



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

# Análisis sobre las plataformas de coches eléctricos.

AUTOR: Miguel Moreno de Miguel

DIRECTOR: Juan José Serrano Martín

Curso Académico: 2020 – 2021

Valencia, Septiembre de 2021



## Agradecimientos

En este apartado no puedo olvidarme de todas aquellas personas e Instituciones que han contribuido a la realización de este trabajo fin de Máster titulado “Análisis sobre las Plataformas de Coches Eléctricos”.

En primer lugar, quiero mencionar y agradecer a la Universidad Politécnica de Valencia en donde cursé el Máster de Mecatrónica, dependiente de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID) y al cuerpo de profesores de las distintas materias impartidas, sin los cuales hubiera sido imposible adquirir los conocimientos que me abrieron oportunidades en el mundo profesional.

De la misma manera, y de forma muy especial, he de mencionar a D. Juan José Serrano, tutor en este Trabajo Fin de Máster que, aún a distancia y con las complicaciones que el estado de pandemia nos ha causado, ha mantenido el interés y profesionalidad en la dirección, seguimiento y tutela del trabajo. Sin su colaboración no hubiera sido posible su realización.

Y no puedo dejar de mencionar a los amigos y familiares que me han acompañado en el tiempo de realización de este trabajo. Amigos que han entendido mi esfuerzo en los últimos meses y me han animado en el trayecto. Y a mi familia que, con su ayuda y apoyo incondicional han permitido que me dedicara en profundidad a la realización del trabajo, acompañándome y dándome su apoyo en todo momento.

Con todo, tengo el gusto de presentar este trabajo al cuerpo de profesores que forman este [tribunal para su aprobación y valoración.

Muchas gracias



## Resumen

El problema del cambio climático es algo que afecta a todo el mundo y cada vez es más preocupante debido a los niveles de contaminación que se están alcanzando. Por este motivo, desde los gobiernos, se está presionando para reducir las emisiones de los vehículos. Esto hace que cada vez se estén desarrollando más tecnologías alternativas aplicables a los coches eléctricos para sustituir a los que utilizan un motor de combustión interna.

En este trabajo se realiza un pequeño análisis económico comparando las diferencias de costes que existen entre las dos tecnologías. En él se puede ver que actualmente los vehículos eléctricos son más caros debido, en gran parte, a los precios de las baterías. También se hace una estimación de cuándo estos costes puedan llegar a igualarse.

A continuación, se profundiza en las distintas plataformas que las marcas automovilísticas están desarrollando para sus futuros modelos eléctricos. Algunas de ellas ya comercializadas, como en el caso de Volkswagen. Dentro de estas plataformas se pueden apreciar las diferencias en su configuración y diseño que han sido desarrolladas por cada uno de los fabricantes como pueden ser la disposición de los motores, la estructura de las baterías, la tensión y potencia de estas, su autonomía...

Así mismo, se explican cuáles son los elementos eléctricos y electrónicos más importantes que incorporan este tipo de vehículos: sistemas de monitorización de baterías, supercondensadores, convertidores de potencia, además de las baterías. Se está investigando mucho en la mejora de estas piezas por lo que se conseguirá un incremento de su autonomía, factor clave de este sector, así como de sus prestaciones.

## Abstract

The problem of climate change is something that affects the whole world and is becoming increasingly worrying due to the levels of pollution that are being reached. For this reason, governments are pushing to reduce vehicle emissions. This means that more and more alternative technologies applicable to electric cars are being developed to replace those that use an internal combustion engine.

In this paper a economic analysis is carried out comparing the cost differences between the two technologies. It shows that electric vehicles are currently more expensive, largely due to battery prices. It also makes an estimate of when these costs might even out.

It then goes into the different platforms that car brands are developing for their future electric models. Some of them are already on the market, as in the case of Volkswagen. Within these platforms, the differences in their configuration and design that have been developed by each of the manufacturers can be appreciated, such as the layout of the motors, the structure of the batteries, their voltage and power, their autonomy, etc.

It also explains the most important electrical and electronic elements incorporated in this type of vehicle: battery monitoring systems, supercapacitors, power converters, as well as batteries. A lot of research is being carried out to improve these parts, which will lead to an increase in their autonomy, a key factor in this sector, as well as in their performance.

## Lista de acrónimos

ACRONIMOS	SIGNIFICADO
ERS	Energy Recovery System
BMS	Battery Monitor System.
MEB	Modular Electrification Toolkit
MLB EVO	Plataforma Modular Longitudinal
PPE	Premium Platform Electric
TNGA	Toyota New Global Architecture Plataforma modular grupo Toyota para coches híbridos
E-TNGA	Toyota New Global Architecture. Plataforma modular grupo Toyota para coches eléctricos
CMF-EV	Common Module Family -Electric Vehicle. Plataforma grupo Renault
E-GMP	Electric Golbal Modular Platform. Plataforma Grupo Hyundai
EVMP	Electric Vehicle Modular Platform. Plataforma Grupo Psa
PEC	Control de electrónica de potencia
GIST	Instituto de Ciencia y Tecnología de Gwngju
SOC	Estado de carga de las celdas
SOH	Estado de salud de las celds
EKF	Extended Kalman Filter
ANN	Artificial Neuronal Network
ADC	Analog Digital Converter
SPI	Serial Peripheral Interface
WBMS	BMS inalámbricos
OTA	Over the air
NTC	Negative Temperature Co-efficient
AC	Motor de corriente alterna
DC	Motor de corriente continua
BLDC	Motor DC sin escobillas
SRM	Motores de reluctancia conmutados
EMI	Interferencias electromagnéticas

# Índice

Agradecimientos .....	iii
Resumen.....	v
Abstract .....	vi
Lista de acrónimos .....	vii
Índice .....	viii
Lista de figuras .....	ix
1. Introducción .....	11
1.1. Normativas .....	14
2. Tipos de plataformas.....	16
2.1. Grupo Volkswagen .....	19
2.2. Grupo Toyota .....	22
2.3. Grupo Renault .....	23
2.2. General Motors (GM).....	24
2.5. Grupo Hyundai .....	26
2.6. Grupo PSA (Stellantis N.V.).....	28
2.7. Empresas independientes .....	29
3. Elementos de las plataformas eléctricas.....	32
3.1. Acumuladores .....	33
3.1.1. Baterías de ion-litio .....	33
3.1.2. Supercondensadores.....	41
3.2 BMS (Battery Management System).....	46
3.2.1. Adquisición de datos .....	53
3.2.2. BMS inalámbricos (WBMS) .....	59
3.3. Motores eléctricos .....	64
3.3.1. Motores de corriente continua .....	66
3.3.2. Motores de corriente alterna.....	68
3.3.3. Comparación entre motores .....	70
3.4. PEC (Power Electronics Controller) .....	73
4. Conclusiones.....	79
Bibliografía .....	80

## Lista de figuras

Figura 1: Evolución del vehículo eléctrico [2] .....	11
Figura 2: Expectativas de ventas vehículos híbridos y eléctricos.....	12
Figura 3: Primer coche Tesla, Roadster.....	13
Figura 4: Vehículos eléctricos de competición. Formula E y Extreme E.....	13
Figura 5: Porcentajes de ventas en 2020 .....	16
Figura 6: Diferencia de costes entre tecnologías .....	17
Figura 7: Reducción de costes.....	18
Figura 8: Previsión de estimación de costes en 2025 .....	18
Figura 9: Plataforma MEB grupo VW .....	19
Figura 10: Prototipo Seat El-Born.....	20
Figura 11: Prototipo Cupra Tavascan .....	20
Figura 12: Plataformas que implementará Audi .....	21
Figura 13: Plataforma e-TNGA de Toyota [16].....	22
Figura 14: Plataforma CMF-EV de Renault.....	23
Figura 15: Plataforma del grupo GM.....	24
Figura 16: Configuraciones de la unidad de potencia de GM .....	25
Figura 17: Plataforma E-GMP del grupo Hyundai. ....	26
Figura 18: Motor eléctrico diseñado por Hyundai .....	27
Figura 19: Plataforma eVMP del grupo PSA.....	28
Figura 20: Las tres plataformas propuestas por REE.....	29
Figura 21: Despiece de REECorner .....	30
Figura 22: Sistema de gestión de REE .....	31
Figura 23: Elementos que constituyen un vehículo eléctrico .....	32
Figura 24: Diferencias entre los tipos de baterías de Ion Litio.....	34
Figura 25: Estructura interna de una celda de ion Litio .....	35
Figura 26: Celda 4680 de Tesla.....	36
Figura 27: Estructura honeycomb para almacenar celdas.....	37
Figura 28: Materiales útiles para los ánodos .....	37
Figura 29: Estimación densidad de potencia de baterías con electrolito líquido .....	38
Figura 30: Diferencia entre baterías de estado sólido y de electrolito líquido .....	39
Figura 31: Formación de dendritas .....	39
Figura 32: Estructura de un supercondensador.....	42
Figura 33: Tipos de supercondensadores.....	43
Figura 34: Sistema híbrido con baterías y supercondensadores .....	44
Figura 35: Control del sistema híbrido .....	44
Figura 36: Comparación de comportamiento entre una batería y el sistema híbrido .....	45
Figura 37: Curva de tensión de una celda en función de la temperatura.....	46
Figura 38: Balanceo con resistencias de descarga .....	48
Figura 39: Balanceo con condensadores.....	48
Figura 40: Balanceo utilizando convertidores.....	49
Figura 41: BMS con balanceo de convertidores.....	49
Figura 42: Sistema de control de balanceo .....	50
Figura 43: Estructura general de un BMS.....	51
Figura 44: Modelado de simulación para BMS predictivo .....	52
Figura 45: Ecuaciones para obtención del error .....	53

Figura 46: Resultados de las simulaciones .....	53
Figura 47: Microcontrolador Infineon Technologies TLE9012AQU.....	54
Figura 48: Microcontrolador STM L9963 .....	55
Figura 49: Microcontrolador Maxim Integrated MAX17853 .....	56
Figura 50: Sensor de temperatura NTC.....	57
Figura 51: Sensor de corriente Hall .....	58
Figura 52: Medición de corriente por una resistencia “shunt” .....	58
Figura 53: Cloud BMS de ION Energy .....	60
Figura 54: BMS cableado frente a BMS inalámbrico.....	61
Figura 55: Chip Texas Instruments CC2662R-Q1.....	62
Figura 56: Sistema BMS inalámbrico usando el chip CC2662R-Q1 .....	63
Figura 57: Comparación prestaciones motor eléctrico vs combustión .....	64
Figura 58: Explosionado de motor con escobillas.....	66
Figura 59: Estructura interna motor BLCD .....	67
Figura 60: Explosionado motor inducción.....	68
Figura 61: Curva par/velocidad de un motor asíncrono en arranque directo .....	69
Figura 62: Motor síncrono de imanes permanentes.....	69
Figura 63: Ejemplo motor SMR .....	70
Figura 64: Comparación densidad de potencia.....	71
Figura 65: Comparación eficiencia energética .....	71
Figura 66: Comparación de costes .....	72
Figura 67: Esquema sistema de potencia del coche eléctrico .....	73
Figura 68: Distintos tipos de convertidores .....	74
Figura 69: Esquema Boost converter .....	75
Figura 70: Esquema Interleaved 4-Phase Boost Converter.....	76
Figura 71: Esquema Full Bridge Boost Converter.....	76
Figura 72; Esquema del sistema PEC.....	77
Figura 73: Gráficas del sistema PEC .....	78

# 1. Introducción

El comienzo de la automoción se puede remontar al año 1769, cuando Nicolas-Joseph Cugnot construyó el primer vehículo propulsado por vapor. En 1770 fabricó un segundo modelo, que podía alcanzar los 4 km/h y, además, era de mayor tamaño.

