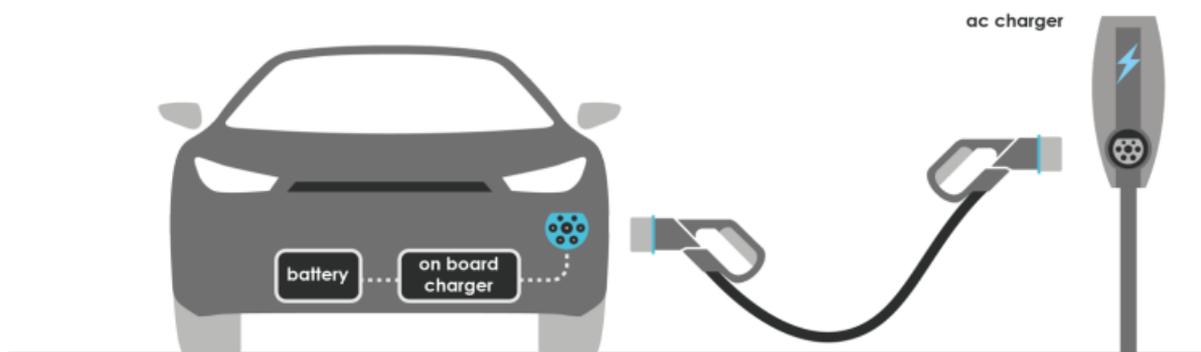


Figura 5-2. Método de carga conductiva de CA [7].

Funcionamiento

Para explicar más en profundidad el funcionamiento del proceso de carga, nos centraremos en la Figura 5-3 [7].

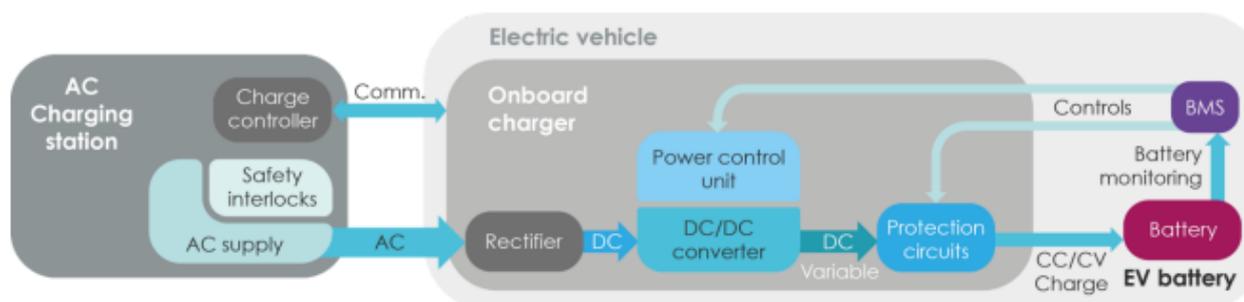


Figura 5-3. Funcionamiento de un cargador de CA [7].

1°. Se conectan el vehículo y la estación mediante el cable de carga con sus tomas estandarizadas correspondientes. A continuación, el controlador de carga de la estación se comunica con el vehículo de manera que da información acerca de ciertos parámetros, posibles fallos, entre otros.

2°. La red eléctrica circula hasta el rectificador y transforma la corriente alterna en continua.

3°. Entra en juego la unidad de control de potencia que se encarga de alterar la intensidad y la tensión de la corriente continua en el convertidor CC-CC, en función de la información que le llega del sistema de gestión de baterías (BMS). Esta energía se entrega posteriormente a la batería.

4°. Entre el convertidor de CC-CC y la batería se dispone de un circuito de protección que entra en acción aislando la batería si se exceden los límites de funcionamiento.

Tipos de conectores

En la industria, existen varios tipos de conectores de CA dependiendo del país en el que sean empleados debido a que la frecuencia y la tensión de corriente alterna varía en función del territorio en el que nos encontremos. Por esta razón, no se ha establecido un conector común para todos los automóviles eléctricos. Los conectores más comunes son:

- **Tipo 1 (cargador Yazaki):** Para Estados Unidos y Japón. En concreto, se usa para carga monofásica. Se compone de cinco clavijas, de las cuales dos se usan para llevar la corriente, otras dos para asegurar la correcta conexión (piloto de proximidad) y para controlar la carga (control piloto) y la última para la toma a tierra. Permite un voltaje máximo de 120 V o 240 V y una corriente nominal de hasta 80 A (potencia de salida de 9,6-19,2 kW) [7].



Figura 5-4. Conector tipo 1 [7].

- **Tipo 2 (cargador Mennekes):** Para Europa. Se emplea tanto para carga monofásica como trifásica. Este conector se compone de siete clavijas, dos más pequeñas para el piloto de proximidad y el control piloto, y de las cinco restantes, tres son para las fases de línea de la corriente, una neutral y la última para la toma a tierra. Permite un voltaje de 230 V y hasta 80 A de intensidad en monofásica (potencia de salida de 18,4 kW), mientras que en trifásica tiene valores de 400 V y una corriente nominal de hasta 63 A (potencia de salida de 25,2 kW) [7].

China tiene su propio conector, el cual es parecido a este tipo.



Figura 5-5. Conector tipo 2 [7].

- **Conector Tesla:** Para su uso en los propios vehículos de la marca en Estados Unidos. Sirve tanto para carga de CA como de CC, haciendo uso de un adaptador.

Este conector se compone de cinco clavijas, dos más pequeñas para el control piloto y el piloto de proximidad, y las tres restantes para el neutral, toma a tierra y fase de línea de la corriente.

Ofrece una potencia máxima de carga de 17,2 kW [7].

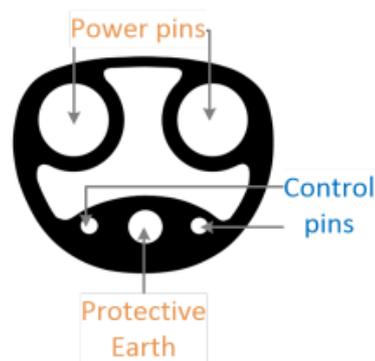


Figura 5-6. Conector de Tesla en EEUU [7].

Tabla 5-1. Ventajas y desventajas de la carga conductiva de CA.

Ventajas	Desventajas
La batería se puede cargar en cualquier lugar haciendo uso de la red	Potencia de salida limitada
Menor coste	Necesita mayor tiempo de carga (porque la potencia de carga es baja)
	No todos los vehículos son compatibles con la carga de CA

5.1.2 CC

La carga de corriente continua proporciona mayor potencia de carga (lo que depende de la capacidad de almacenamiento de las baterías), pudiendo cargar los vehículos en menor tiempo comparado con la carga de corriente alterna. Además, los cargadores de CC son externos, por lo que no ocupan espacio dentro del mismo, lo que se traduce en un menor peso del automóvil.

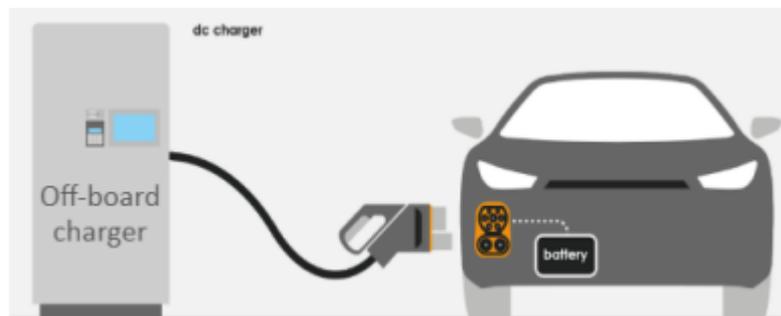


Figura 5-7. Método de carga conductiva de CC [7].

Funcionamiento

En la Figura 5-8, podemos observar el funcionamiento de este tipo de carga.

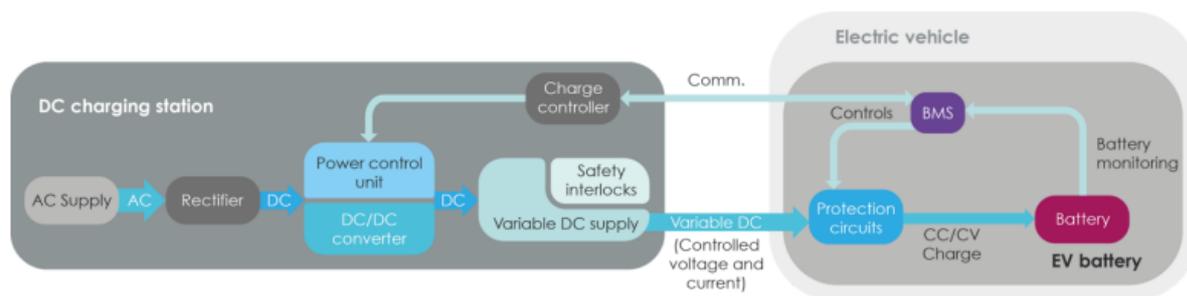


Figura 5-8. Funcionamiento de un cargador de CC [7].

1º. Se convierte la corriente alterna en continua en el rectificador de la estación.

2º. La unidad de control manipula la tensión y la corriente que se entrega posteriormente a la batería, según la información que le llega del sistema de gestión de baterías.

3º. Se entrega posteriormente la energía a la batería.

4º. Entre el convertidor de CC-CC y la batería se dispone de circuitos de protección y de sistemas de bloqueo, los cuales entran en acción aislando la batería si se exceden los límites de funcionamiento.

Tipos de conectores

Al igual que los conectores de corriente alterna, los de corriente continua también dependen del país de origen. Los conectores más comunes son:

- **CCS-combo 1:** Este tipo de conector se usa en Estados Unidos y es una derivación del conector de CA tipo 1. La parte superior del conector es el mismo que el que se usa para corriente alterna mientras que la parte inferior del mismo se usa para corriente continua. Además, puede proporcionar una potencia de salida de hasta 350 kW.

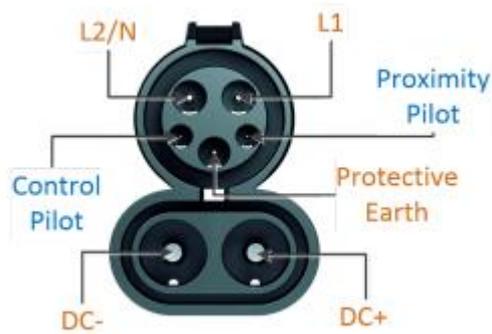


Figura 5-9. Conector CCS-combo 1 [7].

- **CCS-combo 2:** Se utiliza en Europa y es una derivación del conector de CA tipo 2. La parte superior del conector es el mismo que el que se usa para corriente alterna mientras que la parte inferior del mismo se usa para corriente continua. Al igual que el conector CCS-combo 1, puede llegar a otorgar hasta 350 kW de potencia de salida.



Figura 5-10. Conector CCS-combo 2 [7].

- **Chademo:** Tiene empleo a nivel mundial en automóviles japoneses. Puede llegar a proporcionar 200 kW de potencia, aunque se espera doblar la cifra.

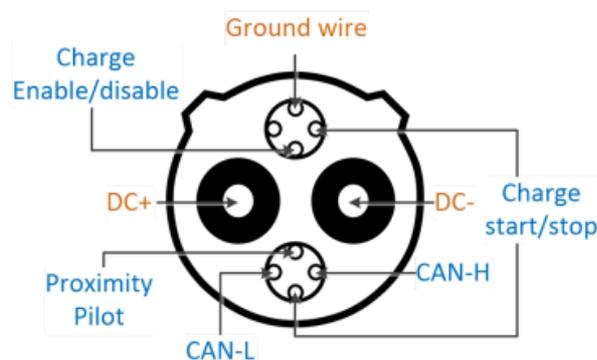


Figura 5-11. Conector Chademo [7].

- **Conector CC de Tesla:** Este conector también se usa en corriente alterna. Puede proporcionar hasta 120 kW de potencia de carga para CC.
- **Conector CC de China:** Los conectores de CC fabricados en China son capaces de otorgar hasta 187,5 y 250 kW de potencia para la carga actualmente.

Tabla 5-2. Ventajas y desventajas de la carga conductiva de CC.

Ventajas	Desventajas
Se puede diseñar tanto para carga a alta potencia como baja	Mayor inversión inicial de los cargadores frente a los de CA
El tiempo de carga es menor que en CA	No todos los vehículos son compatibles con la carga de CC
Carga más eficiente que la carga de CA	
Mayor autonomía	

5.2 Carga por inducción

La carga inalámbrica puede llevarse a cabo de manera estática o dinámica. Los métodos más usados son por inducción que se basan principalmente en dos principios: el principio de inducción magnética y las leyes de Lenz-Faraday. De esta manera, usando dos o más bobinas acopladas junto con una corriente alterna se consigue generar un campo magnético que induce una corriente eléctrica que, convirtiéndola en corriente continua puede cargar las baterías de un vehículo.

5.2.1 Estática

Los primeros sistemas existentes de carga inalámbrica eran de inducción estáticos. El principio de funcionamiento de este sistema de carga consiste en el magnetismo que se produce entre dos bobinas, una primaria y otra secundaria. Observando la Figura 5-13, mientras que el vehículo está estacionado, la bobina primaria se sitúa en el suelo conectada a la red y la bobina secundaria se encuentra en la parte inferior del vehículo. La corriente alterna de la red eléctrica se convertirá mediante un rectificador en corriente continua y, a su vez, ésta se convertirá en corriente alterna de alta potencia en el cargador a bordo de la estación de carga. Tras esto, se transmite la frecuencia por inducción de la bobina primaria a la secundaria y, por último, se transforma la corriente alterna en continua dentro del vehículo para ser almacenada en la batería [7]. Además, este método de carga consta de un sistema de comunicación mediante el cual se monitoriza la cantidad de energía que se transmite y el nivel de carga.

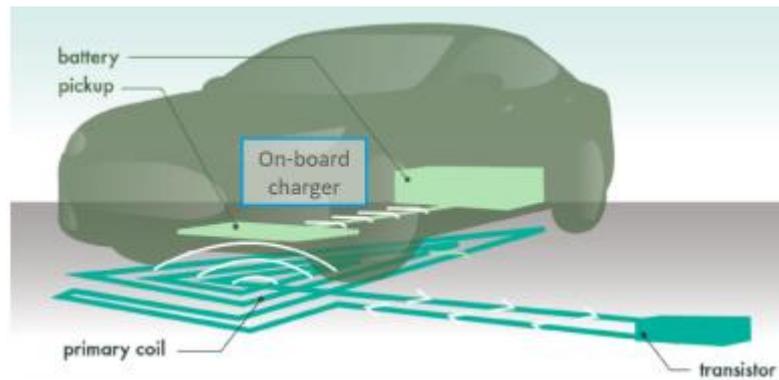


Figura 5-12. Sistema de carga por inducción estática [7].