El motor de combustión interna, utilizando gasolina, lo patentó el inventor Siegfried Marcus en 1883. Pero no fue hasta 1885, en Mannheim, cuando Karl Benz construyó el primer automóvil propulsado por gasolina, cuya producción comenzó en 1888. Así mismo, en 1896, Henry Ford construye su primer vehículo a motor cuadríciclo y realiza las primeras pruebas dinámicas

Entre medias de estas fechas, algunos investigadores también trabajaban sobre la idea de un coche eléctrico. Robert Anderson, entre el 1832 y 1839, inventó el que sería el primer, y muy básico, vehículo propulsado mediante electricidad, utilizando celdas eléctricas no recargables [1]. Este prototipo contaba con algunas ventajas en comparación con los otros modelos: Era más ligero que el vehículo de vapor y también más silencioso. Pero el principal problema de éste era su corta autonomía, inconveniente que encontramos también en los coches eléctricos de la actualidad.

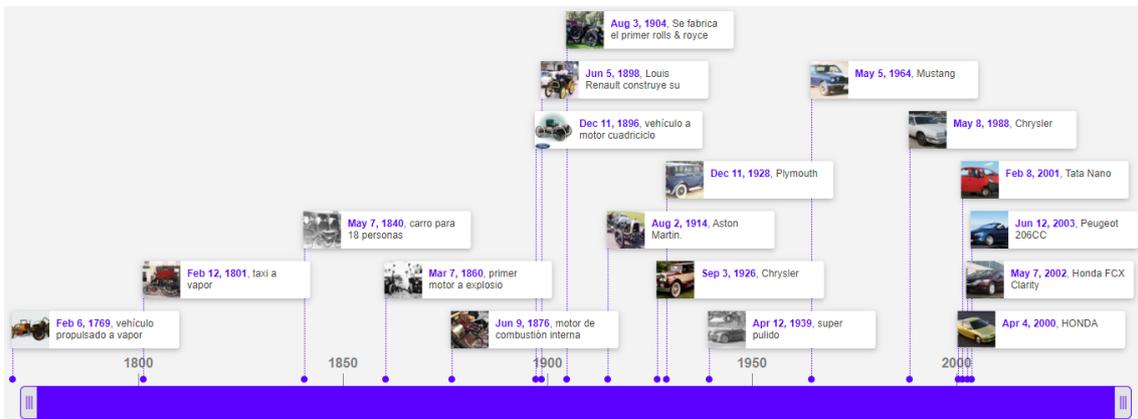


Figura 1: Evolución del vehículo eléctrico [2]

A partir de estos inicios, el mundo del automóvil ha sufrido una evolución constante, tanto en medidas de seguridad pasivas como activas. También en las ayudas a la conducción, en el sistema de infoentretenimiento, que cada vez nos hace estar más conectados con nuestro vehículo, y en otras muchas cosas.

Actualmente nos encontramos en una época de transición hacia combustibles más sostenibles y limpios, ya que los más usados hoy en día provienen de restos fósiles no renovables y altamente contaminantes. Desde hace unos años se están volviendo más populares los vehículos híbridos o completamente eléctricos, aunque todavía la mayoría de las ventas son de vehículos 100% de combustión interna, tal y como se ve en la siguiente imagen [3]. Se prevé que sigan siendo mayoritarios a pesar del aumento de las ventas de híbridos y eléctricos.

Anexo 1: Se espera que el crecimiento de vehículos híbridos y eléctricos se acelere (millones de unidades) <sup>1</sup>

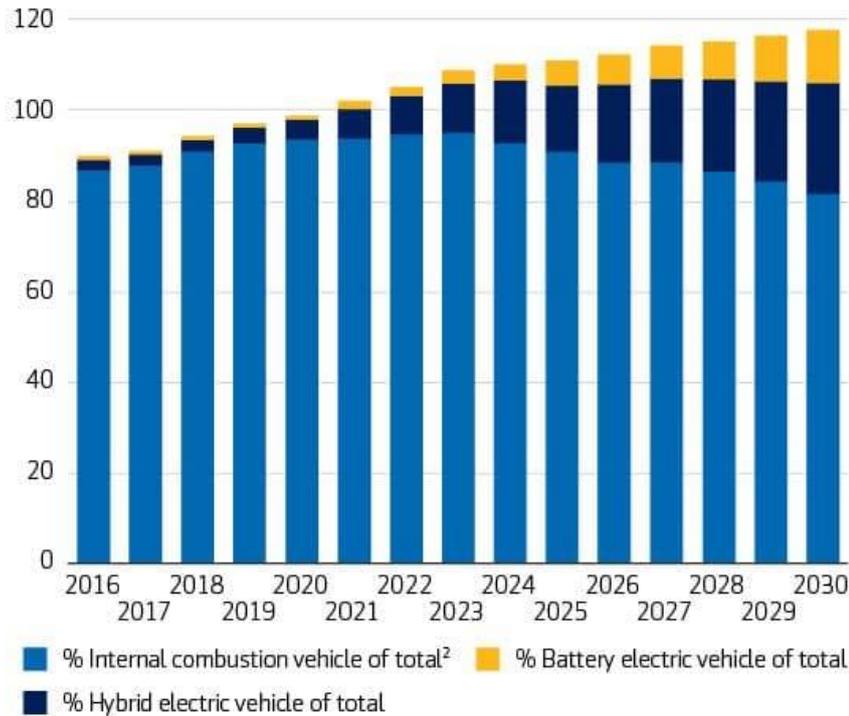


Figura 2: Expectativas de ventas vehículos híbridos y eléctricos

Sin embargo, las tecnologías híbridas no son algo de los últimos años. En 1900 Ferdinand Porsche se asoció con un constructor de carruajes y añadió, a un vehículo con propulsor de combustible de cuatro cilindros, una batería de 50 voltios, un generador y dos motores eléctricos para crear el primer vehículo híbrido que circuló por las calles [4]. Cada motor desarrollaba 7 CV durante 20 minutos. Su autonomía era de 50 km y alcanzaba los 50 km/h. Una cifra excelente teniendo en cuenta que pesaba una tonelada.

El primer vehículo híbrido que se fabricó en serie, no como los casos anteriores, es el Toyota Prius que fue lanzado en Japón en 1997. Posteriormente se comenzó la fabricación en serie y, a nivel mundial, en el año 2000. El gran mérito de este coche fue demostrar que existía una alternativa razonable al tradicional vehículo de motor 100% eléctrico. A partir de éste se ha ido desarrollando y fomentando más este tipo de coches híbridos en la mayoría de las marcas. Incluso en el mundo de los superdeportivos en los que se pueden ver marcas como Ferrari con el LaFerrari, que combina un motor térmico V12 con un motor eléctrico para sumar una potencia total de 963 CV. También hay otros como el McLaren P1 o el Porsche 918 Spyder [5].

Pero el avance no se queda solo en los coches híbridos. Cada vez está más presente la fabricación de vehículos 100% eléctricos en las Empresas automovilísticas. En este sentido Tesla, compañía estadounidense, hace mucho hincapié y es la única que solo vende automóviles de este tipo. Este avance se debe fundamentalmente a las presiones y medidas que están ejerciendo los gobiernos de la mayoría de los países para que las compañías

desarrollen este tipo de vehículos. También ofrecen ayudas y ofertas a los clientes que los adquieren ya que, hoy en día, estos vehículos siguen siendo más caros que el resto.



Figura 3: Primer coche Tesla, Roadster

Además, estos avances no solo se encuentran en el mercado orientado a particulares. En el mundo de la competición también se están implementando estas tecnologías de propulsión híbrida o completamente eléctrica, como son los casos de la Formula 1 que utilizan ayuda eléctrica con el ERS (anteriormente conocido como KERS), y otras competiciones como la Formula E, Extreme E o MotoE World Cup en las cuales solo utilizan propulsión eléctrica. Son competiciones bastante novedosas y que tienen un gran futuro por delante dada la innovación y desarrollo que aportan al mundo del automovilismo.



Figura 4: Vehículos eléctricos de competición. Formula E y Extreme E

Pero, aunque se está incentivando mucho el uso de este tipo de vehículos, se pueden encontrar varias ventajas e inconvenientes a la hora de decidirte por su compra [6]. Entre las ventajas que este tipo de vehículos ofrecen, la más importante es la conciencia con el medio ambiente ya que no se quema combustible y, por lo tanto, no emite CO<sub>2</sub>. También es importante la eficiencia de estos coches y, en consecuencia, el ahorro que generan. El coste de electricidad para 100 km de recorrido se encuentra en torno al euro, gracias a la eficiencia de sus motores de cerca del 90%. Esto frente al gasto de los motores térmicos que cuestan en torno a 8€ por cada 100 km, ya que su eficiencia energética es del 30% aproximadamente. Otras ventajas que encontramos son lo silenciosos que son durante la marcha, un menor gasto de mantenimiento y el aumento de espacio, del cual hablaremos más adelante, al eliminar los grandes elementos como motor y caja de cambios.

Junto con estas ventajas, que son muy importantes, encontramos también algunos inconvenientes como, por ejemplo, el mayor desembolso inicial a la hora de comprar un vehículo de este tipo, ya que son bastante más caros que los tradicionales, aun considerando las ayudas y subvenciones que dan los distintos gobiernos. Otro de los problemas es la escasa autonomía que estos vehículos aportan. Aunque Tesla tiene un modelo con una autonomía de 600 km, la mayoría de los modelos se quedan en los 450 km. Esto, junto a la escasez de infraestructura para cargarlos y la lentitud de tiempo de carga, hace que sea un hándicap a la hora de decidir la compra de un vehículo de estas características. En este sentido, aunque existen puntos de carga rápidos, no es aconsejable usarlos de manera continua.