Esta tecnología permite ubicar el sistema de carga en un lugar concreto y cargar el vehículo automáticamente sin necesidad de la intervención del propietario del mismo. No obstante, hay que tener en cuenta el correcto diseño de los componentes ya que una incorrecta distancia u orientación de las bobinas puede afectar negativamente a la eficiencia y carga del automóvil.

Tabla 5-3. Ventajas y desventajas de la carga por inducción estática.

Ventajas	Desventajas
Adecuado para automóviles autónomos	Elevada inversión inicial
Mayor vida útil de las baterías	Peso y espacio limitado
Comodidad (no se requieren cables)	Exposición a la radiación electromagnética
Reducción de costes a largo plazo	Pérdidas de potencia
Fácil de emplear	Eficiencia algo menor que la carga conductiva
Apto para cualquier situación climatológica	No se puede hacer uso del vehículo mientras que se está cargando, por lo tanto, condiciona la autonomía
	El diseño del sistema debe ser preciso para que la eficiencia sea óptima y adecuada

5.2.2 Dinámica

La carga por inducción dinámica es similar al método anterior, con la principal diferencia que consiste en que la carga se lleva a cabo mientras que el automóvil está en circulación. Al igual que el sistema estático, el vehículo se cargará por electromagnetismo pero en vez de emplear una sola bobina primaria se requieren varias de ellas dispuestas a lo largo de la carretera para lograr una carga continua en un trayecto determinado.

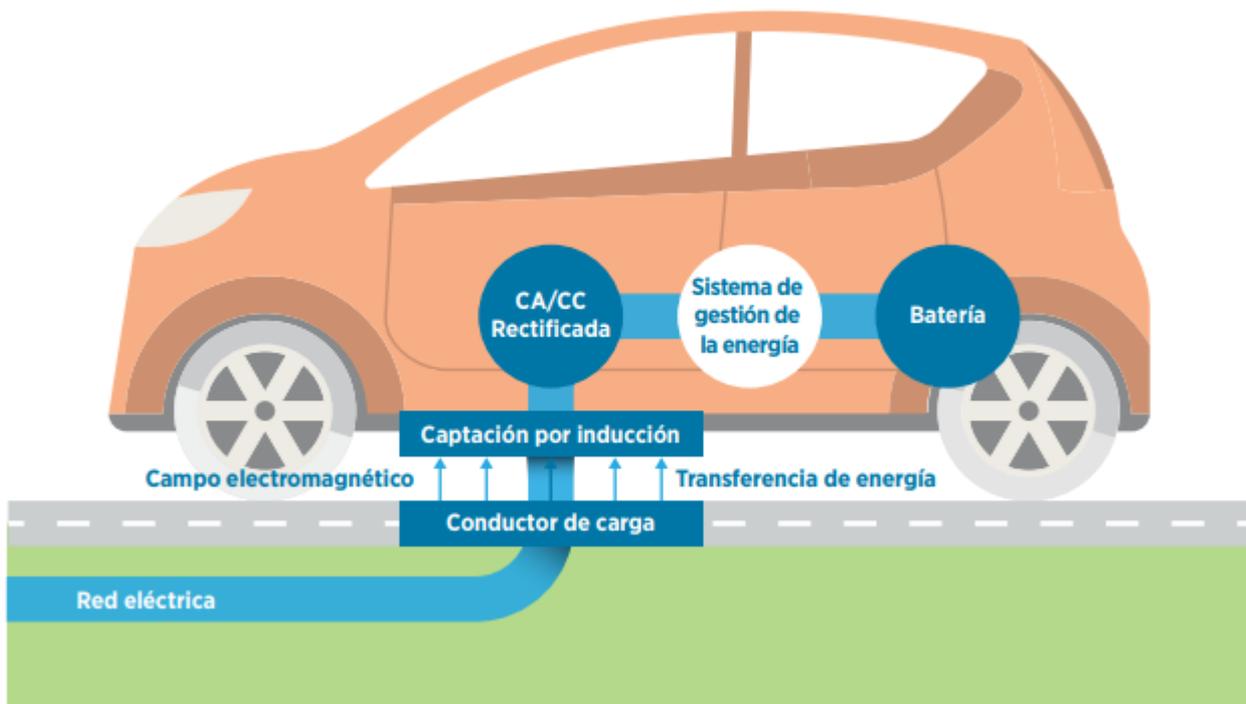


Figura 5-13. Sistema de carga por inducción dinámica [55].

Cuando el vehículo se desplaza a lo largo de las bobinas de la carretera, éstas entran en acción a una determinada frecuencia y generan un campo magnético, induciendo una corriente en la bobina del automóvil. Esta corriente alterna se transforma en continua y se carga la batería. Al igual que en un sistema estático por inducción, se dispone de un sistema de comunicación que monitoriza el nivel de carga, para detener el flujo de energía cuando el nivel se encuentre en el máximo.

Cabe destacar que uno de los mayores inconvenientes que tiene este método es que un mal alineamiento (por ejemplo, en un cambio de carril) afecta negativamente a la potencia y a la eficiencia de la transmisión de carga. Por ello, estos sistemas conllevan mayores pérdidas que los métodos de carga conductiva.

Tabla 5-4. Ventajas y desventajas de la carga por inducción dinámica.

Ventajas	Desventajas
Tiempo de carga bajo	Elevada inversión
Baja profundidad de descarga (DOD)	La distancia entre las bobinas es mayor que en carga estática, por lo que se necesita mayor potencia para obtener un mismo voltaje en la bobina secundaria
Menor tamaño de batería	Un mal alineamiento afecta negativamente al sistema
Menor peso	Eficiencia de transferencia de energía baja
Menor desgaste de los componentes del vehículo	Necesidad de una infraestructura en la carretera para llevar a cabo la carga dinámica
Mayor seguridad de carga	
Fácil de emplear	
Apto para cualquier situación climatológica	
Carga automática	

5.3 Intercambio de batería

Esta tecnología consiste en intercambiar una batería agotada por una nueva en cuestión de muy pocos minutos. De esta manera, las descargadas podrán volver a cargarse en la estación correspondiente y poder emplearse de nuevo en otros vehículos.

Una de las características fundamentales de este tipo de carga es la capacidad de poder identificar los vehículos en las estaciones de carga y realizar el intercambio de batería automáticamente. Asimismo, se debe controlar el estado de las baterías.

Actualmente, se estima que el coste de este tipo de tecnología es más caro que otros sistemas de carga debido principalmente al coste de la infraestructura y las baterías, aunque actualmente se está investigando la manera de paliar este inconveniente.

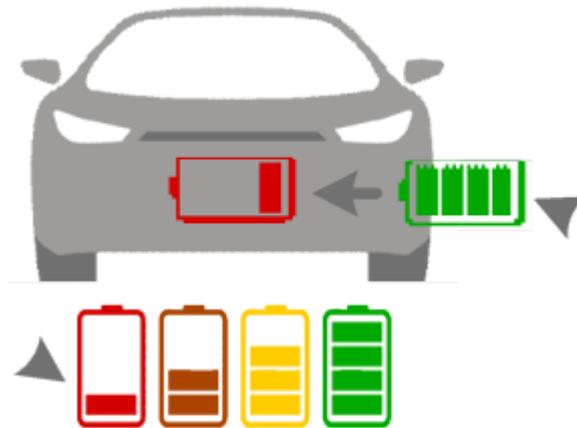


Figura 5-14. Tecnología de intercambio de batería [7].

Tabla 5-5. Ventajas y desventajas del intercambio de batería.

Ventajas	Desventajas
Recarga fácil y rápida (entre 5 y 10 minutos)	Mayor coste
Mayor autonomía	Necesidad de estandarización
Menores repercusiones medioambientales	Hay que contabilizar el nivel de carga de la batería en todo momento
Flexibilidad en el tiempo de carga	
Posibilidad de hacer uso de energías renovables para cargar las baterías	

5.4 Carga inteligente

La carga inteligente es una tecnología reciente que consiste en una serie de funcionalidades con el fin de controlar la carga en los vehículos eléctricos. De esta manera, se hace uso de sensores y sistemas de control mediante los cuales se ajustan la velocidad y el nivel de carga de la batería en función de la temperatura de la misma, de los requisitos del propietario para la conducción, de la demanda de la red eléctrica, etc.

Asimismo, este método proporciona la posibilidad de cargar el vehículo en tramos horarios en los que la demanda de energía es menor, pudiendo detenerse automáticamente si se detecta que la red está sobrecargada. Además, permite tiempos de carga mucho menores comparado con otras tecnologías convencionales, mayor flexibilidad y comodidad.

Una de las novedades que está en desarrollo actualmente es la tecnología V2X, la cual es un sistema de carga bidireccional que consiste en emplear la energía almacenada en las baterías de los vehículos para proveer electricidad a la red eléctrica y viceversa. De esta manera, se pretende estabilizar la red y reducir la demanda de energía en momentos de alta demanda. Este sistema se extiende tanto a los hogares (V2H, vehículo-hogar), como a los edificios (V2B, vehículo-edificio), cargas (V2L, vehículo-carga) y red eléctrica (V2G, vehículo-red), entre otros.

Una de las grandes ventajas que permite esta tecnología es emplear energías renovables con la finalidad de disminuir las emisiones de gases nocivos al mínimo. De este modo, una de las estrategias futuras más llamativas

sería cargar los automóviles cuando se esté generando energía renovable en exceso (por ejemplo con placas fotovoltaicas) y abastecer a la red por la noche cuando haya mayor demanda de la misma (generando ingresos al propietario del vehículo). Además, posibilita hacer uso de la red en los tramos más económicos o de baja demanda y reducirse o incluso detener la carga en los tramos más costosos.

Todo esto conduce a optimizar el uso de la red eléctrica, disminuyendo los costes y mejorando notablemente la eficiencia de carga. No obstante, aún no se ha conseguido estandarizar el sistema de carga y una de las desventajas más evidentes es que puede llegar a haber una sobrecarga de la red si una gran cantidad de vehículos están haciendo uso de la misma simultáneamente.

5.5 Comparativa entre los distintos métodos de carga

Existen diferentes métodos de carga para vehículos eléctricos, cada uno con sus propias ventajas y desventajas en términos de tiempo de carga, eficiencia y costo, entre otros. En esta comparativa se analizarán y compararán los principales métodos de carga disponibles actualmente, incluyendo los citados anteriormente.

Battery powering methods	Conductive charge		Inductive charge		Battery swap
	AC	DC	Static	Dynamic	
Convenience	☹	☹	☹☹	☹☹☹	☹☹
Cost	€	€€	€€ ~ €€€	€€€€€€	€
Service time	Relatively long	Very short	Relatively long	Very flexible	Shortest
Power level	///	///	/// ~ ///	/// ~ ///	/// ~ ///
Efficiency	☹☹☹☹	☹☹☹	☹☹	☹	☹☹☹☹
Battery lifetime	☹☹☹	☹☹	☹☹☹	☹☹☹☹☹	☹
Impact on grid	■ ~ ■■	■■■■	■■	■■ ~ ■■■	■■■
Standardization challenge	ⓘ	ⓘ	ⓘⓘ	ⓘⓘⓘⓘ	ⓘⓘⓘ

Figura 5-15. Comparativa de los distintos métodos de carga [7].

Atendiendo a la Figura 5-15, la carga inductiva dinámica es el método de carga más conveniente, no obstante, es el más caro. Asimismo, a pesar de que la carga estática por inducción es menos costosa frente a la dinámica, estos métodos de carga suponen un mayor coste frente a los demás.

Otra de las grandes ventajas que posee la carga por inducción dinámica es su larga vida útil y su gran flexibilidad, ya que es un sistema que se carga continuamente en la conducción y no requiere realizar paradas en ningún punto de servicio.

En cuanto al tiempo de carga, el método más rápido es el de intercambio de batería ya que simplemente consiste en cambiar una batería descargada por una cargada, frente a la carga de corriente alterna y la carga de inducción estática que son las más lentas.

Si nos fijamos en la eficiencia, los métodos más convenientes son el de intercambio de batería y el de carga de corriente alterna. Sin embargo, la carga por inducción dinámica es la menos eficiente debido al mal alineamiento, orientación y posición de las bobinas.

Atendiendo a la relación eficiencia-capacidad de potencia, la carga de corriente continua es la más llamativa, no obstante, al tener un nivel de potencia más alto supone una menor vida útil y un mayor impacto en la red eléctrica.

Por último, uno de los mayores inconvenientes de los sistemas de carga actualmente es la necesidad de estandarizar los cargadores para poder ser empleados en todos los vehículos eléctricos. Como podemos observar, la carga por inducción dinámica y la tecnología de intercambio de batería son los métodos que hoy en día no se ha llegado a una estandarización global.

Como conclusión, el método más usado hoy en día es el de carga de corriente alterna debido a su bajo coste, alta eficiencia, larga vida útil, estandarización y bajo impacto en la red. No obstante, se necesita un período de tiempo relativamente elevado para cargar el vehículo. Por esta razón, una de las grandes alternativas que se están estudiando actualmente es el empleo de la carga por inducción dinámica, la cual es mucho más conveniente, flexible y otorga una elevada vida útil. Por ello, de aquí en adelante el estudio se va a centrar en la carga por inducción o inalámbrica.

6 CARGA INALÁMBRICA

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”.

- Albert Einstein -

La creciente necesidad de la sociedad por encontrar un sistema de carga eficiente, sostenible, conveniente y con tiempos bajos de carga, ha llevado a los científicos e ingenieros a plantearse el potencial que posee el empleo de la carga inalámbrica durante las últimas décadas.

La carga inalámbrica supone la transferencia de energía eléctrica desde una fuente de alimentación a un dispositivo eléctrico sin cables a través de la inducción electromagnética, de ahí su gran atractivo en el sector automovilístico.

Se espera que los ingresos totales del mercado de carga inalámbrica alcancen los 71,213 mil millones de dólares para 2025, frente a los 5,2 millones que se obtuvieron en 2017, según un estudio titulado "Wireless Charging Market by Technology & Industry Vertical - Forecast to 2025", creciendo una media del 38,7% desde ese año hasta el mencionado 2025. [56]

A pesar de que la transferencia de energía inalámbrica posee grandes ventajas como la automatización de la carga, la ausencia de cableado y la carga durante la conducción, aún existen varias complicaciones en este método. Por ejemplo, la carga inalámbrica por lo general es menos eficiente que la carga conductiva y su adopción es compleja porque todavía no existe un estándar universal (aunque SAE, IEEE y CENELEC están cada vez más cerca una estandarización).

No obstante, no cabe duda de que este sistema supone una revolución para la industria del transporte implicando significativos cambios en la movilidad sostenible.