En estos inconvenientes están trabajando las distintas compañías automovilísticas para hacer más accesible la compra de este tipo de vehículos. Entre otras cosas, se están desarrollando plataformas comunes que permitirán abaratar costes, mejorar la capacidad de las baterías para aumentar la autonomía y mejorar los BMS para evitar un desgaste excesivo de estas, las baterías. Y esto es lo que se va a explicar más adelante.

## 1.1. Normativas

Dada la situación geográfica en la que estamos y que es el continente que más está apostando por las limitaciones en el ámbito de contaminación de los combustibles fósiles, hay que hablar de las normas que afectan a Europa. A principios del 2021 se implementó la norma Euro 6d. Esta norma ya les costó a los fabricantes cumplir con los plazos para adaptarse a las nuevas medidas de contaminación. A finales de este año (2021) se aprobará la norma Euro 7, que intentará controlar la cantidad de gases contaminantes emitidos a partir de 2025 [7].

En la norma Euro 6d los límites para emisiones de partículas NO<sub>x</sub> son de un máximo de 60 mg/km para los coche de motor de gasolina y de 80 mg/km para los que utilizan motores diésel. Como se ha comentado, estos niveles de partículas ya han sido bastante complicados de alcanzar para las marcas de automóviles, pero Europa va a presionar mucho más con la nueva norma. Para 2025 quieren que, para ambos combustibles, la cantidad máxima de partículas emitidas sea de 30 mg/km e incluso se está planteando, en algunos casos, reducirlo a 10 mg/km

Otro de los requisitos que se quieren incluir en la norma Euro 7, es la de implementar un sistema de monitorización y diagnóstico que analice las emisiones que está produciendo el vehículo [8]. Estas mediciones no solo se tienen que hacer en parado, sino que se tiene que hacer también en circulación, para evitar que se cometan trampas como pasó en el caso de “DieselGate”. Además de este sistema también se quieren introducir mejoras en los sistemas de escapes como catalizadores o filtros de partículas, todo esto encarecería el precio de los coches de combustión interna, haciendo que en algunos casos se dejaran de fabricar por no cubrir los costes.

Esta norma no está totalmente cerrada y se encuentra en negociaciones con las principales marcas europeas para llegar a un acuerdo que no sea tan exigente. Pese a que todavía no es definitivo, viendo los niveles que se están barajando y cuál es la tendencia de las políticas respecto a la contaminación, hay algunas marcas como Audi, y en consecuencia todo el grupo VW, que van a parar su desarrollo de motores de combustión tanto de gasolina como diésel.

Aunque hay algunos desarrollos que utilizan medios de propulsión menos contaminantes como los de gas natural o los microhíbridos, no podrán cumplir con las exigencias de la norma, lo que hace más necesario el desarrollo de los vehículos completamente eléctricos.

## 2. Tipos de plataformas

En este avance hacia la electrificación de los coches, los fabricantes se llegaron a plantear dos posibles estrategias. Una de ellas es el desarrollo de plataformas destinadas a coches 100% eléctricos que no admitieran motores de combustión interna en su estructura. En ellas se centra este trabajo. Y otra, el desarrollo de plataformas multitecnología que les permitieran usar la misma estructura para vehículos de motor de combustión únicamente, de tecnología híbrida o de propulsión 100% eléctrica [9].

Hay algunas marcas automovilísticas que en la actualidad han optado por usar las plataformas multitecnología ya que les permiten, en una misma estructura ya desarrollada, montar distintos tipos de propulsores en función de los pedidos de cada cliente. Entre los fabricantes que han decidido optar por esta opción se encuentra BMW [10] o el grupo Stellantis N.V. (Peugeot, Citroën, Fiat, Opel, ...) cuya intención es seguir con estas plataformas hasta 2025.

Pero, ¿por qué no comenzar antes con las plataformas eléctricas? Como se observa en la gráfica de la imagen Figura 5 la venta de coches eléctricos todavía es muy baja. Pongamos de ejemplo las ventas de coches el año anterior (2020) en España. Aunque ha sido un año castigado por la pandemia del coronavirus, y la venta total ha disminuido respecto a 2019, la venta de coches con propulsión alternativa ha sido de 191.742 unidades, teniendo así una cuota de mercado del 22., % del total y suponiendo un crecimiento del 30% [11].

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	2020
GASOLINA	53,9%	55,6%	55,2%	59,5%	50,5%	52,5%	53,4%	51,9%	46,4%	45,5%	43,6%	40,8%	49,8%
DIÉSEL	27,7%	27,9%	24,8%	29,1%	31,2%	29,4%	26,3%	27,5%	29,1%	28,7%	27,8%	26,1%	27,7%
ALTERNATIVOS	18,4%	16,5%	20,0%	11,4%	18,3%	18,1%	20,3%	20,7%	24,6%	25,8%	28,6%	33,1%	22,5%

Figura 5: Porcentajes de ventas en 2020

Dentro de este porcentaje hay que incluir a los distintos tipos de automóviles alternativos como son los híbridos, híbridos enchufables, eléctricos y pila de hidrogeno. La mayoría de las ventas han sido de las dos primeras tecnologías, dado que son las más competitivas actualmente, dejando al coche eléctrico con un total de ventas de 17.925, que supone un 2,11% del mercado total. En España al coche eléctrico todavía le queda mucho camino por recorrer, pero sí que se nota un crecimiento importante respecto al año anterior, llegando casi a duplicar los datos del año anterior, un 78,4% para ser exactos.

Dado que las ventas de los vehículos eléctricos por ahora son bajas, hay algunas empresas, como las ya indicadas anteriormente, que prefieren esperar a que aumenten y, en ese momento lanzar sus plataformas 100% eléctricas. Este lanzamiento exponencial se prevé para 2025, dado que existen análisis económicos que indican que para esa fecha el coste de fabricación de un coche eléctrico será equiparable al de uno de combustión.

Uno de estos estudios es el publicado en McKinsey & Company en 2019 titulado “Making electric vehicles profitable” [12], escrito por varios trabajadores como Yeon Baik, Russel Hansley, etc. Todos ellos expertos en el mundo de la automoción. En este artículo analizan los costes actuales de los coches eléctricos indicando que, en la mayoría de los casos, este coste elevado está causado por las baterías que, hoy en día, son muy caras.

**Cost walk of ICE<sup>1</sup> to electric-vehicle (EV) C-Car in 2019,**  
estimated average per vehicle, \$ thousand

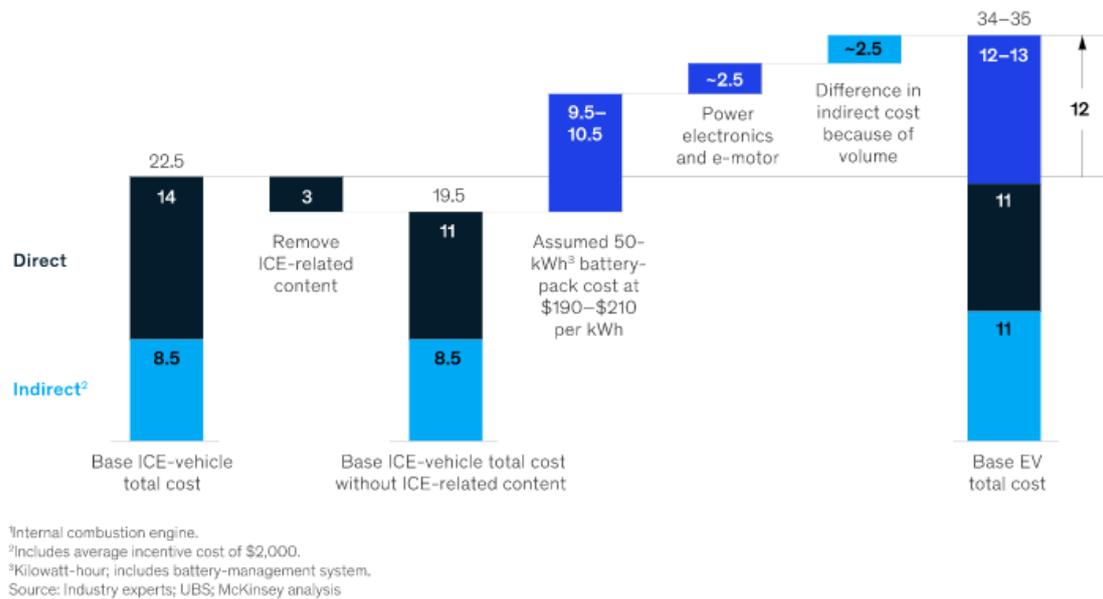


Figura 6: Diferencia de costes entre tecnologías

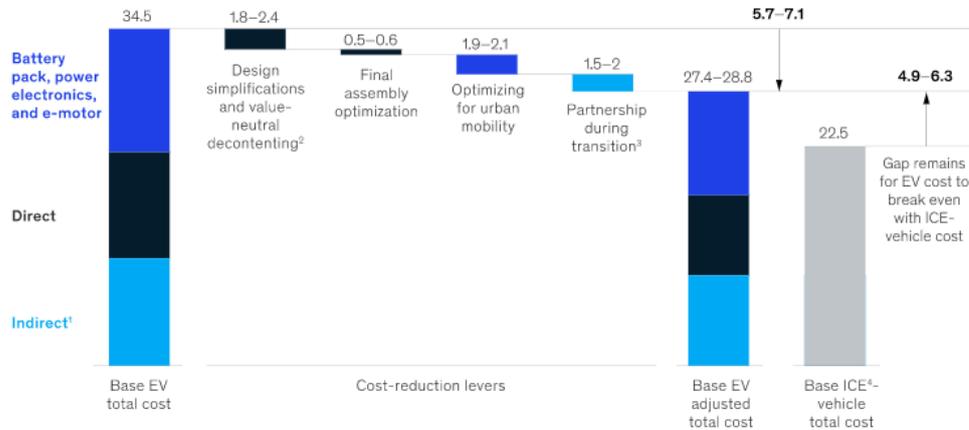
Como se puede observar, la diferencia económica es muy grande para un usuario común, tal y como se ha comentado anteriormente. También podemos encontrar otros temas ya mencionados como el crecimiento de las ventas a lo largo de los años y de su aceptación o sobre las ayudas de los gobiernos para fomentar las compras de estos.

Otras ideas interesantes que se mencionan en el artículo son cómo reducir gastos y hacer la fabricación de los coches eléctricos más rentable, consiguiendo disminuir el precio entre 5700\$ y 7100\$. Y todos estos medios para reducir gastos giran alrededor del diseño de una plataforma eléctrica dedicada. Con esto se puede rediseñar el habitáculo dando más espacio de utilidad, se puede eliminar algunos instrumentos relacionados con el motor, disminuir la complejidad del diseño, empaquetado y la fabricación.

Además, se plantea una optimización para la movilidad urbana, haciendo coches más compactos sin necesidad de una gran batería como la que se necesitaría para realizar viajes largos, ya que muchas empresas están apostando por disponer de puestos de carga en las grandes oficinas para promover el uso de este tipo de vehículo. Por eso, hay que llegar a un equilibrio entre una autonomía media que permita el uso diario normal de trayectos a la zona de trabajo y una mayor autonomía para los viajes de larga distancia. Con estas ideas se prevén los siguientes ahorros:

### Cost-reduction levers could bring down electric-vehicle costs considerably.

Base electric-vehicle (EV) total cost, with cost-reduction levers in 2019, estimated average per vehicle, \$ thousand

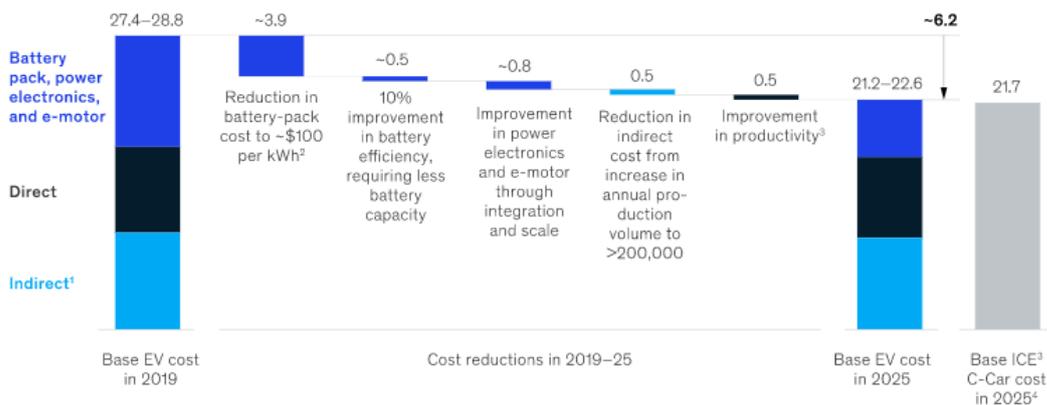


<sup>1</sup>Includes average incentive cost of \$2,000.  
<sup>2</sup>Reduction in non-internal-combustion-engine (ICE) content that does not affect safety.  
<sup>3</sup>Assumes combined average annual production of ~150,000 units.  
<sup>4</sup>Internal combustion engine.  
 Source: Industry experts; McKinsey analysis

Figura 7: Reducción de costes

Estas reducciones fueron estimaciones para el año 2019. Con anterioridad se había indicado que algunas empresas pretendían desarrollar sus plataformas eléctricas para lanzarlas en 2025. Como se ve en este artículo se estima que para esa fecha haya una reducción notable en el precio de los packs de baterías gracias a su desarrollo y que cada vez serán más numerosas y fiables. Por eso se espera que el precio total de este tipo de vehículos sea comparable, o en algunos casos inferior, a uno de combustión interna.

Base electric-vehicle (EV) total estimated cost per vehicle in 2025 under the aggressive scenario, \$ thousand



<sup>1</sup>Includes average incentive cost of \$2,000.  
<sup>2</sup>Kilowatt-hour; includes battery-management system.  
<sup>3</sup>Internal combustion engine.  
<sup>4</sup>Assumes 1% annual productivity improvement—reduced from historical value of 2–3% because of OEM investments in emerging technologies (eg, autonomous vehicle, electric power train, connectivity, shared mobility).  
 Source: Industry experts; McKinsey analysis

Figura 8: Previsión de estimación de costes en 2025

Una vez explicada la importancia a nivel económico del desarrollo de este tipo de plataformas para llegar a alcanzar un precio competitivo, se van a mostrar las que están diseñando los distintos fabricantes de automóviles en todo el mundo.

## 2.1. Grupo Volkswagen

Aunque el grupo Volkswagen ha empezado lento en el mundo del coche eléctrico, teniendo solo el modelo e-golf en el catálogo de modelos, es de los primeros de Europa en haber desarrollado una plataforma eléctrica. La han llamado MEB (Modular Electrification Toolkit) [13] y dará cabida a la mayoría de los vehículos eléctricos de las marcas pertenecientes al grupo. Los primeros modelos que van a utilizar esta plataforma son los Volkswagen ID. 3 e ID. 4. En un principio su lanzamiento estaba planeado para 2020 pero, debido a las circunstancias del coronavirus, se retrasó al 2021. Estos modelos se encuentran actualmente a la venta en el mercado.



*Figura 9: Plataforma MEB grupo VW*

Se puede ver que la batería se encuentra centrada en el suelo, bajando así el centro de gravedad del vehículo pudiéndose ajustar a los distintos tipos de vehículos que se monten sobre la plataforma. Para los que sean más pequeños, considerados de uso urbano, tendrán

baterías más reducidas, mientras que los SUV o berlinas pueden incorporar baterías más grandes y así mejorar su autonomía. Esto es gracias a su *escalabilidad*, comentada anteriormente, y *flexibilidad* que reducirá los costes de fabricación ya que los componentes electrónicos serán los mismos, la única diferencia será el tamaño.

Como se aprecia en la imagen, toda la parte de propulsión se encuentra en la zona baja del vehículo. En la parte delantera se encuentran los elementos auxiliares de control y gestión de la energía, en el centro la batería, y en el eje trasero se encuentra colocado el motor. Esto da más libertad de esfuerzos al eje delantero, ya que los motores eléctricos tienen un par superior a los térmicos, y así el eje delantero solo se encarga de la dirección y el trasero de la tracción. De las diferencias de los motores se hablará más adelante en otro capítulo.

También esta disposición permite mejorar la habitabilidad del interior aumentando la sensación de amplitud de los pasajeros. En Volkswagen tiene previsto que para 2028 aumenten los modelos eléctricos de su catálogo hasta aproximadamente 70, y además esta plataforma será utilizada por las distintas marcas dentro del grupo. Por ejemplo, en la marca española Seat y su filial Cupra, se tienen previstos dos modelos con esta plataforma, el Seat El-born y el Cupra Tavascan.

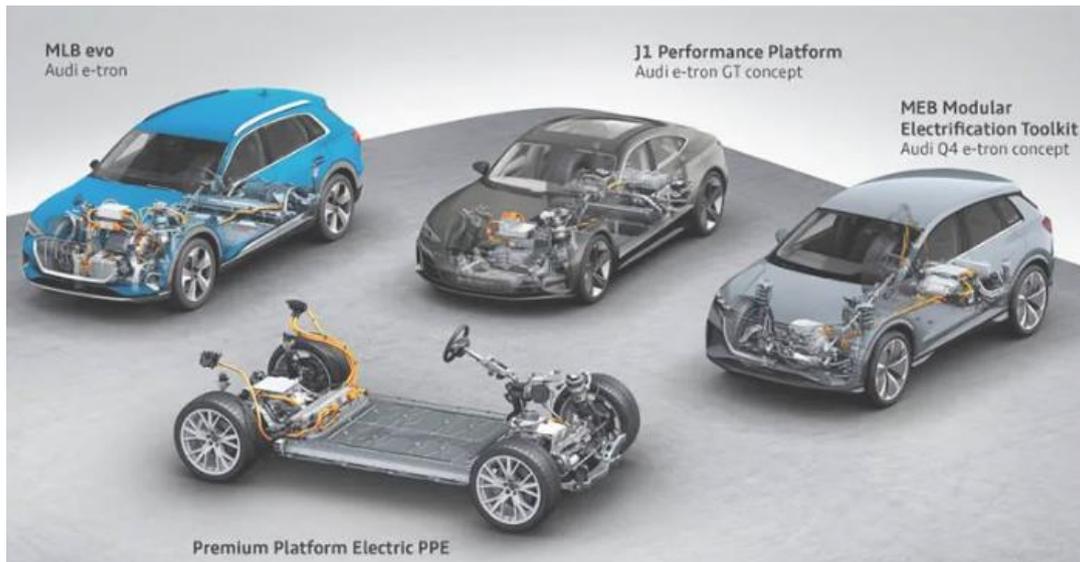


Figura 10: Prototipo Seat El-Born



Figura 11: Prototipo Cupra Tavascan

Audi no se conforma solo con esta plataforma. Según ha anunciado en sus planes de electrificación de sus modelos, pretende alcanzar el objetivo de producir 800.000 vehículos eléctricos al año para 2025. Otra vez aparece esta fecha como objetivo. Para ello, Audi planea usar 4 plataformas diferentes: MLB Evo, la ya mencionada MEB, PPE (Premium Platform Electric) y la J1 [14].



*Figura 12: Plataformas que implementará Audi*

- **MLB Evo**

El primer modelo eléctrico de la marca, el e-tron y sus distintas variantes, utilizan esta plataforma, pero esta no es como la MEB que ha sido diseñada de cero para un coche eléctrico. La MLB Evo es una versión modificada, o evolucionada, de una plataforma ya en uso para los modelos de motor térmico MLB (plataforma modular longitudinal) que utilizan los modelos Q5, Q7 o Q8 entre otros.

- **MEB**

Audi, al igual que el resto del grupo, utilizará esta plataforma para algunos de sus modelos, pero no para todos. Pretende utilizarla para los coches de categoría pequeña o mediana, como podría ser el Q4 e-tron.

- **PPE**

A diferencia de los modelos que usarán la plataforma MEB, la plataforma PPE está orientada para los vehículos medianos, de alta gama, y los grandes. Esta se está desarrollando junto con Porsche.

Esta plataforma supondrá una mejora en la tecnología empleada sin dar la espalda a la escalabilidad dado que ésta es clave en las plataformas. Al igual que la MEB llevará el motor en el eje trasero de la base, pero para gamas altas, se podrá utilizar un segundo motor en el eje delantero, proporcionando así una tracción a las cuatro ruedas idónea para todoterrenos o vehículos de altas prestaciones.

A su vez, la arquitectura eléctrica será de 800V en vez de los 400V que tienen el resto de las plataformas, permitiendo aumentar el voltaje de carga y así reducir el tiempo. Además,

también utilizará tecnologías de vectorización de par, suspensión neumática y dirección en las cuatro ruedas.

- J1

Al igual que la anterior, esta plataforma la está desarrollando con Porsche y está pensada para vehículos de alto rendimiento como el e-tron GT. Hoy en día, tanto la plataforma como el modelo son conceptos de lo que pueden llegar a ser los deportivos de la era eléctrica.

## 2.2. Grupo Toyota

Toyota es de las marcas que más está apostando por las tecnologías alternativas. Como ya se ha comentado, fueron los primeros en sacar un coche híbrido al mercado, el Toyota Prius. Actualmente la mayoría de los modelos que venden son híbridos, sin tener la posibilidad de usar solo motores térmicos. Esta es una apuesta arriesgada pero que intenta concienciar del cambio hacia el coche eléctrico.