6.1 Tipos de carga inalámbrica

Si nos internamos dentro de la carga inalámbrica estática y dinámica, podemos encontrar una clasificación más exhaustiva diferenciando entre la transmisión inalámbrica por medio de un campo cercano o lejano.

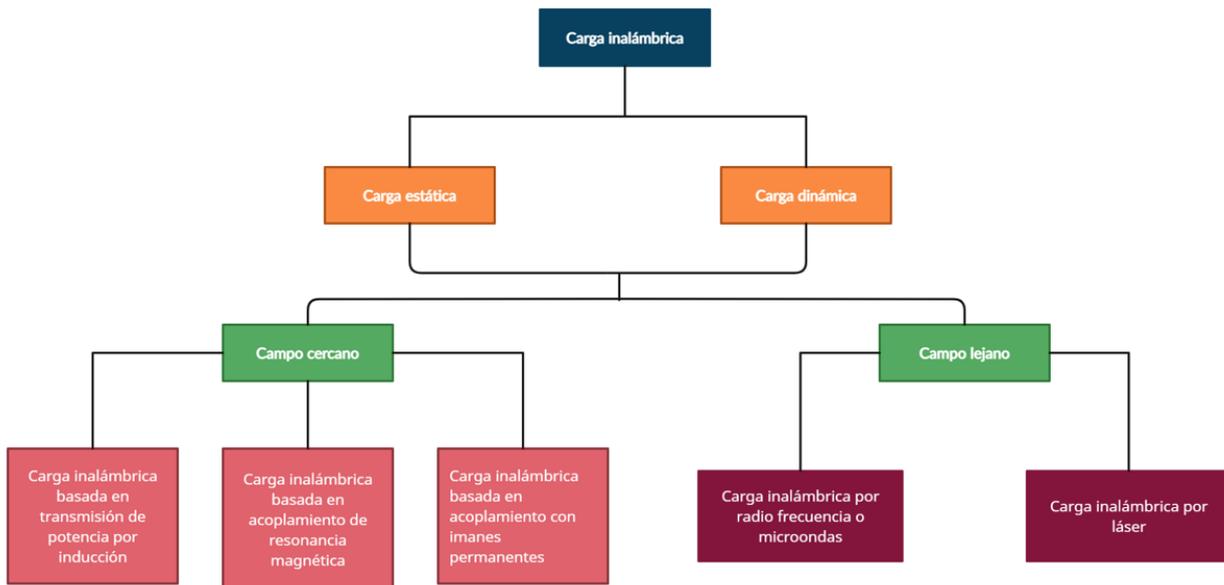


Figura 6-1. Tipos existentes de carga inalámbrica.

Transmisión inalámbrica por campo cercano

En un campo cercano, la energía se encuentra en una región determinada cercana al emisor. Si el receptor no se sitúa en dicha región, no se lleva a cabo la transmisión. El campo generado por el emisor depende completamente de la forma y el tamaño tanto de éste como del receptor [57]. Cabe destacar que este tipo de campos no son radiactivos y los campos se generan mediante acoplamiento inductiva entre bobinas.

- **Carga inalámbrica basada en transmisión de potencia por inducción (IPT):** El fundamento de este sistema se basa en la ley de Faraday y en el principio de inducción magnética que dan explicación al fenómeno que se produce cuando se hace circular una corriente alterna alrededor de una bobina. Esta corriente induce un campo magnético alrededor de la misma y genera un voltaje en una bobina secundaria debido al campo magnético que lo atraviesa [57]. Uno de los proyectos que destacan es el proyecto PATH ejecutado en 1982, mediante el cual “se logró alimentar un VE con una frecuencia de 400Hz y una eficiencia del 60%, utilizando una distancia entre emisor y receptor de 50-100mm” [57].
- **Carga inalámbrica basada en acoplamiento de resonancia magnética (CMR):** Este método se basa en el empleo de la resonancia eléctrica del sistema con la finalidad de trabajar en el punto de máxima potencia. Esto se lleva a cabo mediante la implantación de condensadores en el circuito eléctrico de las bobinas. De esta manera, se logra incrementar la eficiencia y la capacidad de la transmisión. Uno de los proyectos que más destaca es el proyecto OLEV de carga inalámbrica dinámica, que en 2009 logró proveer el 60% de potencia a un autobús con tan sólo 12 cm de distancia entre placas [58].
- **Carga inalámbrica basada en acoplamiento con imanes permanentes:** Este método se basa en el empleo de imanes permanentes y en el giro de los mismos. Este sistema no es recomendado para el uso en vehículos eléctricos debido principalmente a las vibraciones que se producen.

Transmisión inalámbrica por campo lejano

En los campos lejanos, los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y se propagan como ondas electromagnéticas de radio frecuencia, microondas o láser. Cabe destacar que la energía transmitida es radiactiva por lo que ésta se transfiere haya o no receptores que capten dicha energía. La fracción de energía que no llega a ser captada por el receptor se disipa y son pérdidas. Principalmente, se emplean para la transmisión de energía a largas distancias.

- **Carga inalámbrica por radio frecuencia o microondas:** Este método es el más antiguo de carga inalámbrica, siendo Nikola Tesla en 1904 uno de los primeros en lograr transferir energía a 150 kHz y desde 1980 esta tecnología ha ido evolucionando notablemente [57].
- **Carga inalámbrica por láser:** Este sistema se emplea para transferir elevada energía a largas distancias y con altas potencias a un punto concreto. Este método no es recomendable para vehículos eléctricos ya que cualquier error en la dirección del láser conlleva grandes pérdidas [57].

6.2 Fundamentos y modelado del sistema de carga

6.2.1 Modelado de las bobinas acopladas y sistemas de compensación

El principio de funcionamiento de un sistema inalámbrico reside en el fundamento de las bobinas acopladas. Esto es, el acoplamiento se produce mediante el flujo magnético variable en el tiempo que se genera en una bobina y que se transfiere a la otra cuando empleamos corriente alterna. Esto se debe a que, cuando se produce un cambio en la corriente eléctrica en una bobina, se genera un campo magnético que puede inducir una corriente en la otra bobina, según la ley de Faraday. Por lo tanto, cuando hacemos circular una corriente alterna por una bobina, ésta genera un campo magnético que se acopla a la bobina secundaria e induce un voltaje en la misma, haciendo que se transfiera la energía de una a otra [20].

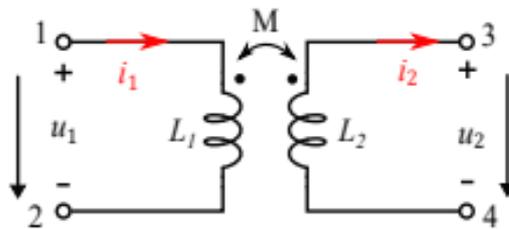


Figura 6-2. Modelo de bobinas acopladas [20].

El flujo existente mutuo entre ambas bobinas viene determinado por la inductancia mutua y se representa con la letra M. Asimismo, hay una parte del flujo que no se comparte, la cual se denomina inductancia propia. De esta manera, atendiendo a la Figura 6-2, las bobinas acopladas se caracterizan por las siguientes ecuaciones donde L1 y L2 son la autoinductancia de la bobina primaria y secundaria respectivamente:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (6-1)$$

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (6-2)$$

Además, existe un coeficiente clave que condiciona el valor de la inductancia mutua, el cual se denomina coeficiente de acoplamiento. Este coeficiente relaciona la inductancia mutua con la inductancia propia, estando los valores comprendidos entre 0 y 1. El valor tomará un 1 si las bobinas están completamente acopladas mientras que tomará un 0 si el acoplamiento entre las mismas es nulo o inexistente.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (6-3)$$

Con esta información podemos llegar a entender el funcionamiento de un sistema de transferencia inalámbrica como el que se muestra en la Figura 6-3. Concretamente, el medio de transmisión de energía es el aire y corresponde a un circuito de carga IPT (a partir de ahora el estudio se centrará en este tipo de transmisión inalámbrica).

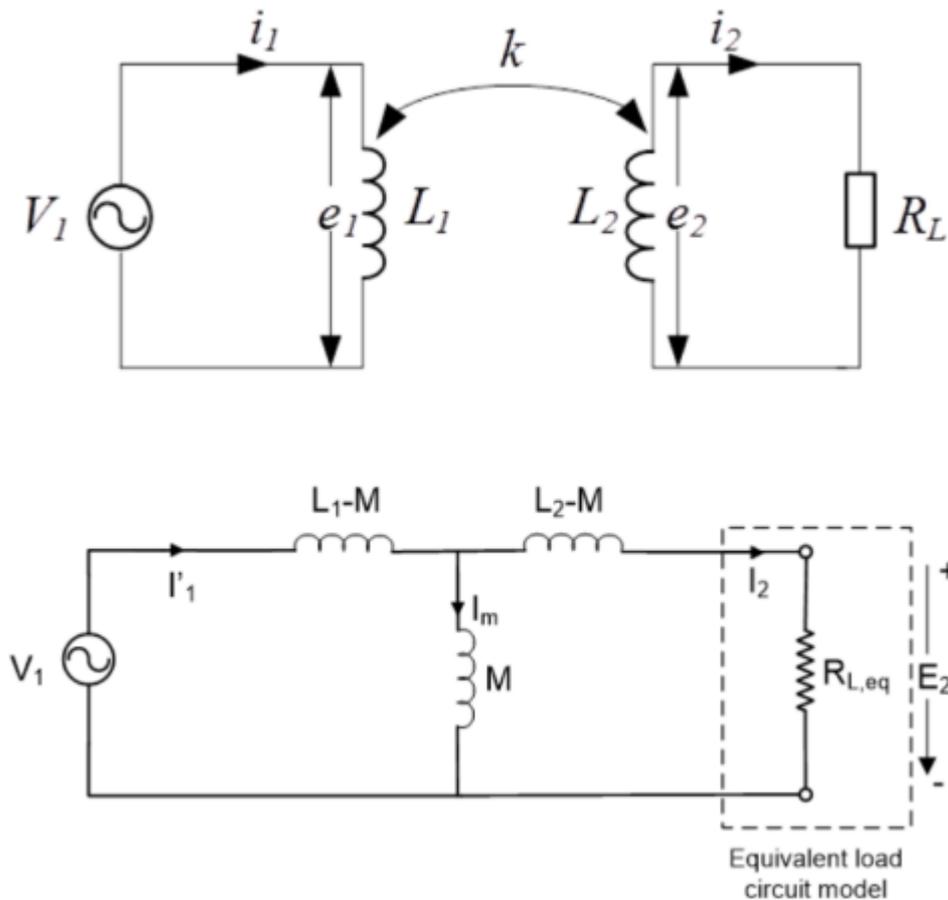


Figura 6-3. “Circuito de transmisión de energía por inducción con acoplamiento de aire” [7].

Normalmente, los sistemas inalámbricos tienen un espesor de aire del orden de milímetros. Por esta razón, la inductancia de fuga, la cual se define como L_1-M para la bobina primaria y L_2-M para la bobina secundaria, es alta a diferencia del coeficiente de acoplamiento (aproximadamente de 0,4 o menor) y la inductancia mutua que son bajas. Este hecho implica una corriente inducida elevada y pérdidas en cuanto a la eficiencia del sistema de carga. Además, se conduce muy poca potencia a la resistencia R_L . Por lo tanto, nos interesan valores altos de inductancia mutua y valores bajos de inductancia de fuga [7].

Para solventar este inconveniente, se introducen condensadores normalmente en serie con las inductancias de fuga en el sistema. Estos elementos tienen la principal finalidad de almacenar y otorgar potencia reactiva a las bobinas primaria y secundaria, y reducen la cantidad de potencia reactiva extraída de la fuente de alimentación. De esta manera, se logra incrementar la capacidad de transmisión y la eficiencia, llegando a valores en torno al 85% [7].

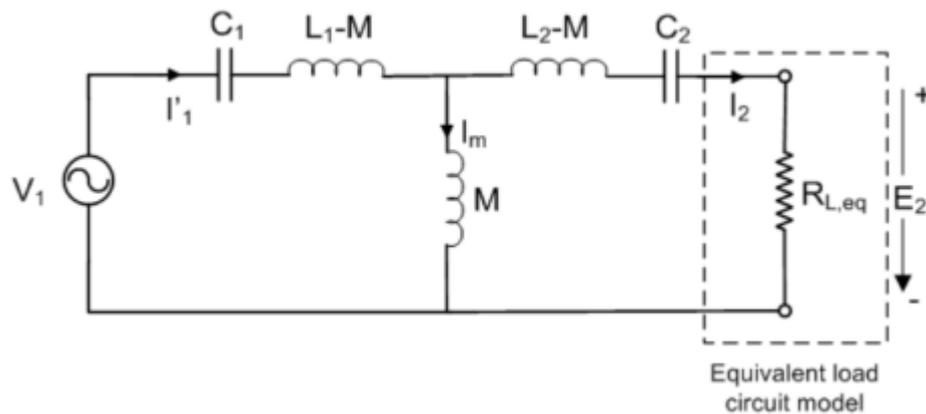


Figura 6-4. Compensación en serie para un circuito de transmisión de energía por inducción con acoplamiento de aire. [7]

Otro ejemplo de un circuito IPT sería el mostrado a continuación:

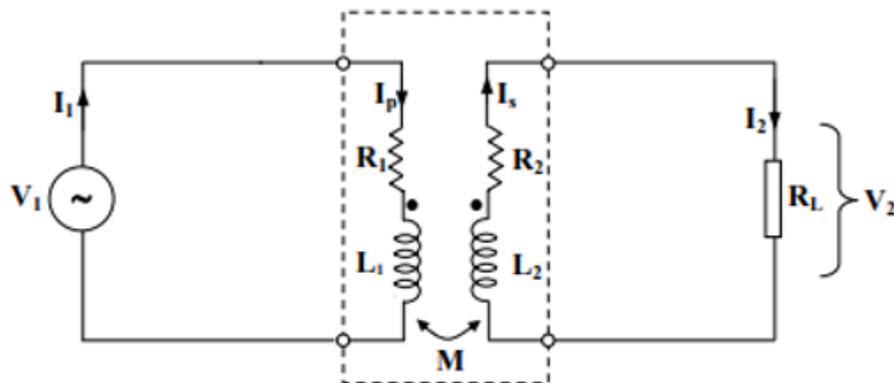


Figura 6-5. Ejemplo circuito IPT sin compensar. [59]

En la figura se muestran dos bobinas, una primaria que está alimentada gracias a una fuente de tensión senoidal y una secundaria que suministra energía a una carga resistiva. Podemos observar una intensidad I_p correspondiente al devanado primario y una intensidad I_s correspondiente al devanado secundario.

Asimismo, podemos definir la potencia aparente suministrada al devanado secundario de multiplicar la corriente de cortocircuito por el voltaje en circuito abierto resultando:

$$\vec{S}_2 = j \left(\frac{\omega M^2 I_p^2}{L_2} \right) \tag{6-4}$$

Siendo ω la frecuencia de trabajo.