Actualmente Toyota está utilizando una plataforma modular denominada TNGA (Toyota NewGlobal Architecture) [15] para sus modelos híbridos y recientemente ha anunciado su nuevo proyecto, una plataforma para sus futuros coches eléctricos, e-TNGA. Está orientada a vehículos medianos y grandes, y será utilizada por otras marcas como Lexus o Subaru.

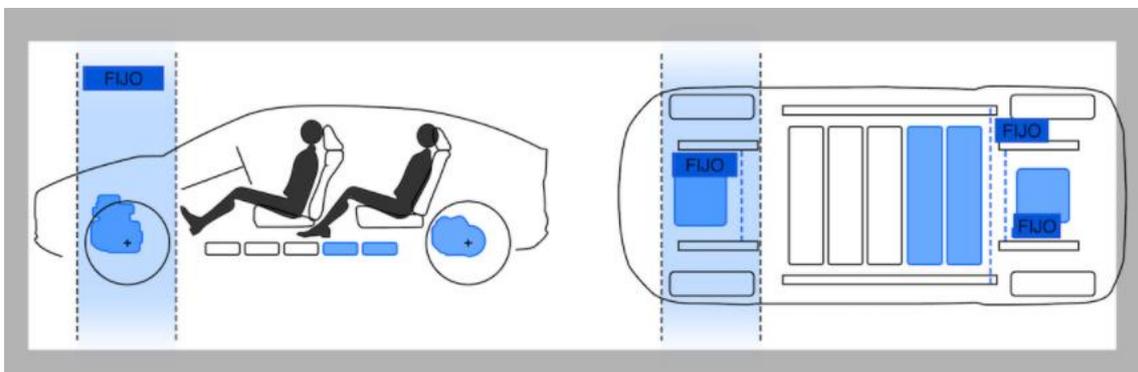


Figura 13: Plataforma e-TNGA de Toyota [16]

Como se puede apreciar en la imagen, esta plataforma cuenta con elementos fijos, como espacios reservados, para disponer de dos motores, uno por eje, permitiéndole así más configuraciones posibles, tracción delantera, trasera o integral 4x4. Teniendo estas posiciones fijas, las dimensiones generales del coche pueden variar para distintas distancias entre ejes, alturas, carrocerías... para así amoldarse a los distintos modelos que se fabriquen en esta plataforma.

Tecnológicamente irán equipados con dos motores entre 80 y 150 kW (110 y 200 CV respectivamente) cada uno, pudiendo alcanzar una potencia combinada de 400 CV según la configuración escogida. Para los primeros modelos se utilizarán baterías de iones de litio entre

50 y 100 kWh permitiendo así una autonomía aproximada de 300 a 600 Km. A medida que avancen las baterías las cambiarán a las de estado sólido, que esperan sea próximo al año 2025.

Toyota planea lanzar seis modelos con esta plataforma, o al menos por ahora, empezando a comercializarlos en China y posteriormente llevarlos al resto del mundo. Dadas las condiciones del mercado actual, en el que los SUV tienen gran popularidad, un vehículo de estas características será el primero.

## 2.3. Grupo Renault

Renault ha empezado con fuerza en el mundo de los coches eléctricos. Durante el año 2020 ha conseguido que el Renault Zoe se convierta en España en el vehículo eléctrico más vendido. Al igual que todos los eléctricos actuales, se ha basado en una plataforma modificada de un modelo de combustión interna, más concretamente la del Clio.

En esta plataforma, además de Renault, también están implicadas grandes marcas como Nissan, Mitsubishi y Dacia. Incluso Alpine, especializada en coches deportivos, está planteando usarla también. La plataforma se llama CMF-EV (Common Module Family -Electric Vehicle) y se utilizará para modelos como el Megane eVision [17].



*Figura 14: Plataforma CMF-EV de Renault*

A diferencia de la plataforma MEB, la CMF-EV en su configuración básica, el motor está posicionado en el eje delantero, pero cabe la posibilidad de montar un segundo motor en el eje trasero para las versiones con más potencia. Los motores tendrán una potencia máxima de 160 kW (unos 215 CV). Esta plataforma no será tan modular como las anteriores, ya que la distancia entre ejes puede variar entre 2.69 y 2.77 metros, lo que implica que los coches que la

utilicen tendrán unas longitudes entre 4 y 4.7 metros. Esto comprende desde modelos del segmento B y C, incluso hasta algunos del D.

Las baterías serán suministradas por LG Chem y éstas serán de iones de litio de una gran densidad energética, cercana a los 270 Wh/kg [18], cuando la media está en torno a los 200Wh/kg. Aunque también se plantea el montar baterías de electrolito solido cuando se mejore el desarrollo. Una novedad que incorpora esta plataforma es que las celdas son estructurales. Esto implica que forman parte íntegra de la estructura del coche, por lo que están diseñadas para absorber energía en caso de impacto.

Las capacidades que se emplearán serán de 40, 60 y 87 kWh [19] y, además, con el nuevo cargador a bordo, se puede utilizar una potencia de 130 kW en corriente continua. Esto supone que puede recuperar unos 200 km en tan solo 20 minutos, reduciendo así drásticamente el tiempo de recarga. Otra innovación que se podrá encontrar es la de un sistema de gestión de temperatura que utilizará el calor del motor y baterías para calentar el habitáculo. Esto permitirá reducir el gasto de energía y así aumentar la autonomía en situaciones frías.

## 2.2. General Motors (GM)

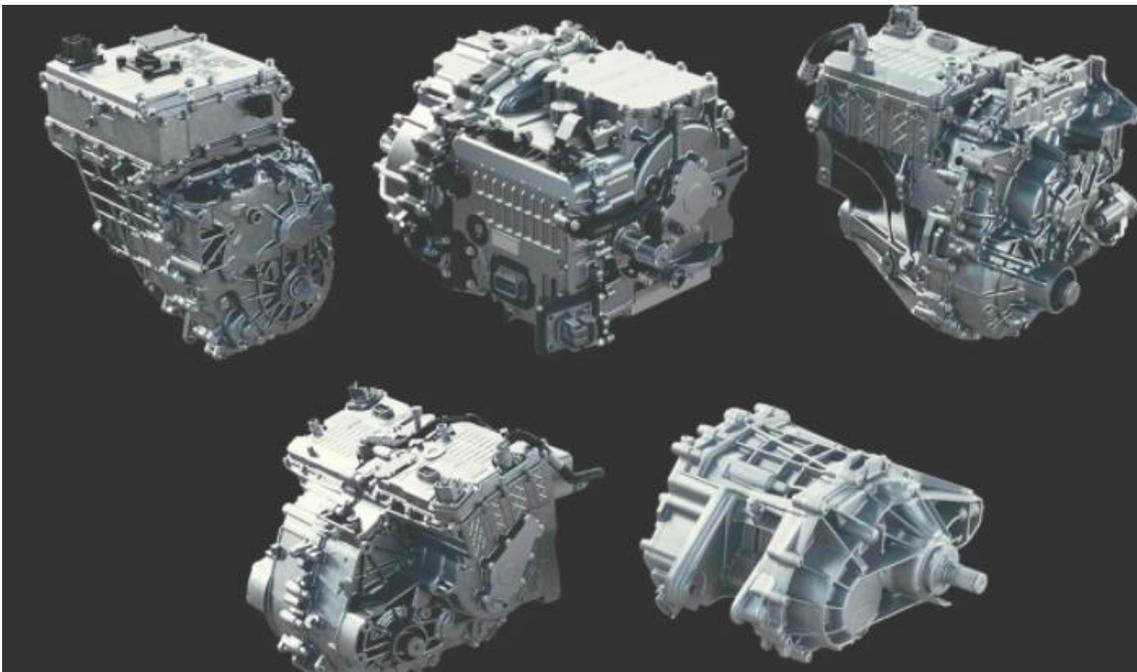
El grupo norteamericano también se une a la tendencia de anunciar el desarrollo de una plataforma eléctrica, llamada Ultium y, al igual que las anteriores, tiene una gran flexibilidad y simplicidad para así poder utilizarla en la mayor cantidad de vehículos posibles y reducir costes [20].



Figura 15: Plataforma del grupo GM

Una de las novedades que tendrá esta plataforma son las baterías Ultium, que disponen de grandes celdas de tipo bolsa, con las que se consigue una mayor flexibilidad debido a que se pueden empaquetar de manera horizontal o vertical dentro del pack de baterías. Las capacidades de éstas varían entre 50 kWh hasta los 200 kWh, permitiendo así una autonomía aproximada de 650 km. Las baterías trabajarán a 400 V, aunque las de camiones o vehículos de carga lo harán a 800 V, y permitirán una carga rápida de hasta 200 KW.

Además, para sus nuevos modelos eléctricos, GM tiene pensado utilizar 5 unidades de accionamiento intercambiables y tres motores, permitiéndoles así ofertar un amplio abanico de configuraciones posibles, para ser más exactos 19, combinando baterías, motores y accionamientos [21]. Los detalles técnicos de estos elementos todavía no se conocen debido a que aún se encuentran en la etapa de desarrollo. Los coches se podrán configurar con tracción delantera, trasera o total.



*Figura 16: Configuraciones de la unidad de potencia de GM*

Otro avance tecnológico que utilizarán es un nuevo BMS (Battery Monitor System) inalámbrico, el cual reduciría el cableado necesario suponiendo un menor peso total del coche y reducción de espacio que se podría utilizar para posicionar otros elementos de una manera óptima.

Para 2023 GM pretende tener unos 20 modelos eléctricos en el mercado a nivel mundial, y además hay que añadir que Honda también va a utilizar esta plataforma para dos de sus modelos. Los modelos de Honda llegarán para 2024, usando la combinación de baterías, motores y accionamientos de GM, pero el interior y exterior serán diseñados específicamente por la marca japonesa. Esta relación de cooperación entre las dos marcas comenzó en 2016 cuando decidieron desarrollar un vehículo autónomo, el Cruise AV.

## 2.5. Grupo Hyundai

A este amplio abanico de plataformas eléctricas hay que añadir la que ha anunciado el grupo Hyundai, en conjunto a KIA y Genesis, la plataforma E-GMP (Electric Global Modular Platform) con la que tienen el objetivo de pelear con Tesla el dominio de los coches eléctricos. Esta se está desarrollando desde el pasado 2016, y hará su primera aparición oficial en este 2021 con el lanzamiento del Hyundai IONIQ 5 y un SUV de la marca KIA.