Además, implementando condensadores logramos trabajar en resonancia, consiguiendo una potencia aparente máxima de expresión:

$$\vec{S}_{2Max} = j \left(\frac{q_s \omega M^2 I_p^2}{L_2} \right) \tag{6-5}$$

Donde hemos incluido un parámetro q_s , al cual se le denomina factor de calidad del secundario y es un coeficiente que relaciona la potencia reactiva con la activa. Cuanto mayor sea este coeficiente, mayor será la potencia que se suministra. No obstante, si el valor es elevado puede llegar a hacer al sistema inestable. Normalmente, este parámetro está comprendido en un rango entre 4 y 10. [59]

$$q_s = \frac{Q_2}{P_2} \quad (6-6)$$

Por último, podemos calcular la potencia activa máxima en el secundario al multiplicar la potencia aparente máxima de este devanado por el factor de potencia de la corriente correspondiente.

$$P_{2Max} = S_2 \cos \varphi_2 \quad (6-7)$$

Para que esta potencia sea máxima, el coseno debe valer la unidad. Esto se logra trabajando en resonancia en el devanado secundario. Por lo tanto, sustituyendo la ecuación (6-5) en la (6-7), se obtiene la siguiente expresión de la potencia activa máxima en el secundario:

$$P_{2Max} = \frac{\omega q_s M^2 I_p^2}{L_2} \quad (6-8)$$

Para diseñar correctamente la compensación, primeramente hay que estimar el valor de la frecuencia de trabajo, la cual coincidirá con la frecuencia de resonancia del sistema ya que se quiere trabajar a máxima potencia activa (P_{2Max}). Este valor de la frecuencia de resonancia se puede obtener de la siguiente expresión [59, eq. (6-9)]:

$$\omega = \frac{\sqrt{R_1(R_2 + R_L)}}{M} \quad (6-9)$$

Uno de los inconvenientes de diseñar la frecuencia de trabajo mediante la potencia activa máxima es que las eficiencias resultantes son muy bajas. Por lo tanto, actualmente, uno de los mayores puntos de investigación está en obtener frecuencias de trabajo que generen rendimientos máximos, en vez de partir de la potencia activa máxima para su cálculo. [59]

6.2.1.1 Efecto de la distancia entre bobinas

La distancia entre las bobinas acopladas es un parámetro que afecta significativamente a la potencia del sistema y al coeficiente de acoplamiento.

Tal y como se ha expresado anteriormente, los sistemas inalámbricos en vehículos eléctricos suelen tener una compensación en serie. Con esta topología de compensación, a menor distancia entre bobinas, menor es la potencia activa suministrada a la carga y la potencia absorbida de la fuente de alimentación. Este hecho hace que el sistema se mantenga estable. No obstante, si se aumenta la distancia entre las bobinas, las potencias nombradas aumentan provocando la inestabilidad del sistema.

Asimismo, en un sistema de carga inalámbrica dinámica la distancia entre bobinas es más alta que en carga estática. Esto causa una disminución del coeficiente de acoplamiento. Por esta razón, la potencia suministrada a la carga es mayor en este tipo de sistemas.

6.2.1.2 Desalineamiento entre bobinas

El desalineamiento entre bobinas puede llegar a afectar negativamente al tiempo de carga del sistema, por ejemplo, cuando se está ejecutando un cambio de carril o por agentes externos como obstáculos, los cuales provocan vibraciones en el sistema. Al verse perjudicado el tiempo de carga, también lo hará la velocidad de carga, la potencia y la eficiencia.

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta para corregir el desalineamiento es la geometría de las

bobinas. Asimismo, este factor no solo es determinante en este aspecto, sino que es clave para lograr una eficiencia máxima con un peso y volumen lo menor posible. Por lo tanto, tras muchas investigaciones durante décadas, se ha llegado a la conclusión de que la geometría óptima para minimizar el efecto del desalineamiento es optar por una disposición de las espiras de manera horizontal, mejorando de esta manera tanto el coeficiente de acoplamiento como la transmisión de potencia. Además, cabe destacar que el incremento de la bobina primaria no afecta negativamente al coeficiente de acoplamiento. [59]

No obstante, según un estudio de sistemas de transferencia mediante acoplamiento inductivo para vehículos eléctricos dice que “en aplicaciones en las que no haya desalineamientos, la geometría óptima estará formada por las dos bobinas cuadradas del mismo tamaño” [59].

Actualmente, un sistema de carga inalámbrica generalmente es estable y consigue relativamente buenas prestaciones ante un desalineamiento entre 50 y 150 mm. Asimismo, mediante una compensación en serie, “la frecuencia resonante no cambia en función del posicionamiento relativo de la bobina o la carga” según otro estudio [60].

Hay más soluciones que se pueden adoptar para menguar este inconveniente de los sistemas de carga inalámbrica, entre los cuales destacan: sistema de alineación automática, empleo de bobinas múltiples, sistemas de monitoreo de potencia y empleo de sensores de movimiento.

La tecnología de alineación automática consiste en unos sensores que detectan la posición y la orientación de las bobinas, mediante los cuales se logra ajustar en todo momento el alineamiento. Asimismo, este sistema se puede combinar con un empleo de bobinas múltiples para lograr mayores eficiencias y mejorar el conjunto de este tipo de tecnología.

Otra solución que se puede implementar es un sistema de monitoreo de la potencia suministrada en relación con el desalineamiento. Esta tecnología es cara y no es la más óptima, sin embargo, ayuda a otorgar la máxima eficiencia posible respecto al desalineamiento.

6.2.2 Convertidores en sistemas inalámbricos

Un sistema de carga inalámbrica en vehículos eléctricos se compone principalmente de un rectificador, un inversor, un convertidor bidireccional CC-CC y un sistema de bobinas acopladas junto con sus compensaciones correspondientes.

En la Figura 6-6 podemos observar más en detalle el funcionamiento de un sistema típico. Primeramente, se transforma mediante un rectificador la corriente alterna de la red en corriente continua y, a su vez, se convierte la corriente continua en alterna a distinta frecuencia mediante un inversor. Tras esto, la energía se transmite por inducción a la bobina primaria, la cual a su vez se la transmite a la secundaria. Después, la corriente alterna se convierte en continua mediante un rectificador y, por último, se varía la frecuencia de dicha corriente mediante un convertidor bidireccional CC-CC para ser entregada a la batería.

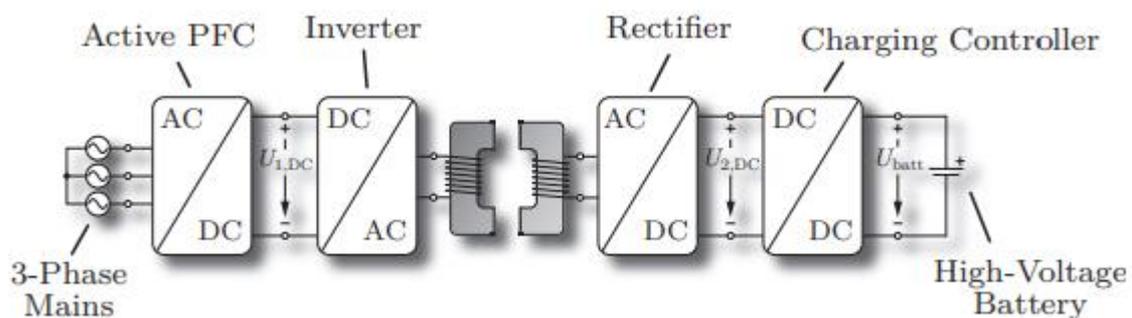


Figura 6-6. Esquema de transmisión de energía de un sistema de carga inalámbrica junto con los convertidores de potencia [60].

A continuación, se presentan las topologías más comunes de los convertidores empleados para un sistema de carga inalámbrica para vehículos eléctricos, tanto para turismos, híbridos como para camiones.

Inversor ZVS Full-Bridge

Uno de los inversores más comunes empleados en sistemas de carga inalámbrica para vehículos eléctricos es el inversor Zero Voltage Switching full bridge o más conocido como ZVS full bridge, el cual se usa para transformar la corriente continua en alterna. Este inversor tiene la gran ventaja de lograr mayores eficiencias y reducir las pérdidas de energía debido al efecto Joule.

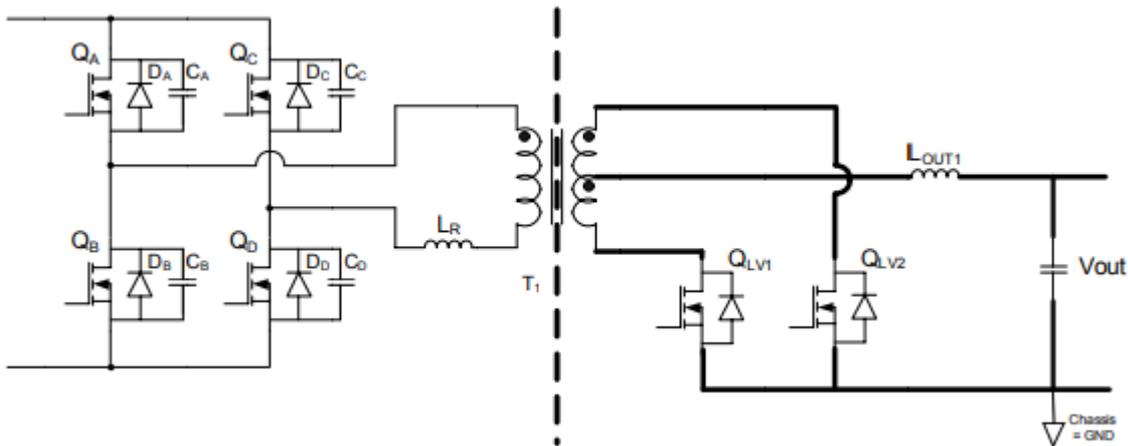


Figura 6-7. Ejemplo de un inversor ZVS full-bridge [61].

Este convertidor se compone de cuatro interruptores dispuestos en un puente en H tal y como se muestra en la Figura 6-7. Además, este inversor hace uso de la modulación de ancho de pulso (PMW) para controlar la amplitud y la frecuencia de la corriente alterna con la finalidad de ajustar la potencia que se suministra a la salida.

Convertidor Buck-Boost y rectificadores

Un convertidor Buck-Boost en sistemas inalámbricos para vehículos es similar al que se emplea en sistemas no inalámbricos. Es decir, se emplea para variar una tensión continua de un valor determinado a otro mayor o menor también de este tipo de corriente. Asimismo, cuando el vehículo está en marcha (aceleración positiva) el convertidor actúa en modo Boost y el motor demanda energía, provocando que las baterías se descarguen. Por otro lado, en los frenados regenerativos (aceleración negativa) las baterías se cargan ya que el convertidor actúa en modo Buck.

Por otro lado, los rectificadores en un sistema de carga inalámbrico para vehículos eléctricos tienen la misma finalidad que los que se utilizan en sistemas convencionales ya que se emplean para transformar la corriente alterna en continua. Sin embargo, se suelen usar rectificadores de onda completa (como en los sistemas convencionales) o rectificadores de puente completo.

No obstante, las diferencias de estos convertidores en los sistemas inalámbricos frente a los convencionales son principalmente los siguientes:

- La frecuencia en los sistemas inalámbricos es mayor que en los sistemas convencionales, debido a que en la carga inalámbrica se requieren mayores valores de la frecuencia para aumentar la eficiencia del sistema.
- En los sistemas inalámbricos se requiere una mayor precisión y control de los parámetros para que la eficiencia sea lo más óptima posible. Por lo tanto, en este tipo de sistemas el monitoreo de carga es más complejo que en los sistemas de carga convencionales.

Además, según el tipo de carga varía la topología de los convertidores junto con sus componentes.

6.2.3 Sistema óptimo para carga rápida en vehículos eléctricos

Según una tesis doctoral sobre sistemas de transferencia inalámbrica mediante acoplamiento inductivo, tal y como se observa en la Figura 6-8, una de las propuestas para mejorar este tipo de sistemas es implementar una configuración de compensación SPS, es decir, introducir en el circuito un condensador en serie (C_1) y otro en paralelo (C_3) en el devanado primario, y un condensador en serie (C_2) en el devanado secundario.

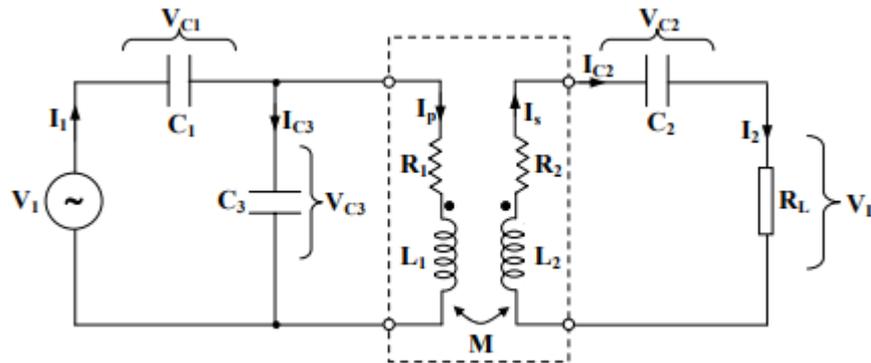


Figura 6-8. Circuito de transferencia de carga inalámbrica por inducción con compensación SPS [59].

La frecuencia de trabajo a máxima potencia activa, es decir, la frecuencia de resonancia del sistema es la misma que para el sistema descrito de la Figura 6-5:

$$\omega = \frac{\sqrt{R_1(R_2 + R_L)}}{M} \quad (6-10)$$

De esta manera, se consigue fusionar las ventajas de ambos tipos de compensaciones logrando mejorar el comportamiento ante el desalineamiento del sistema y ante las variaciones de distancia de las bobinas, además de conseguir un sistema de carga estable.

En concreto, ante variaciones de distancia el sistema se comporta de manera estable. Según la tesis, en los acercamientos “la tensión y corriente en la carga disminuyen y la corriente absorbida de la fuente también disminuye análogamente a la compensación SS, hasta establecerse en un valor constante e igual al 75% de la nominal para bobinas pegadas” [59]. Por otro lado, para alejamientos “alimentando la bobina de primario en ausencia de la del secundario, la corriente absorbida de la red se incrementa en un 35% superior a la nominal” [59].

En cuanto al desalineamiento, la tensión y la potencia suministradas son análogas a las nominales con la condición de que ambas bobinas estén como máximo desacopladas un 40%. Además, se ha llegado a alcanzar una eficiencia del 90%. Asimismo, la corriente absorbida de la fuente se incrementa hasta un 35% por encima de la nominal, para un 100% de desacoplamiento. Esto se traduce en que si sobredimensionamos la fuente hasta un 35%, el sistema sigue siendo estable en ausencia de control. [59]

6.3 Cargadores inalámbricos

Actualmente, la mayor desventaja de los sistemas de transferencia inalámbrica en los vehículos eléctricos es la baja eficiencia de carga. Por esta razón, los tiempos de carga también son muy bajos. No obstante, recientemente se ha estado avanzando en este campo y se han logrado obtener cargadores de carga rápida capaces de cargar una batería al 50% en 3 minutos y hasta el 80% en 15 minutos [57]. Sin embargo, la carga rápida está estrechamente ligada con el deterioro de las baterías, por lo que no sale rentable económicamente comprar uno de estos dispositivos para tener que cambiarlos cada cortos períodos de tiempo.

Podemos clasificar los cargadores inalámbricos dependiendo de si son destinados para carga estática (SWT) o

para carga dinámica (DWT). De estos dos, los más eficientes son los cargadores estáticos debido a su capacidad de poder lograr una completa alineación entre bobinas. De hecho, Qualcomm ha llegado a fabricar uno de los cargadores más eficientes, llegando a alcanzar más del 95%. [57]

Cargadores inalámbricos para carga estática (SWT)

- **Evatran Plugless Power:** esta compañía ha fabricado cargadores inalámbricos para vehículos eléctricos de Tesla y Chevrolet, en concreto, el Tesla Model S y Chevrolet Volt. Además, para el Tesla Model S, “Plugless carga el vehículo con una potencia de 7,2kW, lo que añade 32 kilómetros de conducción por cada hora sobre la plataforma de carga” [23] y, para el Chevrolet Volt se ha conseguido una eficiencia de carga del 91% [62].
- **Qualcomm Halo:** este cargador inalámbrico utiliza una tecnología de carga inductiva para cargar vehículos eléctricos. De esta manera, el cargador Halo de Qualcomm “es capaz de transferir energía con una potencia de 3,7, 7,4, 11 y 22 kilovatios y una eficiencia del 90%” [63].
- **WiTricity Halo:** este cargador inalámbrico emplea una tecnología de resonancia magnética para cargar vehículos eléctricos. Este cargador estará disponible a partir de finales de 2022 en Estados Unidos, ofreciendo “una carga inalámbrica de 11 kW, lo que permitirá una tasa de carga que proporciona hasta 35-40 millas” [64]. Además, WiTricity tiene notables proyectos como sus aportaciones para Hyundai, entre otros. Otro de los cargadores novedosos de esta compañía es el “Drive 11”.
- **Cargador de McLaren:** En cuanto a los vehículos híbridos, un ejemplo es el cargador fabricado por McLaren en 2020, el cual lanzó una plataforma de carga inalámbrica para su modelo Speedtail. [65]

Cargadores inalámbricos para carga dinámica (DWT)

- **Qualcomm:** esta compañía, además de fabricar cargadores para carga estática, también los fabrica para carga dinámica. Aunque todavía está en proceso de investigación, Qualcomm ha realizado varias pruebas como el experimento que desarrolló con dos Renault Kangoo en Versalles en el que consiguió recargar las baterías de estos vehículos a una potencia de 20 kW [63].
- **“Primove” de Bombardier Transportation:** este es un sistema de carga inalámbrica para tranvías, autobuses eléctricos y turismos, que se basa en la inducción electromagnética para efectuar la carga de los mismos.
- **“Arena del futuro” de Stellantis:** este es un proyecto que consiste en cargar vehículos en un tramo de 1,05 km a 1 MW de potencia. Ya se ha probado el sistema con un Fiat 500 y un autobús Iveco E-Way, con los que se han obtenido buenos resultados, a partir de los cuales se pretende dar un paso más para implantarlo en una carretera real. [66]

Cabe destacar que, no todos los vehículos eléctricos tienen capacidad de carga inalámbrica ni tampoco existe una estandarización universal ni a nivel europeo. No obstante, SAE, IEEE y CENELEC están cada vez más cerca de conseguir esa estandarización para este tipo de carga.

6.4 Carga inalámbrica empleando energías renovables

Para alcanzar los objetivos mundiales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo el dióxido de carbono, es necesaria la búsqueda de alternativas que permitan variar la manera en la que generamos y consumimos energía. Por lo tanto, es esencial electrificar el uso de la energía tanto como sea posible si queremos reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y, en consecuencia, las emisiones de gases de nocivos.

Una de las grandes estrategias que se plantean actualmente es el empleo de energías renovables y carga inteligente combinados con carga inalámbrica para vehículos eléctricos. De esta manera, se pretenden alcanzar

sistemas de carga mucho más limpios y eficientes. De hecho, un estudio realizado por el equipo Bloomberg New Energy Finance, ha estimado que los vehículos que empleen energía solar lograrán ser 11 veces más limpios que los vehículos convencionales que usan combustibles fósiles y los que empleen energía eólica serán 85 veces más limpios [67]. Asimismo, “en 2040, se espera que la eólica y la solar representen el 50% de la capacidad de generación mundial, frente al 12% actual” [68].

El sistema planteado para carga inalámbrica estática consiste en implementar placas fotovoltaicas en hogares, lugar de trabajo y centros comerciales, entre otros, para emplearlas como método de producción de energía, las cuales irán conectadas a las placas base de los cargadores de los vehículos eléctricos. Además, mediante un sistema de monitoreo de carga se lograría aumentar la eficiencia del conjunto.

Por otro lado, una estrategia más ambiciosa es la de implementar energía solar y eólica combinadas para alimentar a los vehículos durante la conducción mediante un sistema de carga inalámbrica dinámica. Es decir, el objetivo sería emplear la energía solar durante el día y la eólica durante la noche y, a su vez, hacerlas llegar a las carreteras.

Otra de las grandes ambiciones es el uso de baterías como dispositivos de almacenamiento de energía. De esta manera, se pueden emplear como suministro de energía cuando las fuentes de energía renovable no estén disponibles. Es decir, las baterías pueden abastecer al vehículo tanto en días nublados o no soleados como en días en los que el viento tenga baja velocidad.

6.4.1 El autoconsumo y el impacto de los vehículos eléctricos en la red

El autoconsumo consiste en un sistema de generación de energía el cual se ubica donde esa energía va a ser consumida. De esta manera, se consigue reducir las pérdidas debidas al transporte de energía de un punto a otro determinado, mayor eficiencia y menor coste energético. Hay distintos tipos de autoconsumo:

- **Sin excedentes:** No permite entregar la energía sobrante a la red eléctrica.
- **Con excedentes:** Permite la devolución del excedente de energía a la red.

Este concepto toma gran importancia en la carga inalámbrica estática ya que los vehículos se encuentran estacionados en centros de ocio, hogares, etc. Por lo tanto, se puede implementar un sistema de flujo bidireccional de energía en el que se entregue y devuelva la misma en los momentos de menor demanda de la red eléctrica con un sistema de carga inteligente de monitoreo de potencia.

Por otro lado, vamos a observar la influencia de los vehículos en la red eléctrica. Según un estudio empleando 400 km² y 170.000 consumidores de origen doméstico e industrial, observando la Figura 6-9, podemos atender a tres tipos de situaciones: recarga sin control en horas punta (entre las 20:00 y las 22:00), recarga sin control en horas valle (entre las 4:00 y las 6:00) y recarga inteligente en horas valle. Cabe destacar que se ha estudiado un promedio de recarga de 3 kW con un tiempo entre una y ocho horas al día. [69]

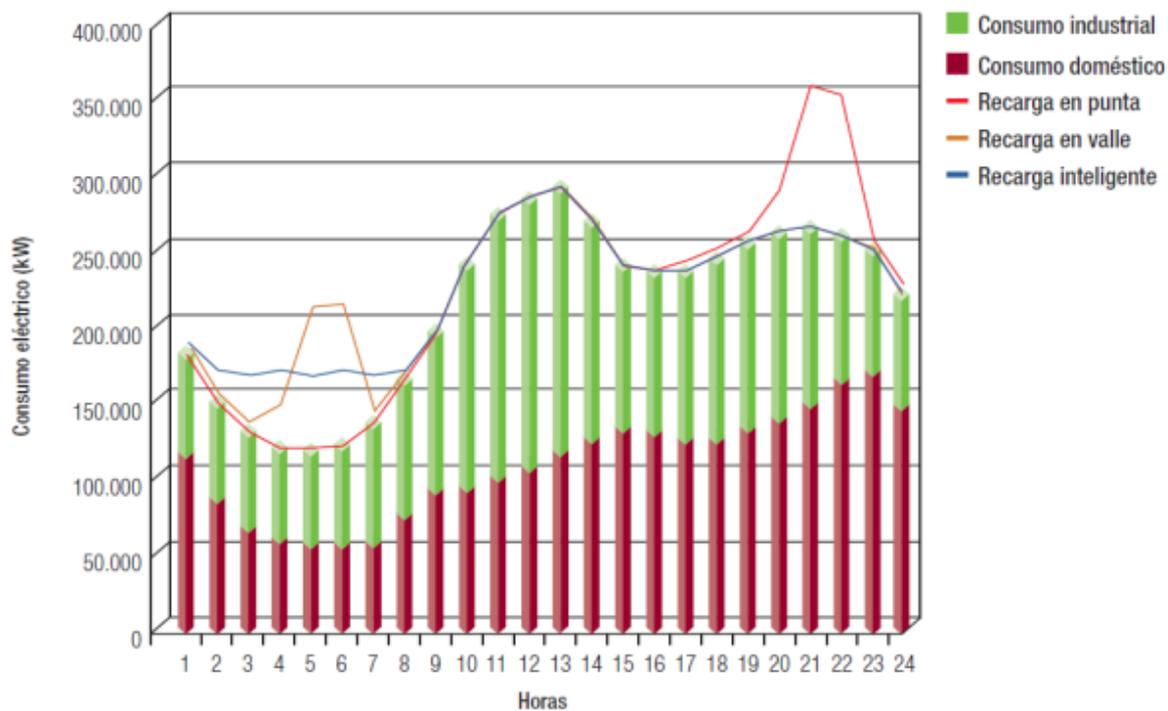


Figura 6-9. Curva agregada de la demanda eléctrica diaria para tres tipos de recarga [69].

Podemos observar que los picos de consumo se producen en la madrugada, es decir, en la recarga en horas valle, y en la noche donde se produce la recarga en horas punta. Si nos fijamos en la recarga inteligente, ésta se amolda a la demanda de la red logrando un sistema más eficiente.

Otro punto es lo que se refleja en la Figura 6-10, la cual representa el aumento de los costos de la red de distribución para cada estrategia del estudio. Además, cabe señalar que la gráfica está referida al precio de la red de media tensión, centro de transformación de media/baja tensión y de la red de baja tensión, sin tener en cuenta el empleo de los automóviles.

Si interpretamos la gráfica, utilizando una estrategia de carga controlada, los costes de refuerzos en la red de baja tensión serían inferiores al 2% del coste total de la red, frente a un coste del 12,8% con la estrategia de carga no controlada en horas punta. Por lo tanto, de no implementarse una estrategia coordinada de carga, también sería necesario fortalecer la red de media tensión y aumentar la potencia de los centros de transformación de media/baja tensión. El nuevo pico de potencia del sistema, superior al actual sin vehículos como se puede observar en la Figura 6-9, se podría abastecer gracias a estos refuerzos. No obstante, en las instalaciones de media tensión y en centros de transformación el coste adicional que supondrían estos refuerzos pueden llegar hasta el 13 % y el 31 %, respectivamente. [69]

Asimismo, es prácticamente posible eliminar la necesidad de refuerzos adicionales de la red de media tensión adoptando un control de carga para vehículos sencillo y cambiándolo a horas de menor actividad.

En cuanto a la carga inteligente, este método permite cargar los vehículos sin necesidad de reforzar la red aguas arriba de baja tensión.

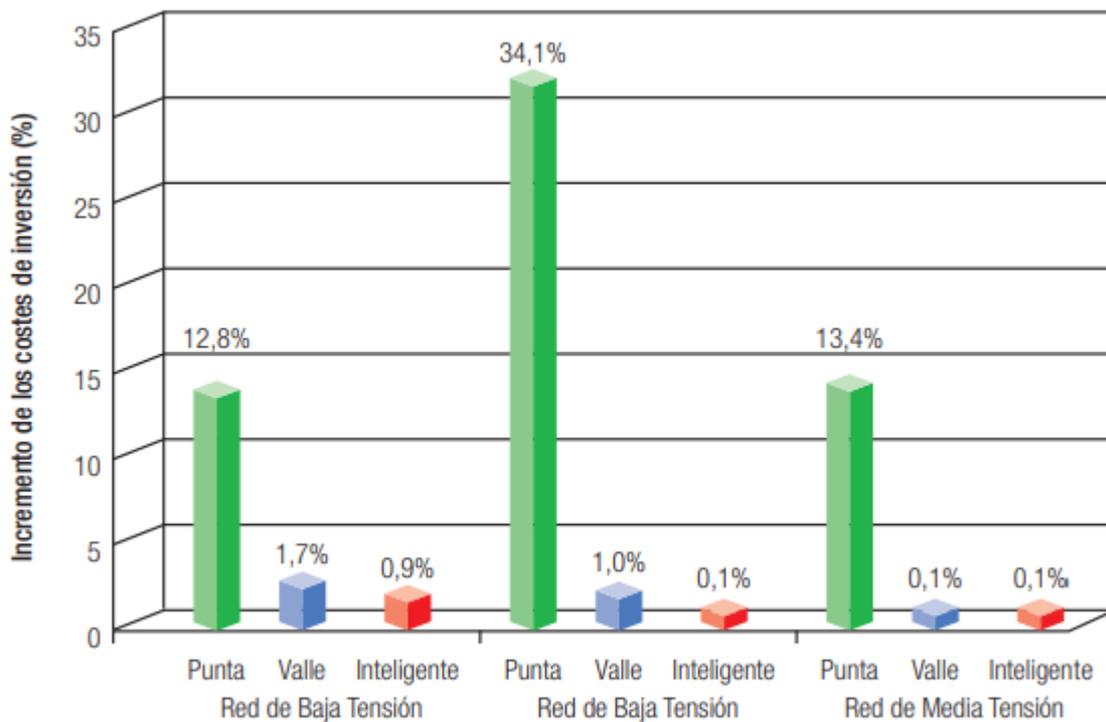


Figura 6-10. Incremento de los costes de inversión debido a la penetración de VE en la red de distribución ejemplo, incluyendo costes de la red de baja tensión, en el centro de transformación y refuerzos en la red de media tensión [69].

Atendiendo a los puntos de carga, se presentan dos casos:

- **Recarga distribuida empleando baja tensión:** en hogares y oficinas.
- **Recarga empleando media tensión:** en parkings y centros de ocio.