Pero esto es solo el principio. Con la alta modularidad de esta plataforma, el grupo pretende lanzar un total de 23 modelos distintos de coches eléctricos propulsados por batería eléctrica. La disposición de los elementos principales, al igual que en el resto de las marcas, tiene forma de monopatín, en el que la batería está en el centro, bajando así el centro de gravedad y dando la posibilidad de tener un suelo de habitáculo plano.



*Figura 17: Plataforma E-GMP del grupo Hyundai.*

En la configuración básica se dispondrá de una unidad de potencia en el eje trasero, aunque para los modelos de carácter más deportivo se dispone de una configuración que incorpora también un motor delantero, proporcionando así una tracción integral. Esto permite que se alcancen altas prestaciones como la de acelerar de 0 a 100 km/h en menos de 3,5 segundos y una velocidad máxima de 260 km/h [22].

Hyundai ha desarrollado su propia unidad de potencia, el conjunto de motor, transmisión e inversor, consiguiendo así que éste se ajuste mejor a su diseño. Han conseguido también que sea más ligero, compacto y una velocidad de motor un 70% más alta que el resto de los motores existentes. Con todo esto se ha llegado a que esta unidad sea aproximadamente un 3% más eficiente que las actuales [23].



*Figura 18: Motor eléctrico diseñado por Hyundai*

En el aspecto de la seguridad también se puede apreciar una gran mejora. Utilizando una estructura de acero de ultra alta resistencia y componentes de acero estampado en caliente ofrecen una mayor rigidez. Además, gracias a unas secciones diseñadas para la absorción de energía tanto en la carrocería como el chasis, puede absorber el impacto en caso de accidente, haciendo que la zona donde se posicionan las baterías sea más segura.

En la parte de la batería Hyundai ha optado, al igual que GM, por unas celdas tipo bolsa que permiten un empaquetado más compacto y posibilitan modificar la capacidad total en función del modelo configurado, pudiendo obtener una autonomía máxima aproximada a los 500 km. Además, han anunciado un nuevo sistema independiente de refrigeración para los sistemas de baterías, permitiendo que así éstas sean más ligeras, compactas y con una mayor densidad de energía respecto a las de sus competidores.

Por último, una de las grandes innovaciones que tiene esta plataforma es el sistema de carga, ya que dispondrá de un sistema de carga bidireccional. A la hora de cargar las baterías lo pueden hacer con una tensión de 800 V. También admite 400 V, permitiendo usar cargadores ultra rápidos de 350 kW. Con esto se permite cargar el 80% de la capacidad de la batería en 18 minutos y en caso de cargarlas solo 5 min se obtendrá una autonomía de 100 km. Por otro lado, esta plataforma dispone de una tecnología V2L (Vehicle to load), que permite suministrar energía desde las baterías del coche hacia otros aparatos eléctricos externos que trabajen a 110/220 V. Este sistema permite suministrar una potencia de carga de 3,5 kW, suficiente para hacer funcionar un sistema de aire acondicionado o una televisión.

## 2.6. Grupo PSA (Stellantis N.V.)

El grupo PSA, formado por Peugeot, Citroën y Opel, era uno de los grupos que de primeras apostaron por dos plataformas multitecnología, dada la incertidumbre ya comentada anteriormente sobre el éxito de los vehículos eléctricos. Estas plataformas son las CMP y EMP2 que son usadas para los vehículos híbridos y eléctricos de las marcas, como el Peugeot e-208, Opel Corsa-e o el Peugeot 5008 Hybrid.

En el intervalo de 2020 a 2025 pretenden pasar los vehículos 100% eléctricos de estas plataformas multitecnología a otras dos que si sean específicas para los vehículos eléctricos. Una de estas es la que han anunciado el pasado 2020, y se ha llamado eVMP (Electric Vehicle Modular Platform) que se utilizará para los vehículos del segmento C y D, en otras palabras, medianos y grandes.

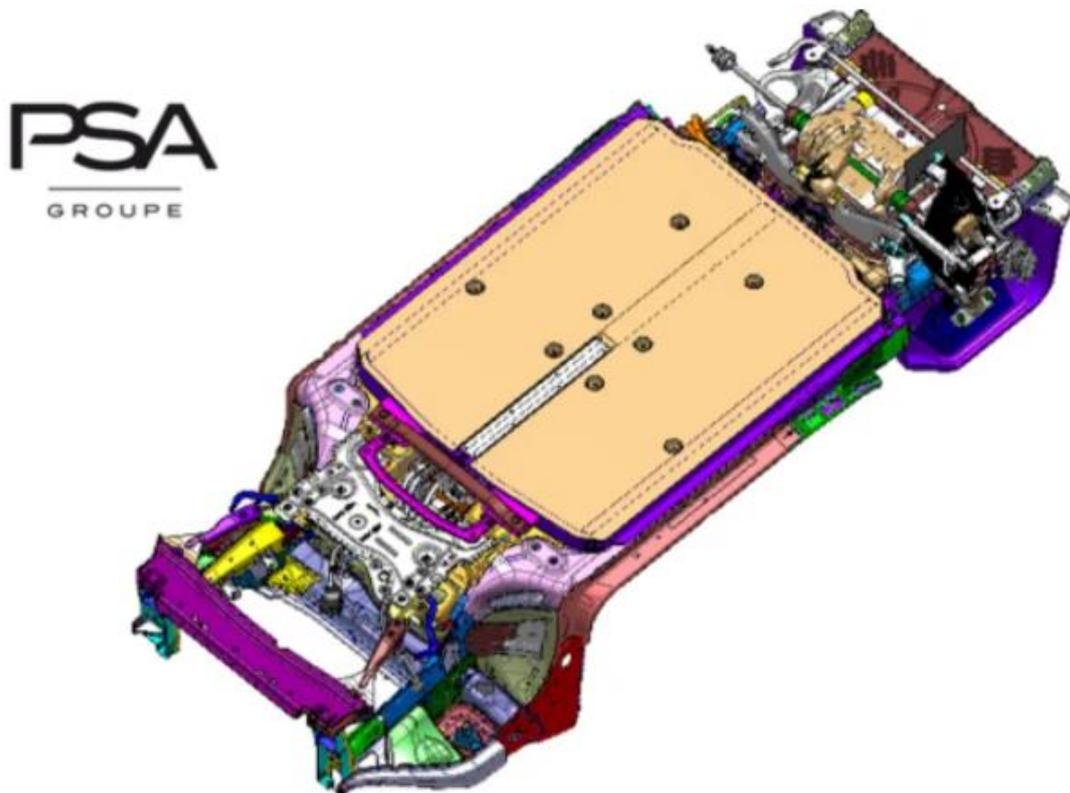


Figura 19: Plataforma eVMP del grupo PSA

A diferencia de las anteriores, de esta plataforma no hay muchos datos ya que no se va a empezar a utilizar hasta 2023. Mientras tanto utilizarán las anteriormente mencionadas. Pero sí que han dado algunos datos sobre las baterías. Éstas irán alojadas en el fondo plano del coche entre los ejes. Han conseguido tener una capacidad de 50 kWh por metro disponible de batería [24].

Con estos datos podrán disponer de una capacidad total entre 60 y 100 kWh, dependiendo del modelo que se seleccione, ya que esta plataforma, al igual que las otras marcas, pretenden

utilizarla para múltiples tipos de vehículos, como SUV, urbanos, berlinas... Con esta capacidad de baterías se pueden conseguir autonomías entre 400 y 650 km, una cantidad bastante considerable para un coche eléctrico [25].

## 2.7. Empresas independientes

Aparte de los grandes fabricantes de automóviles, que ya hemos indicado previamente, que están desarrollando sus propias plataformas, hay otras empresas independientes que se han propuesto diseñar las suyas propias para después ofrecerlas a marcas que estén interesadas o a otro tipo de empresas como las de alquiler, empresas de reparto, etc.

Una de estas opciones es la que ha desarrollado REE, una plataforma que se sale de la idea general del resto de competidores y marcas ya comentadas anteriormente. En ella ~~en la que~~ optan por una arquitectura totalmente distinta. Esta arquitectura está formada por dos elementos principales que han llamado REEcorner y REEboard, las cuales se explicarán en detalle más adelante.

Desde REE han publicado un video ([enlace](#)) [26] mostrando las tres plataformas de nueva generación, que pretenden lanzar al mercado, en funcionamiento en una pista de pruebas, mostrando así su comportamiento. De las tres que se pueden apreciar en la siguiente imagen, la más pequeña se llama P1 y está pensada para el reparto de entregas dentro de la ciudad, "last mile inner city delivery", con un peso bruto nominal de 1.3 toneladas. La de tamaño intermedio se llama P2, está destinada al transporte tanto de personas como de mercancías. Puede cargar un peso total de 2.5 toneladas. La de mayor tamaño, llamada P4, puede cargar hasta un total de 4.5 toneladas y solo se distribuirá en América del norte para el sector de envío de mercancías.



Figura 20: Las tres plataformas propuestas por REE

Pasando a la parte tecnológica de esta plataforma, como se aprecia en las imágenes, esta plataforma es completamente plana debido a que todos los elementos necesarios para controlar el vehículo se encuentran en las ruedas denominadas REEcorner, los motores, el

sistema de dirección, suspensión y frenos. Cada uno de estos conjuntos de rueda son independientes con una ECU específica para controlar cada uno de los elementos, todos por cable eléctrico. Este tipo de control eléctrico lo han denominado *X-By-Wire Control*. En la siguiente imagen se puede apreciar un explosionado con todos los elementos que se utilizan en el conjunto [27].



Figura 21: Despiece de REECorner

Para poder controlar cada una de las REECorner han desarrollado un ECU central, llamado REEcenter, que analiza cuales son las condiciones mecánicas y dinámicas del vehículo y manda de manera precisa como se deben comportar cada una de las ruedas, tanto a nivel de potencia de motor como de freno que se necesita emplear o la cantidad de giro que necesita cada una de las ruedas para realizar el giro. Y es que, en este caso, también se puede incluir un sistema de dirección en el eje trasero para facilitar el manejo. Además, en el caso de que uno de las REECorner falle, la REEcenter ECU gestiona el sistema para que el vehículo siga en funcionamiento hasta que se realicen las tareas de mantenimiento. En la siguiente imagen se puede apreciar cómo es la arquitectura de control.

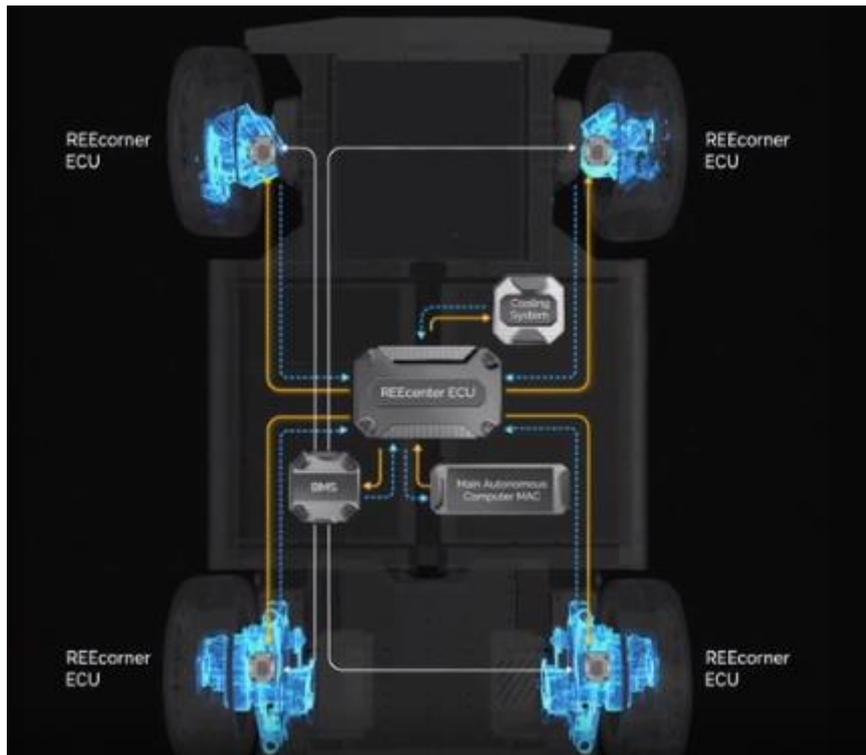


Figura 22: Sistema de gestión de REE

Además, esta plataforma tiene una gran cantidad de sensores para todos los elementos electrónicos que permiten un estupendo sistema de adquisición de datos para mejorar el producto y, conjuntamente, trabajar en sistemas de mantenimiento preventivo. Por otro lado, al ser controlado el coche completamente de manera electrónica, esto permite que el coche esté preparado para los sistemas autónomos.

### 3. Elementos de las plataformas eléctricas

A lo largo de las descripciones de las distintas plataformas, se han ido introduciendo cuáles son los elementos que éstas tienen en común, que son la mayoría. Ahora vamos a analizar los más importantes y los que tienen más margen de investigación, la cual se está llevando a cabo por diversas empresas con desarrollo en el futuro.

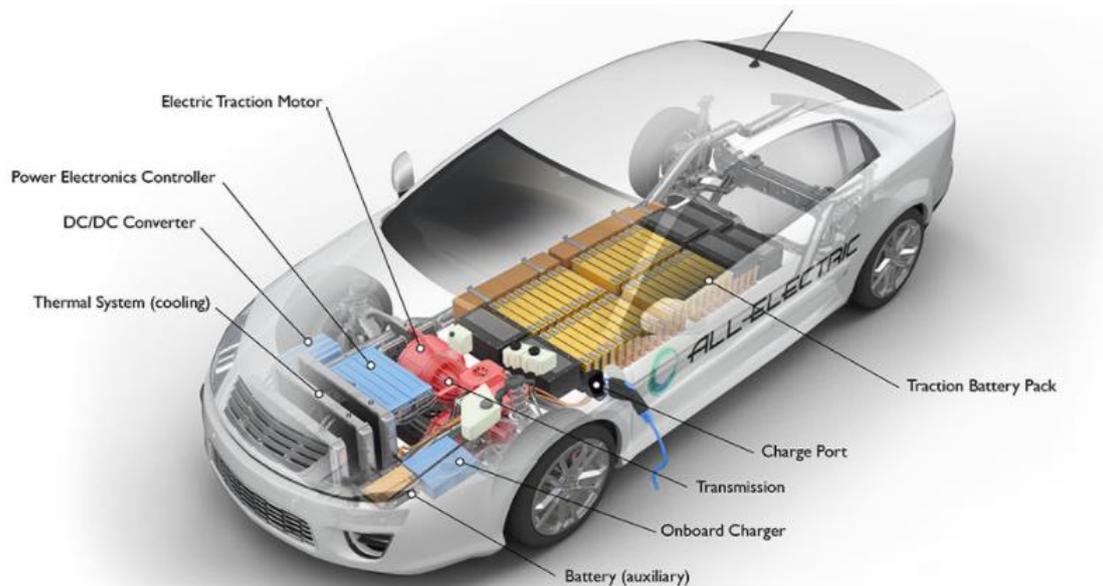


Figura 23: Elementos que constituyen un vehículo eléctrico

En esta imagen se pueden apreciar todos los elementos eléctricos que se necesitan para que un vehículo eléctrico pueda funcionar [28], luego se explicaran los más importantes. Son los siguientes:

- **Paquete de baterías de tracción** (traction battery pack): Es el conjunto de baterías de gran capacidad que se utilizan para almacenar la energía que después se empleará para el movimiento del automóvil. Estas baterías tienen un sistema interno que se encarga de controlar el estado de cada una de las celdas. Este elemento se explicará en detalle más adelante.
- **Batería auxiliar:** Esta es la batería tradicional que tienen también los coches de motor térmico. Tiene una tensión nominal de 12 V y se utiliza para todos los elementos electrónicos auxiliares como iluminación, infotainment, motores de los limpiaparabrisas o ventanillas...
- **Convertidor DC/DC:** Dado que en este tipo de vehículo no existe el alternador, elemento que cargaba la batería auxiliar gracias al movimiento del motor, se necesita un convertidor que transfiera la energía de las baterías de tracción a la auxiliar. Esto se consigue gracias a este convertidor de corriente continua.

- **Sistema de carga** (Charge port y onboard charger): Actualmente existen varios tipos de carga en función de la tensión y tipo de corriente que utilicen. Desde una toma de corriente como las que tenemos en casa de 230V de alterna o cargadores super rápidos, que funcionan a tensiones elevadas de continua.
- **Control de electrónica de potencia (PEC):** Este elemento se encarga de enviar la energía de las baterías de tracción a los motores, regulando la potencia y velocidad necesarias, o solicitadas por el conductor en cada momento en función de las circunstancias. También es el encargado de mandar la energía que se genera en las frenadas y desaceleraciones de vuelta a la batería para así aumentar la autonomía.
- **Motor eléctrico y transmisión:** El motor eléctrico es el encargado de generar el movimiento que permite la circulación del vehículo. Es el sustituto del motor de combustión interna. La mayoría de los motores eléctricos entregan directamente la potencia al eje de las ruedas, pero hay algunas marcas que están desarrollando transmisiones específicas para los motores eléctricos que conseguirían reducir el consumo de estos.
- **Sistema de refrigeración:** Este es otro de los elementos que se siguen heredando de los coches con motor térmico, que se tenía que refrigerar internamente. Ahora este sistema se utiliza para controlar y refrigerar las baterías de tracción, ya que estas no pueden sobrecalentarse, por motivos de seguridad y para aumentar su vida útil. También se utiliza para refrigerar el resto de los elementos que puedan generar calor, como el motor eléctrico o el PEC

## 3.1. Acumuladores

Uno de los elementos más importantes de un vehículo eléctrico es el acumulador de energía. Actualmente los más importantes son las baterías basadas en litio o supercondensadores que se describen a continuación

### 3.1.1. Baterías de ion-litio

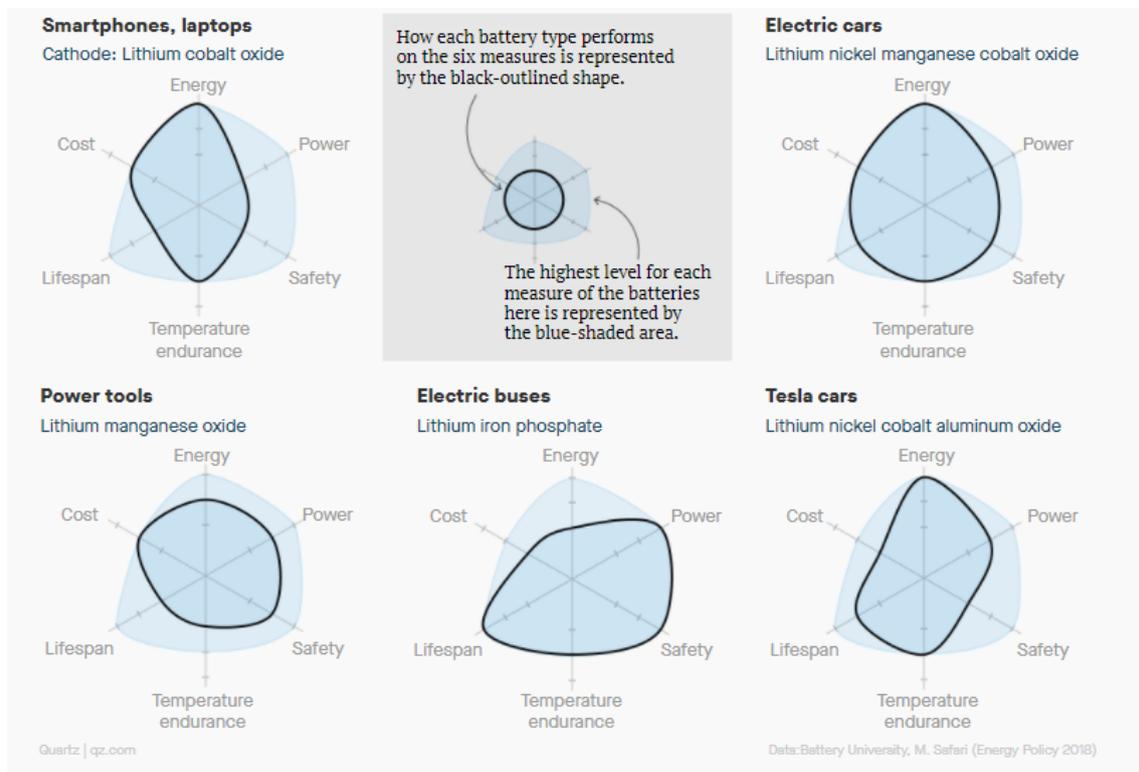
Las baterías, como las conocemos ahora, han sufrido muchos cambios desde sus primeros prototipos hasta los modelos actuales. La primera pila se desarrolló en 1800 por el inventor Alessandro Volta que la creó utilizando discos de zinc y plata separados por un electrolito. Este invento tuvo tanto reconocimiento que la unidad para la tensión eléctrica, el voltio, recibió el nombre en su honor [29].

Otro gran avance para las baterías fue el poder recargarlas una vez que ya se habían utilizado. Esto lo consiguió otro investigador francés, Gaston Planté, que en 1859 desarrolló una batería

de plomo-acido, que con una corriente en sentido inverso consigue que ésta se recargue. Actualmente este tipo de baterías se siguen utilizando en nuestra vida cotidiana, después de muchas mejoras respecto a la original. Un ejemplo son las baterías de 12 Voltios que se ponían hasta hace poco en los coches.