6.4.2 Energía solar

Una alternativa cada vez más atractiva para alimentar una amplia gama de dispositivos eléctricos es la energía solar. Debido a su sostenibilidad y bajo costo a largo plazo, el uso de dicha fuente en particular para cargar vehículos eléctricos es cada vez más popular. Los sistemas de energía solar pueden producir suficiente energía para abastecer los automóviles eléctricos, lo que reduce la necesidad de fuentes de energía convencionales. Cabe señalar que, los valores máximos se logran durante el día y en verano.

Cabe destacar que, las placas fotovoltaicas normalmente generan potencia en kilovatios que es parecida a la magnitud que proporcionan los cargadores de los vehículos eléctricos. En 2018, el coste de la energía solar mediante placas fotovoltaicas era de 0,055 €/kWh y se prevé que para 2030 este valor se reduzca a 0,035 €/kWh [70].

Algunas de las características más importantes a tener en cuenta a la hora de implantar un sistema solar son las siguientes:

Tabla 6-1. Ventajas y desventajas del empleo de la energía solar en vehículos.

Ventajas	Desventajas
Energía limpia, sostenible con el medio ambiente e inagotable	Elevado coste inicial
Reduce notablemente los gases de efecto invernadero	De noche no se genera energía
La inversión inicial se amortiza a los pocos años	Aspectos como la temperatura, humedad y climatología pueden alterar la eficiencia del sistema
Bajo coste de mantenimiento	Baja eficiencia si se usa un sistema solar por sí solo
Energía económica	En la producción de paneles fotovoltaicos se emiten altos porcentajes de gases nocivos
Se pueden instalar paneles fotovoltaicos en lugares cercanos a las placas de carga de los vehículos (en los tejados de las casas, parte superior de los edificios, lugar de trabajo, parques fotovoltaicos cercanos a las carreteras, etc)	
Sistemas silenciosos	
Alta fiabilidad	
Permiten el autoconsumo	

6.4.3 Energía eólica

Una de las fuentes de energía renovable más populares en la actualidad es la energía eólica. Asimismo, el uso de este tipo de fuente es una de las propuestas más llamativas actualmente para su aplicación en la carga de vehículos eléctricos ya que esta energía es sostenible y eficaz, además de que se puede almacenar en baterías. Este último hecho reduce la necesidad del empleo de los combustibles fósiles y promueve a menguar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las máquinas que se usan para generar energía en estos tipos de sistemas son los aerogeneradores eólicos. Normalmente, estas máquinas generan potencia en megavatios que, en comparación con la potencia que proporcionan los cargadores de los vehículos eléctricos (en kilovatios), estas máquinas son capaces de abastecer un gran número de automóviles. En 2018, el coste de la energía eólica era de 0,056 €/kWh y se prevé que para 2030 este valor se reduzca a 0,040 €/kWh [70]. Otra característica destacable es que el máximo de la energía eólica se logra durante la noche y en invierno, lo opuesto a lo que se consigue utilizando una fuente solar.

Uno de los grandes inconvenientes que tiene esta fuente de energía renovable es la necesidad de transportar la misma a grandes distancias hasta carreteras, hogares, centros de ocio y lugar de trabajo, ya que los aerogeneradores se ubican en parques eólicos en tierra alejados de las ciudades o en altamar.

Algunas otras características destacables en cuanto a este tipo de energía a tener en cuenta para implementar un sistema eólico son las siguientes:

Tabla 6-2. Ventajas y desventajas del empleo de la energía eólica en vehículos.

Ventajas	Desventajas
Energía limpia, sostenible con el medio ambiente e inagotable	Necesidad de transportar la energía a largas distancias
Reduce significativamente los gases de efecto invernadero	La producción de los aerogeneradores produce altos porcentajes de gases nocivos
Bajo coste de mantenimiento	Energía dependiente de la climatología
Elevada vida útil de los aerogeneradores	Dependencia con el viento
	Inversión inicial alta
	Sistemas ruidosos

6.4.4 Estrategias para la optimización de los sistemas de carga inalámbrica empleando energías renovables

6.4.4.1 Sistema óptimo para la carga inalámbrica estática mediante placas fotovoltaicas

El sistema planteado para la optimización de carga inalámbrica estática en vehículos eléctricos consiste en implementar placas fotovoltaicas en hogares, lugar de trabajo y centros comerciales, entre otros, para emplearlas como método de producción de energía, las cuales irán conectadas a las placas base de los cargadores inalámbricos de los automóviles.

Para la transferencia correcta de energía en un sistema fotovoltaico típico es preciso el uso de un inversor solar. Estos inversores se caracterizan por transformar la corriente continua que generan las placas fotovoltaicas en corriente alterna que se entrega a la red eléctrica. Además, con la finalidad de aumentar la eficacia y la producción de energía de las placas, podemos hacer uso de un regulador MPPT que permite extraer la máxima potencia de los paneles fotovoltaicos.

Normalmente, un sistema de este tipo está compuesto por un convertidor CC-CC que, a su vez, se conecta a un inversor solar. De esta manera, se transforma la corriente continua en alterna para entregarla a la red. Además, se usará esta energía para alimentar los vehículos.

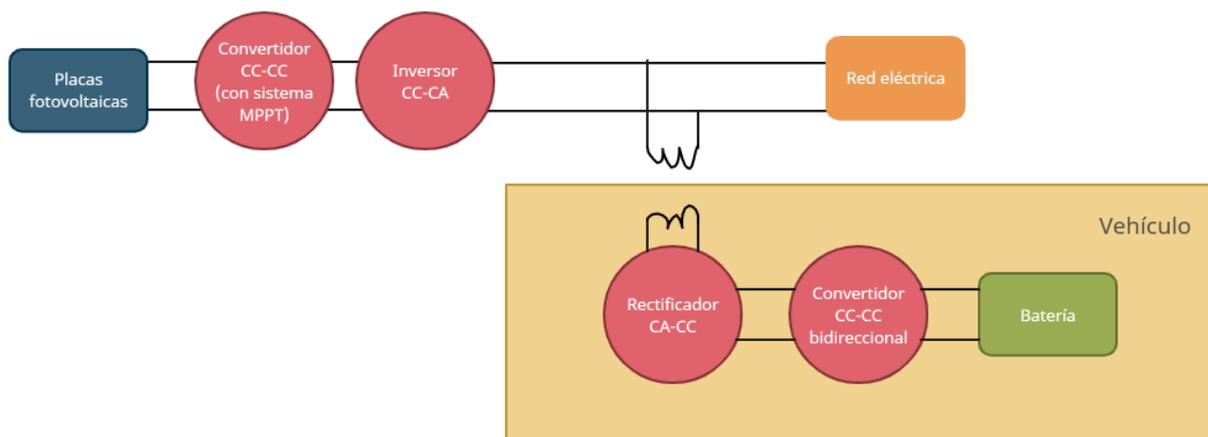


Figura 6-11. Sistema óptimo para la carga inalámbrica estática de un vehículo empleando placas fotovoltaicas.

Atendiendo a la Figura 6-11, se ha planteado un sistema de transferencia inalámbrica utilizando placas fotovoltaicas. Primeramente, se usa un convertidor CC-CC con regulador MPPT conectado a las placas para variar la frecuencia de la corriente continua que generan las mismas. Tras esto, dicha corriente circula hacia un inversor y se transforma en alterna. A continuación, esta corriente se entrega a la red eléctrica o se transmite por inducción al vehículo. En el automóvil, la corriente se rectificará y se suministrará a la batería del mismo.

Cabe destacar que, cuando el vehículo no se está cargando, el sistema funciona como un inversor solar abasteciendo a la red. Además, en el caso de que no haya energía solar, es decir, por la noche, el sistema utiliza la red si se quiere cargar el automóvil. Esto es, una de las grandes ventajas de esta estrategia es la posibilidad de implementar un sistema de carga inteligente V2G. Por lo tanto, mediante este sistema se puede tanto cargar el vehículo como entregar energía a la red mediante convertidores bidireccionales. Todo esto conlleva un gran beneficio: el empleo de las baterías como dispositivos de almacenamiento de energía renovable.

Otra opción, sería implantar baterías extra conectadas a los paneles para almacenar el excedente de energía solar. De esta manera, cabe la posibilidad de emplear esta energía para recargar los automóviles durante las horas ausentes de luz solar o en horas de alta demanda de la red eléctrica.

6.4.4.2 Sistema híbrido para la carga inalámbrica dinámica empleando energía solar y eólica

En cuanto a la carga inalámbrica dinámica, el sistema óptimo planteado consiste en combinar la energía solar y eólica con la finalidad de alimentar los vehículos durante la conducción. En otras palabras, el objetivo sería emplear la energía solar durante el día y la eólica durante la noche y, a su vez, hacerlas llegar a las carreteras.

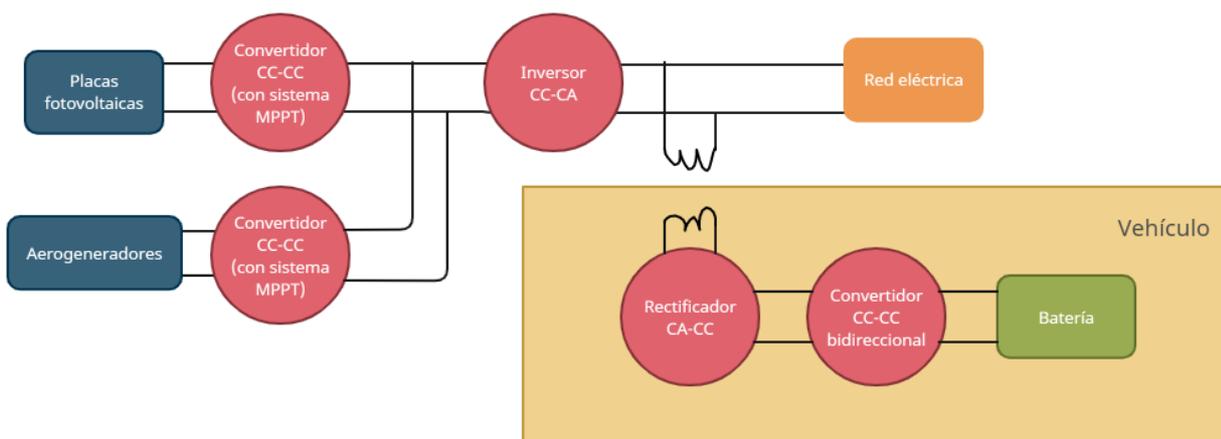


Figura 6-12. Sistema óptimo para la carga inalámbrica dinámica de un vehículo empleando placas fotovoltaicas y aerogeneradores.

Partiendo de la base de que los aerogeneradores producen corriente continua mediante el movimiento de sus aspas y de que las placas fotovoltaicas también generan este tipo de corriente, se emplearán dos convertidores CC-CC unidireccionales con función MPPT para variar la frecuencia de ambas corrientes, respectivamente. Cuando estas corrientes hayan variado de frecuencia, se unirán y, mediante un inversor, se convertirá dicha corriente en alterna para alimentar a los vehículos durante su conducción o para ser entregada a la red eléctrica.

Asimismo, podemos introducir en el sistema bancos de baterías para almacenar los excedentes de energía y emplearla para alimentar a los automóviles en ciertas situaciones que se requiera. Por ejemplo, cuando la velocidad del viento sea casi inexistente y no haya luz solar.

El principal reto de este sistema reside en controlar la variabilidad de la generación de energía de las fuentes renovables ya que la producción de la misma está estrechamente relacionada con la climatología. Para ello, es necesario obtener una configuración solar-eólica que garantice la rentabilidad y viabilidad del sistema incluso en el caso más indeseable: cuando la luz solar y la velocidad del viento sean mínimos. Uno de los inconvenientes que se pueden dar es que se genere un exceso de energía en el caso contrario, es decir, cuando la incidencia de

la luz en las placas y la velocidad del viento sean máximas. Al igual que en el sistema estático planteado, se puede emplear la carga inteligente para controlar la entrega de energía a los vehículos y a la red. Otra opción sería hacer uso de los bancos de baterías mencionados anteriormente.

6.5 Futuro de la carga inalámbrica

La carga inalámbrica de vehículos eléctricos ha sido objeto de estudio y desarrollo durante los últimos años. Muchas empresas están desarrollando actualmente tecnologías de carga inalámbrica para hacerlas más efectivas y útiles para el uso diario de los conductores de vehículos eléctricos. Asimismo, se anticipa que la demanda de carga inalámbrica aumentará junto con la popularidad de los vehículos eléctricos por lo que es conveniente investigar sistemas óptimos y sostenibles con el medio ambiente de manera que no se produzcan gases de efecto invernadero.

Según un estudio realizado por la consultora Verified Market Research, se llegó a la conclusión de que el mercado mundial de carga inalámbrica para vehículos eléctricos tendrá un valor de 2.744 millones de dólares en 2030. Según los datos finalizados de 2021, actualmente está valorado en 8,95 millones de dólares. Por lo tanto, entre los años 2022 y 2030, este mercado debería expandirse en un 85% anual para alcanzar la cantidad antes mencionada [71]. Asimismo, Europa, Asia y América del Norte continuarán siendo los líderes del mercado mundial mientras que Oceanía les seguirá de cerca. No obstante, América del Sur y África se quedarán atrasados.

Grandes equipos como BMW, Mercedes, Audi y Tesla ya han implementado la carga inalámbrica en sus modelos. No obstante, otras muchas compañías les están pisando los pies como por ejemplo Volvo. Esta compañía está realizando pruebas con su modelo Volvo XC40 Recharge 100 % eléctrico con sistemas de recarga estáticos. Gracias a la empresa Momentum Dynamics que proporciona plataformas de carga, se está llevando a cabo en Gotemburgo recargas que podrán alcanzar valores de 40 kW (casi cuatro veces más de lo que se consigue con un cargador de carga de corriente alterna de 11 kW). [72]

En lo que concierne al mercado de los camiones eléctricos, se prevé que para 2035 el 50 % de los mismos sean totalmente eléctricos, alcanzando un valor del 85 % en 2040 [16]. Asimismo, “el mercado de camiones eléctricos se valoró en USD 22,63 mil millones en 2021 y se espera que alcance los USD 57,67 mil millones en 2027 registrando una CAGR de 14,30% durante el período de pronóstico (2022 - 2027)” [17].

Uno de los grandes proyectos actualmente que se está llevando a cabo para revolucionar la carga inalámbrica en los camiones eléctricos es un proyecto de la empresa estadounidense Ideanomics Mobility en California. Mediante cargadores de inducción de 500 kW pretenden cargar los camiones en unos 15 minutos. [73]

En cuanto a la carga inalámbrica dinámica, destaca el proyecto de Electreon que consiste en implementar este método de carga en carreteras públicas de Alemania. Para ello, se realizarán pruebas con un autobús eléctrico de empleo público. El Proyecto se divide en dos fases principales: la primera de ellas consiste en 400 metros con dos estaciones de carga implementados, mientras que la segunda fase consiste en 600 metros con estaciones de carga estática pero también se llevará a cabo la carga dinámica. [74]

Otro de los grandes objetivos futuros es la implementación de suficientes puntos de recarga inalámbricos estáticos. En España, se estima mediante un proyecto de ANFAC un número de puntos de recarga de 339.998 construidos en ciudades con más de 100.000 ciudadanos. Esto ha desembocado del análisis estudiado, el cual predice que para 2030 habrá un incremento del número de turismos de hasta 35 veces más que actualmente, siendo esta cifra de tres millones de unidades. [75]

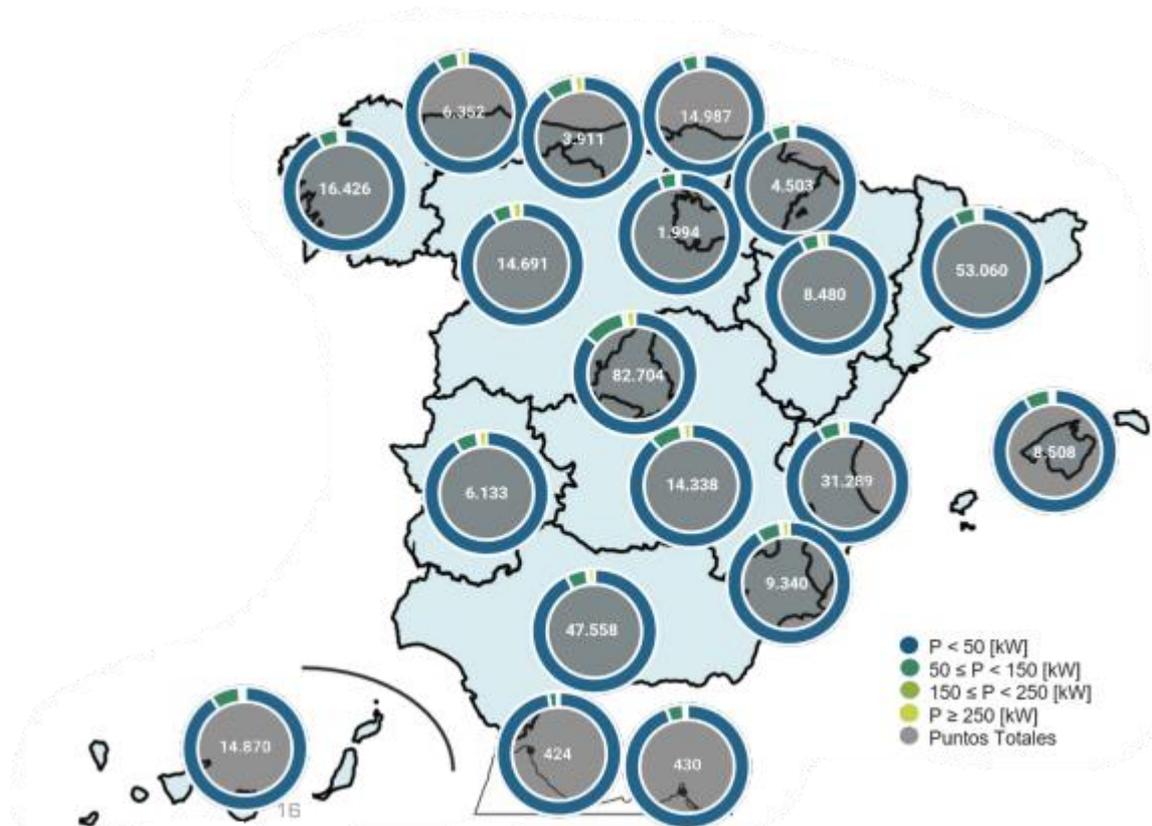


Figura 6-13. Mapa de puntos de carga de la REE prevista para 2030 [75].

Respecto a las baterías, el objetivo es alcanzar dispositivos de poco peso y del mínimo tamaño posible. Además, se pretenden obtener baterías económicas de manera que abaraten los costes de los automóviles eléctricos para que los mismos estén al alcance de todos los ciudadanos y conseguir disminuir los porcentajes de emisiones de dióxido de carbono al mínimo.

Atendiendo a un estudio de la consultora McKinsey&Company, observando la Figura 6-14, podemos comprobar que desde 2010 hasta 2016, el coste de las baterías ha disminuido un 77 %, teniendo un precio de 1.000 \$/kWh y 227 \$/kWh, respectivamente. Asimismo, se espera llegar a precios por debajo de los 100 \$/kWh para 2025 y 2030. [76]

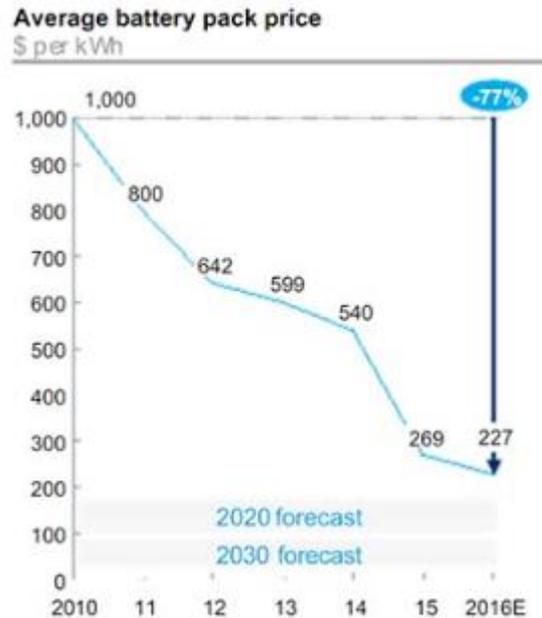


Figura 6-14. Análisis de la evolución del coste de las baterías de los vehículos eléctricos [76].

Por si fuera poco, la energía específica de las baterías también están revolucionando el mercado de los automóviles eléctricos. Las baterías que se emplean actualmente son las de ión-litio, las cuales tienen una energía específica de 265 Wh/kg. Hoy en día ya se están implementando baterías como las LSB de 500 Wh/kg o incluso las metal-aire que llegan a más de 1000 Wh/kg y tienen costes alrededor de los 100 \$/kWh.

Respecto a la vida útil de las mismas, las baterías de litio en general poseen alrededor de 1000 ciclos de carga/descarga. Los resultados futuros estiman que otros tipos de baterías como las Li-aire o las ión sodio multipliquen esta cifra por cuatro o incluso seis veces.

En definitiva, las baterías del futuro se consideran las ion-sodio, las Li-S y las Li-aire, siguiéndoles muy de cerca los dispositivos de Magnesio y de nanocables de Silicio que aún están en desarrollo.

Otro de los puntos clave en cuanto a estos dispositivos es encontrar una manera de reciclarlos al final de su vida útil. Según un estudio de Greenpeace, entre 2021 y 2030 alrededor de 12,85 millones de toneladas de baterías del sector automovilístico será inutilizables y tendrán que ser reemplazadas. Por esta razón, esto conlleva la extracción de 10,35 millones de toneladas de nuevos materiales para crear dispositivos nuevos. Asimismo, el estudio estima que 50.000 toneladas tendrán que ser recicladas en 2027 [77]. Por lo tanto, es necesario fabricar baterías con materiales que no sean nocivos y que sean reciclables al final de su vida útil. Empresas como Tesla tienen propuestas llamativas como emplear la separación física y purificación de materiales para recuperar 1000 kWh aproximadamente de las baterías [77].

Por último, la carga inteligente tendrá ventajas positivas y los sistemas solares serán los más beneficiados. Se podrían integrar mayores cuotas de energía solar a nivel de sistema y red local ajustando la carga para que coincida mejor con la generación de energía solar fotovoltaica e implementando V2G, lo que reduciría la necesidad de inversiones en la red eléctrica.

El futuro está en implementar paneles fotovoltaicos en oficinas y centros comerciales entre otros para que los empleados puedan tener acceso a electricidad renovable gratuita y de esta manera cargar los vehículos eléctricos en el trabajo. Además, se pretende llevar a cabo el autoconsumo para que los ciudadanos empleen la electricidad proveniente de fuentes renovables en sus hogares mediante la tecnología V2H.

En lo que concierne a la energía eólica, se pretende implantar aerogenerados en sistemas de carga inalámbrica dinámica (aunque también es aplicable a la carga inalámbrica estática). El principal objetivo consiste en lograr un sistema óptimo que se adecue a las variaciones de generación de esta energía.

7 CONCLUSIONES

La carga inalámbrica de vehículos eléctricos es una tecnología emergente que está revolucionando el transporte urbano y conlleva un impacto positivo tanto en el medio ambiente como en la calidad de vida de las personas. Esta innovación elimina la necesidad de cables y enchufes al cargar vehículos eléctricos, aumenta la comodidad y la seguridad del usuario y también reduce la huella de carbono del proceso.

Uno de los otros muchos aspectos que están en continua investigación son las baterías, las cuales se pretende incrementar su energía específica, vida útil y eficiencia, así como también, disminuir su peso y tamaño al mínimo. Tras haber estudiado en profundidad las principales características de varios tipos de estos dispositivos, se concluye que entre las baterías futuras destacan Na-ion, Li-S, Mg y Li-aire debido a los resultados tan atractivos que ofrecen.

Respecto a los convertidores de potencia, se ha descrito que el inversor ZVS Full-Bridge es el convertidor de CC-CA que mayor eficiencia proporciona a los sistemas de carga inalámbrica aplicados a automóviles eléctricos. Además, para una mayor optimización, se aconseja emplear convertidores CC-CC bidireccionales Buck-Boost para entregar/proporcionar energía a/desde las baterías.

Para una mayor optimización, se ha planteado la propuesta de implementar una configuración de compensación SPS, es decir, introducir en el circuito un condensador en serie y otro en paralelo en el devanado primario, y un condensador en serie en el devanado secundario. De esta manera, se minimizan los efectos perjudiciales que se han estudiado sobre el desalineamiento de las bobinas y la distancia de las mismas.

Por último, con la finalidad de aprovechar al máximo la energía limpia y sostenible disponible y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles se han planteado sistemas de carga inalámbrica empleando energía solar y eólica. En concreto, para la carga inalámbrica estática se ha propuesto un sistema utilizando placas fotovoltaicas y carga inteligente V2G. El objetivo del planteamiento ha sido llevar a cabo el concepto de autoconsumo con la finalidad de cargar los vehículos con la energía solar que producen los paneles. Asimismo, se propuso hacer uso de baterías para almacenar el excedente de energía renovable y recargar los automóviles durante las horas ausentes de luz solar o en horas de alta demanda de la red eléctrica. Por otro lado, se planteó un sistema de carga inalámbrica dinámica empleando tanto placas fotovoltaicas como aerogeneradores. El objetivo residía en emplear la energía solar durante el día y la eólica durante la noche y, a su vez, hacerlas llegar a las carreteras. Se observó que el principal desafío era la variabilidad de la generación de energía renovable debido a la estrecha dependencia que poseen con la climatología.

REFERENCIAS

- [1] Organización Meteorológica Mundial, “Récord registrado de gases efecto invernadero,” *Ojeando la Agenda*, vol. 20, Nov. 2012.
- [2] Á. Sánchez Bravo, “Cambio Climático y Unión Europea: de Kioto a Doha,” Apr. 2013.
- [3] U. Prieto, “El mundo consume más energía y genera más CO₂,” *Gas Natural*, vol. 152, pp. 36–39, Jul. 2019.
- [4] E. Cerdá Tena, “Transporte y cambio climático,” *Economistas*, vol. 127, pp. 45–52, 2011.
- [5] Parlamento Europeo, “Emisiones de CO₂ de los coches: hechos y cifras (infografía),” Mar. 22, 2019. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia> (accessed Mar. 13, 2023).
- [6] M. E. García de la Rosa, “Sistema de carga para moto eléctrica de 2 kW basado en transferencia inalámbrica de potencia,” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2020.
- [7] edX, “Automóviles eléctricos: Tecnología,” 2022. https://www.edx.org/es/course/automoviles-electricos-tecnologia?index=spanish_product&queryID=b8dff1f8e664b67a791ebfebfc4b166&position=2&link_ed_from=autocomplete (accessed Mar. 13, 2023).
- [8] D. Murias, “Anatomía de un coche eléctrico: su sencilla mecánica, al desnudo,” Apr. 05, 2020. <https://www.motorpasion.com/coches-electricos/anatomia-coche-electrico-su-sencilla-mecanica-al-desnudo> (accessed Mar. 25, 2023).
- [9] hmong, “Tren motriz de vehículo híbrido.” https://hmong.es/wiki/Hybrid_vehicle_drivetrain (accessed Mar. 01, 2023).
- [10] S. D. Roa Melo, “Diseño del tren motriz de un vehículo híbrido todoterreno,” Universidad de los Andes, Bogotá, 2011.
- [11] S. Fernández Munguía, “Camiones eléctricos: así son los planes de los principales fabricantes ante el reto de electrificar el transporte de mercancías por carretera,” Jan. 16, 2020. <https://www.xataka.com/automovil/camiones-electricos-asi-planes-principales-fabricantes-reto-electrificar-transporte-mercancias-carretera> (accessed Mar. 25, 2023).
- [12] Iberdrola, “El vehículo eléctrico, un viaje de más de 200 años de historia.” <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/historia-coche-electrico#:~:text=En%201888%20aparece%20en%20Alemania,alcanzaba%20los%2015%20km%2Fh> . (accessed Apr. 26, 2023).
- [13] V. Fuentes, “Las ventas de coches eléctricos se triplicaron en 2021 en todo el mundo, con China y Europa tirando del carro,” Feb. 04, 2022. <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/ventas-coches-electricos-se-triplicaron-2021-todo-mundo-china-europa-tirando-carro> (accessed Apr. 26, 2023).
- [14] J. J. Castells, “El mercado mundial de coches eléctricos superará los 11 millones en 2035,” Jul. 25, 2018. https://www.hibridosyelectricos.com/coches/mercado-mundial-coches-electricos-superara-11-millones-2035_20671_102.html (accessed Apr. 26, 2023).
- [15] “El 96% de camiones vendidos en Europa en 2020 era diésel, y se matricularon más eléctricos que gasolina,” Mar. 12, 2021. <https://www.europapress.es/motor/sector-00644/noticia-96-camiones-vendidos-europa-2020-era-diesel-matricularon-mas-electricos-gasolina-20210312103602.html> (accessed Apr. 27, 2023).
- [16] C. Noya, “En 2035 el 50% de los camiones vendidos serán eléctricos. En 2040 serán el 85%,” Sep. 21, 2022. <https://forococheselectricos.com/2022/09/camiones-vendidos-seran-electricos-en-2040.html>

- (accessed Apr. 26, 2023).
- [17] MordorIntelligence, “MERCADO DE CAMIONES ELÉCTRICOS: CRECIMIENTO, TENDENCIAS, IMPACTO DE COVID-19 Y PRONÓSTICOS (2022 - 2027).” [https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/electric-truck-market#:~:text=El%20mercado%20de%20camiones%20el%C3%A9ctricos%20se%20valor%C3%B3%20en%20USD%202022,pron%C3%B3stico%20\(2022%20%2D%202027\)](https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/electric-truck-market#:~:text=El%20mercado%20de%20camiones%20el%C3%A9ctricos%20se%20valor%C3%B3%20en%20USD%202022,pron%C3%B3stico%20(2022%20%2D%202027).). (accessed Apr. 27, 2023).
- [18] J. A. Roca, “Volvo Trucks lidera el mercado de camiones eléctricos en Europa con una cuota del 42%,” Feb. 12, 2022. <https://elperiodicodelaenergia.com/volvo-trucks-lidera-el-mercado-de-camiones-electricos-en-europa-con-una-cuota-del-42/> (accessed Apr. 27, 2023).
- [19] N. López Redondo, “Camiones eléctricos: autonomía, precio, tiempos de carga y 7 modelos que pronto estarán a la venta,” Nov. 18, 2022. <https://movilidadelectrica.com/camiones-electricos-2023/> (accessed Apr. 26, 2023).
- [20] L. Shi, “Advanced Wireless Power Transfer Technologies: Reactance Cancelling and Inverse Coupled Current Doubler Rectifier,” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2021.
- [21] G. A. Covic and J. T. Boys, “Inductive Power Transfer,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289, 2013, doi: 10.1109/JPROC.2013.2244536.
- [22] G. García, “La carga inalámbrica ultrarrápida (500 KW) llegará pronto a los coches eléctricos ¡y sin pérdidas!” Mar. 13, 2023. https://www.hibridosyelectricos.com/coches/coches-electricos-dispondran-carga-rapida-inalambrica-sin-perdidas_68691_102.html (accessed Apr. 28, 2023).
- [23] J. A. Roca, “Plugless, el sistema de carga inalámbrica de Evatran para el Tesla Model S,” Aug. 22, 2016. <https://elperiodicodelaenergia.com/plugless-el-sistema-de-carga-inalambrica-de-evatran-para-el-tesla-model-s/> (accessed Apr. 22, 2023).
- [24] I. Martín Barbero, “LA CARGA INALÁMBRICA LLEGA A LOS COCHES DE MERCEDES DE LA MANO DE QUALCOMM,” Dec. 08, 2016. https://cincodias.elpais.com/cincodias/2016/10/11/motor/1476201930_090643.html (accessed Apr. 29, 2023).
- [25] C. Sánchez Criado, “Carga inalámbrica en el BMW 530e iPerformance,” May 17, 2017. <https://movilidadelectrica.com/carga-inalambrica-bmw-530e-iperformance/> (accessed Apr. 28, 2023).
- [26] C. Sánchez Criado, “Toyota Prius Plug-in de cuarta generación, con carga inalámbrica,” Jul. 07, 2014. <https://movilidadelectrica.com/toyota-prius-phev-de-cuarta-generacion-con-carga-inalambrica-video/> (accessed Apr. 28, 2023).
- [27] F. M. González Fernández, “Recarga Autónoma de Coches Eléctricos,” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [28] E. García-Quismondo Hernaiz, “Desarrollo de Baterías Plomo-ácido reguladas por válvula para nuevas aplicaciones de automoción,” Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2010.
- [29] P. Avilés López, “ESTUDIO Y DISEÑO DEL MODELO DE UN CARGADOR PARA BATERÍAS DE LITIO PARA EL USO EN AUTOMOCIÓN,” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2021.
- [30] M. González Valencia and L. A. Trejos Grisales, “Conceptos técnicos para comprender los Sistemas de Gestión de Baterías BMS,” *Vía Innova*, vol. 4, pp. 37–46, 2017.
- [31] M. T. Gil Agustí, L. Zubizarreta Saenz de Zaitegui, V. L. Fuster Roig, and A. Quijano Lopez, “Baterías: Estado actual y futuras tendencias (1ª parte),” 2014.
- [32] V. Quintero, “Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones,” *I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, 2021, doi: 10.33412/idt.v17.1.2907.
- [33] Wikipedia, “Batería de litio-ferrofosfato,” Oct. 15, 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_litio-ferrofosfato (accessed Mar. 13, 2023).
- [34] D. García García, “Qué son las baterías LFP: ventajas, inconvenientes y aplicaciones en la automoción,” Mar. 10, 2022. <https://www.motorpasion.com/revision/que-baterias-lfp-ventajas-inconvenientes->

- aplicaciones-automocion (accessed Mar. 13, 2023).
- [35] J. Mei, E. K. W. Cheng, and Y. C. Fong, "Lithium-titanate battery (LTO) : A better choice for High current equipment," in *International Symposium on Electrical Engineering (ISEE)*, Hong Kong: IEEE, Dec. 2016, pp. 1–4.
- [36] J. Carro Rodríguez, "Baterías Li-S y Supercondensadores," *Ingeniero Marino*. <https://ingenieromarinero.com/baterias-li-s-y-supercondensadores/> (accessed Mar. 13, 2023).
- [37] M. Borràs Argemí and F. Palombarini, "Bateries de liti-sofre el futur de la mobilitat elèctrica?," *Revista de la Societat Catalana de Química*, pp. 52–58, 2021.
- [38] G. García, "Esta es la batería de litio-azufre 'perfecta': multiplica por cinco la autonomía de los vehículos eléctricos," Jan. 26, 2022. https://www.hibridosyelectricos.com/coches/bateria-litio-azufre-perfecta-multiplica-autonomia-vehiculos-electricos_53394_102.html (accessed Mar. 13, 2023).
- [39] Wikipedia, "Batería de nanocables," Jan. 15, 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_nanocables (accessed Mar. 13, 2023).
- [40] D. Plaza, "Una batería eterna gracias a electrodos de nanocables gelificados, ¿demasiado bonito para ser verdad?," Jan. 17, 2023. <https://forococheelectricos.com/2023/01/bateria-eterna-electrodos-nanocables-gelificado.html> (accessed Mar. 13, 2023).
- [41] E. Iruin Amatriain, "Desarrollo de baterías secundarias de zinc-aire con electrolitos acuosos alternativos," Universitat Autònoma de Barcelona, 2020.
- [42] M. T. Gil Agustí, L. Zubizarreta Saenz de Zaitegui, V. L. Fuster Roig, and A. Quijano Lopez, "Baterías del futuro: retos y proyección," 2017.
- [43] Wikipedia, "Batería de aluminio-aire," May 26, 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_aluminio-aire (accessed Mar. 13, 2023).
- [44] Extrual, "¿Son las baterías Aluminio-Aire el futuro?" <http://www.extrual.com/es/noticias/son-las-baterias-aluminio-aire-el-futuro> (accessed Mar. 13, 2023).
- [45] Wikipedia, "Batería de sal fundida," Jan. 15, 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_sal_fundida (accessed Mar. 13, 2023).
- [46] G. García, "Esta revolucionaria batería de sodio y azufre ofrece una alta capacidad a un precio reducido," Dec. 12, 2022. https://www.hibridosyelectricos.com/coches/revolucionaria-bateria-sodio-azufre-alta-capacidad-precio-reducido_65818_102.html (accessed Mar. 13, 2023).
- [47] J. Martínez de Ilarduya Martínez de San Vicente, "Na-ion battery development from electrode processing studies to heat generation model of a monolayer pouch cell," Universidad del País Vasco = Euskal Herriko Unibertsitatea, Vitoria-Gasteiz, 2019.
- [48] R. Vidal Cañas, "Mejoras en los electrodos para baterías de flujo redox de vanadio para el almacenamiento de energía," 2018.
- [49] D. D. Oramas Proaño, C. F. Garzón Muñoz, J. E. Guasumba Maila, and S. S. Cepeda Camacho, "Descripción de las características de los diferentes tipos de baterías utilizadas en los vehículos eléctricos," *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, vol. 7, no. 4, 2022.
- [50] E. C. Pérez Lobo, "Estudio de los supercondensadores y su viabilidad como sistema de almacenamiento energético en instalaciones fotovoltaicas Proyecto Fin de Carrera," Sevilla?, 2016.
- [51] J. R. Vaello Sancho, "Principios de funcionamiento del motor de corriente continua." <https://automatismoindustrial.com/curso-carnet-instalador-baja-tension/motores/1-3-5-motores-de-corriente-continua/1-3-5-2-principios-de-funcionamiento/> (accessed Mar. 13, 2023).
- [52] D. Plaza, "¿Qué es el inversor de un coche eléctrico y por qué es tan importante?" <https://www.motor.es/que-es/inversor-coche-electrico> (accessed Mar. 02, 2023).
- [53] Á. Bellver Valera, "Análisis y diseño de un control electrónico aplicado a un vehículo eléctrico," 2020.
- [54] A. García Bragado, "ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO ELEVADOR

- PWM,” UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Madrid, 2010.
- [55] Irena, “Perspectivas de innovación: Carga inteligente para vehículos eléctricos,” Abu Dabi, 2019.
- [56] A. Soler, “Los coches eléctricos dispararán el negocio de la carga inalámbrica,” Sep. 23, 2018. https://www.hibridosyelectricos.com/coches/coches-electricos-dispararan-negocio-carga-inalambrica_21950_102.html (accessed Apr. 17, 2023).
- [57] B. Alberdi Esuain, “Estudio de un convertidor resonante para la carga de vehículos eléctricos,” UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, 2019.
- [58] “OLEV: un tren chu-chú inaugura la era de los vehículos eléctricos en línea,” Mar. 10, 2010. <https://www.lainformacion.com/opinion/futuretech/olev-un-tren-chu-chu-inaugura-la-era-de-los-vehiculos-electricos-en-linea/1894/> (accessed Apr. 18, 2023).
- [59] J. L. Villa Gazulla, “Sistemas de Transferencia de Energía para Vehículos Eléctricos mediante Acoplamiento Inductivo,” Universidad de Zaragoza, 2009.
- [60] R. Bosshard, “Multi-Objective Optimization of Inductive Power Transfer Systems for EV Charging,” Switzerland, 2015.
- [61] A. Trenchs Magaña, “Diseño de un Convertidor DC/DC Auxiliar para un Vehículo Eléctrico,” 2011.
- [62] “Plugless Power: recarga inalámbrica a prueba en el Chevrolet Volt,” Aug. 04, 2011. <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/plugless-power-recarga-inalambrica-a-prueba-en-el-chevrolet-volt> (accessed Apr. 22, 2023).
- [63] “Así es el cargador inalámbrico de Qualcomm - canalMOTOR,” Aug. 08, 2017. <https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/asi-es-el-cargador-inalambrico-de-qualcomm/> (accessed Apr. 22, 2023).
- [64] J. A. Roca, “WiTricity desarrollará en EEUU estaciones de carga inalámbrica para una selección de vehículos,” Mar. 01, 2022. <https://elperiodicodelaenergia.com/witricity-desarrollara-en-eeuu-estaciones-de-carga-inalambrica-para-una-seleccion-de-vehiculos/> (accessed Apr. 22, 2023).
- [65] G. García, “La recarga inalámbrica, una opción demandada por los propietarios de un coche eléctrico,” Jun. 06, 2022. https://www.hibridosyelectricos.com/coches/recarga-inalambrica-opcion-demandada-propietarios-coche-electrico_58764_102.html (accessed Apr. 22, 2023).
- [66] “Adiós a la ansiedad que provoca la autonomía del coche eléctrico: las carreteras con recarga en movimiento ya existen y Stellantis tiene una,” *Sanz Bartolomé, Elena*, Dec. 17, 2021. <https://www.diariomotor.com/electricos/tecnologia/carretera-recarga-induccion-coches-electricos-stellantis/> (accessed Apr. 22, 2023).
- [67] L. Ojea, “Los coches eléctricos que se carguen con energía solar serán 11 veces más limpios, con eólica 85 veces- El Periódico de la Energía,” Sep. 21, 2016. <https://elperiodicodelaenergia.com/los-coches-electricos-que-se-carguen-con-energia-solar-seran-11-veces-mas-limpios-con-eolica-85-veces/> (accessed Apr. 26, 2023).
- [68] M. Cárdenas Durán, “Gestión de almacenamiento para integrar eficientemente paneles fotovoltaicos y vehículos eléctricos en recintos comerciales,” Sevilla, 2020.
- [69] P. Frías Marín, C. Mateo Domingo, and J. I. Pérez Arriaga, “Evaluación del impacto de la integración del coche eléctrico en las redes de distribución de energía eléctrica,” *Lychmos*, vol. 6, pp. 56–61, 2011.
- [70] J. A. Carballo López, “Modelado y optimización para una gestión eficiente de recursos en tecnología termosolar,” Universidad de Almería, 2019.
- [71] “EL MERCADO DE CARGA INALÁMBRICA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ESTARÁ VALORADO EN 2.744 MILLONES PARA 2030,” Oct. 19, 2022. <http://apmc.cat/apmc/el-mercado-de-carga-inalambrica-de-vehiculos-electricos-estara-valorado-en-2-744-millones-para-2030/> (accessed Apr. 29, 2023).
- [72] el Economista es, “Volvo prepara la carga inalámbrica de las baterías,” *El Economista*, ContentEngine LLC, a Florida limited liability company, Madrid, 2022.

- [73] S. C., “¿Solo 15 minutos para recargar (sin cable) un camión eléctrico? En EE.UU. lo han logrado,” Jan. 03, 2023.
- [74] D. Plaza, “En marcha el primer proyecto de carretera pública con recarga inalámbrica para vehículos eléctricos,” Dec. 29, 2022. <https://forococheselectricos.com/2022/12/proyecto-carretera-publica-recarga-inalambrica-vehiculos-electricos.html> (accessed Apr. 29, 2023).
- [75] B. Sala Saura, “Análisis comparativo de los vehículos de hidrógeno y los vehículos eléctricos Trabajo Fin de Grado,” Sevilla, 2022.
- [76] C. Sánchez Criado, “La rentabilidad de los coches eléctricos depende del precio de las baterías,” Feb. 01, 2017. <https://movilidadelectrica.com/la-rentabilidad-de-los-coches-electricos/> (accessed Apr. 29, 2023).
- [77] E. Martín, “Millones de baterías de coches eléctricos llegarán al final de su vida útil en la próxima década: el reciclaje será clave,” Aug. 23, 2021. motorpasion.com/futuro-movimiento/millones-baterias-coches-electricos-llegaran-al-final-su-vida-util-proxima-decada-reciclaje-sera-clave (accessed Apr. 29, 2023).