Posteriormente se comenzó a trabajar para conseguir las baterías más pequeñas, más ligeras y accesibles. Por ello el profesor de la universidad de Oxford, Jhon B. Goodenough, empezó a utilizar el litio como elemento para la transformación de energía. La primera batería de ion litio fue comercializada en 1991 por Sony.

Ahora bien, ¿cómo funcionan las baterías de ion litio? Estas están compuestas por dos electrodos, un ánodo y por un cátodo, y lo que hace que una batería tenga unas características u otras son los distintos compuestos que se utilizan en los cátodos. En la siguiente imagen se pueden ver unos ejemplos [30].



*Figura 24: Diferencias entre los tipos de baterías de Ion Litio*

Como ya se ha visto existen varias posibilidades de materiales en la composición de los cátodos. Actualmente el material más utilizado en el ánodo es el grafito dado que éste es barato, fiable y tiene una buena densidad de energía, en comparación con el resto de los materiales que hay en la actualidad. Estos electrodos están separados por un elemento que solo permite el paso de los iones de litio y no deja pasar a los electrones forzando a que éstos vayan por el circuito exterior, generando así la electricidad. Todos estos elementos están situados dentro de la batería unidos por un electrolito, el cual normalmente es líquido, que permite el movimiento de los iones en un sentido y en otro (carga y descarga).

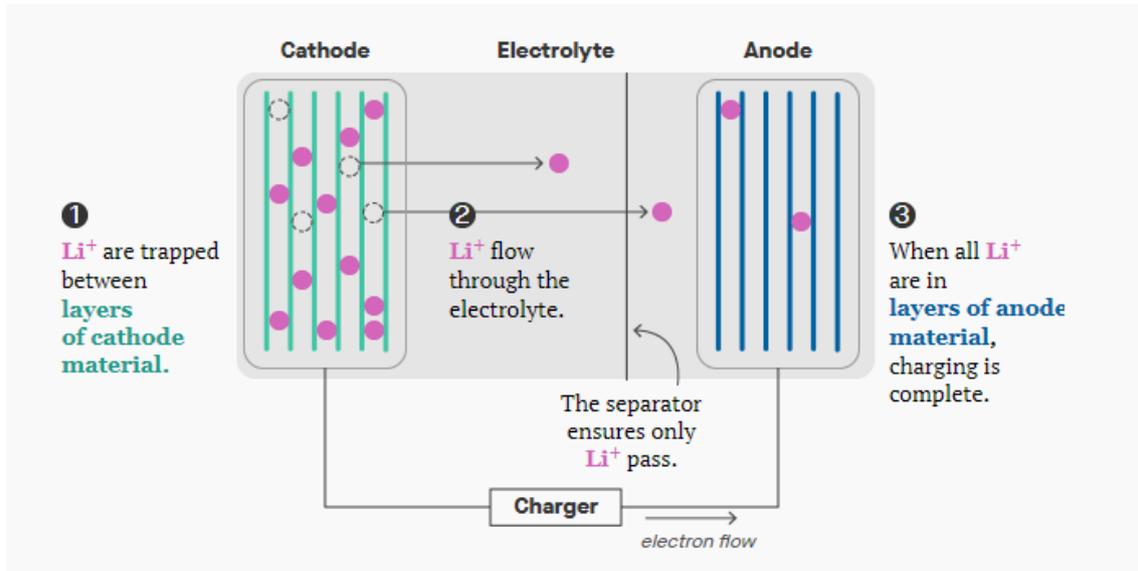


Figura 25: Estructura interna de una celda de ion Litio

En esta imagen se puede simplificar cómo es la estructura de una batería. Tanto el cátodo como el ánodo tienen los materiales en forma de láminas, aproximadamente, que fijan las posiciones de los iones entre ellas mientras la batería está desconectada para estabilizar su estado de carga. Cuando una batería está completamente cargada todos los iones de litio se encuentran en el ánodo. A medida que ésta se va descargando se van pasando hacia el cátodo generando así el movimiento de los electrones a través de la carga. La capacidad de una batería es la cantidad de iones que se pueden almacenar completamente en el ánodo o el cátodo, el que sea más limitante, y la potencia de ésta es la velocidad con la que este proceso se puede realizar. Pero no se puede hacer este proceso excesivamente rápido porque podría dañar los elementos internos de la batería, como el separador, y la haría perder prestaciones de funcionamiento.

Elon Musk, a través de su empresa Tesla, es el que más ha impulsado el uso de baterías de litio para sus coches eléctricos. También es el que más dinero ha invertido en estas baterías para hacer el máximo partido y conseguir el mayor reto de todos: disminuir el precio y así hacerlos competitivos a sus automóviles. A finales del año pasado, 2020, Tesla organizó un evento en California llamado, "Battery Day", en el cual presentaron la estrategia a nivel de baterías que iban a seguir en los próximos años. La nueva celda que van a utilizar se denomina 4680, esto se debe a sus medidas que son 46 milímetros de diámetro y 80 milímetros de altura [31].



Figura 26: Celda 4680 de Tesla

Anteriormente Tesla utilizaba en los Model 3 y Model Y una batería 2170. Estas baterías, más adelante, aumentarán en todas las dimensiones, sobre todo en anchura, y con eso se han conseguido las mejoras que se pueden ver en la imagen anterior. Se ha multiplicado por cinco la capacidad de energía que se puede almacenar, se ha aumentado en seis veces la potencia que pueden generar y se ha conseguido un 16% extra de autonomía, factor de vital importancia en los vehículos eléctricos.

Este aumento de prestaciones no se debe sólo al aumento de tamaño de la celda, sino que también, en este tipo de celda, han incorporado una nueva evolución tecnológica. Se ha conseguido eliminar los conectores que unen los electrodos con la carcasa, optimizando así la capacidad máxima de la celda. También hay que tener en cuenta que al ser la celda de un tamaño mayor dentro del paquete de baterías no se necesitarían tantas como en la versión anterior, lo que supone un ahorro en el automóvil.

Otro de los avances que anunció Tesla en esta presentación es la de un cambio en la estructura de los vehículos. Esta estructura, en la que se montarían las celdas, pasaría a ser parte del chasis y a esto se uniría la parte delantera y trasera. Esta estructura está basada en la misma idea que la del combustible en los aviones, que aprovechan las alas para ser almacenado. En este caso, en vez de las alas, es dentro del chasis. Con esto se consigue simplificar el diseño estructural del coche, reducir el peso total y además es más seguro dado que las baterías van más protegidas en esta pieza tipo “honeycomb” [32].

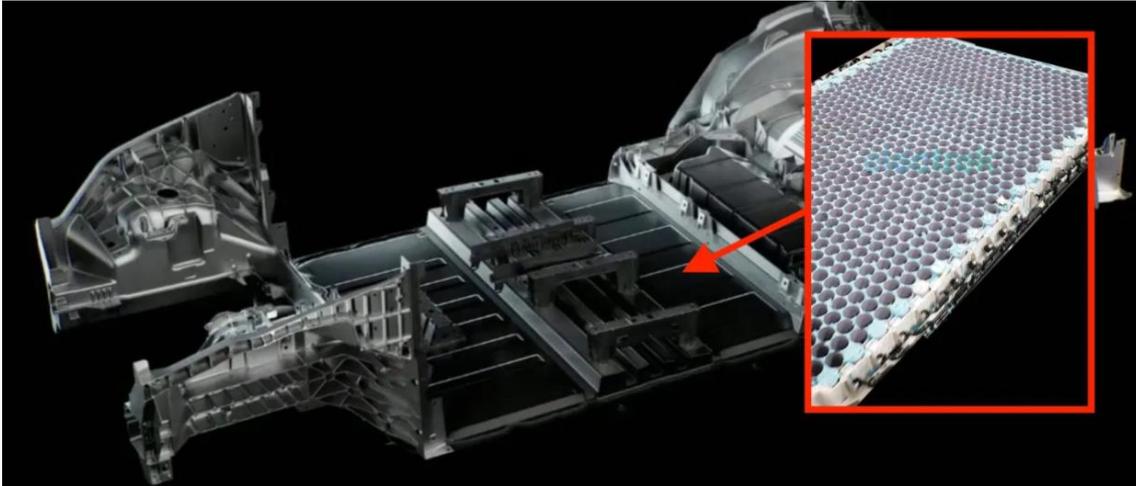


Figura 27: Estructura honeycomb para almacenar celdas

Ahora bien, ¿vamos a estar utilizando siempre el mismo tipo de baterías? Lo cierto es que las baterías tal y como se fabrican ahora mismo alcanzarán un máximo de densidad energética en los próximos años. El profesor Andreas Hinntenach, director de la investigación sobre baterías en el grupo Daimler, ha explicado cuáles serán las estrategias que seguirá el grupo a la hora de elegir, aproximadamente, las baterías que se van a utilizar en cada franja de años.

Del 2020 al 2025 se van a seguir usando las mismas baterías de ion litio tal y como se han descrito anteriormente, con los dos electrodos, un separador y un electrolito líquido. Pero eso no significa que no se investigue en maneras de mejorar sus prestaciones. Los cambios más probables que se lleven a cabo son modificaciones en los materiales de los electrodos, el que supondría un gran avance sería poder cambiar las láminas del ánodo de grafito por unas de silicio, que multiplica la densidad de carga del grafito [33]



Figura 28: Materiales útiles para los ánodos

Pero realizar este cambio de material no es tan sencillo, dado que el silicio al recibir los iones de litio puede aumentar su tamaño hasta 4 veces y esto, al estar dentro de un entorno cerrado y sólido, puede suponer grandes problemas de seguridad. Y no solo eso, estos procesos de expansión y contracción también hacen que se reduzca su vida útil, otro de los factores importantes en las baterías. Aunque estas mejoras no están listas todavía para introducirse en el mercado por los problemas que se han comentado, sí que se está trabajando en ello para

poder lanzarlas en los próximos años y así mejorar las prestaciones de los automóviles eléctricos.

Para los próximos años, del 2025 al 2030, se están desarrollando otro tipo de tecnología, llamado baterías de estado sólido. Como se ha comentado, las baterías de electrolito líquido están llegando a un límite en la densidad energética debido a la tecnología empleada. Las baterías actualmente tienen una densidad enérgica de 700 Wh/L [34] y se espera que el límite de este tipo de baterías este cerca de los 800 Wh/L, tal y como se ve en la gráfica. Este límite no es suficiente para competir en autonomía con los coches de combustión interna. Con estas baterías de estado sólido se prevé que se puedan alcanzar densidades energéticas de cerca de 1000 Wh/L o incluso más, que podrían generar una autonomía para 800 Km, una cifra que ya compite con los de combustión.

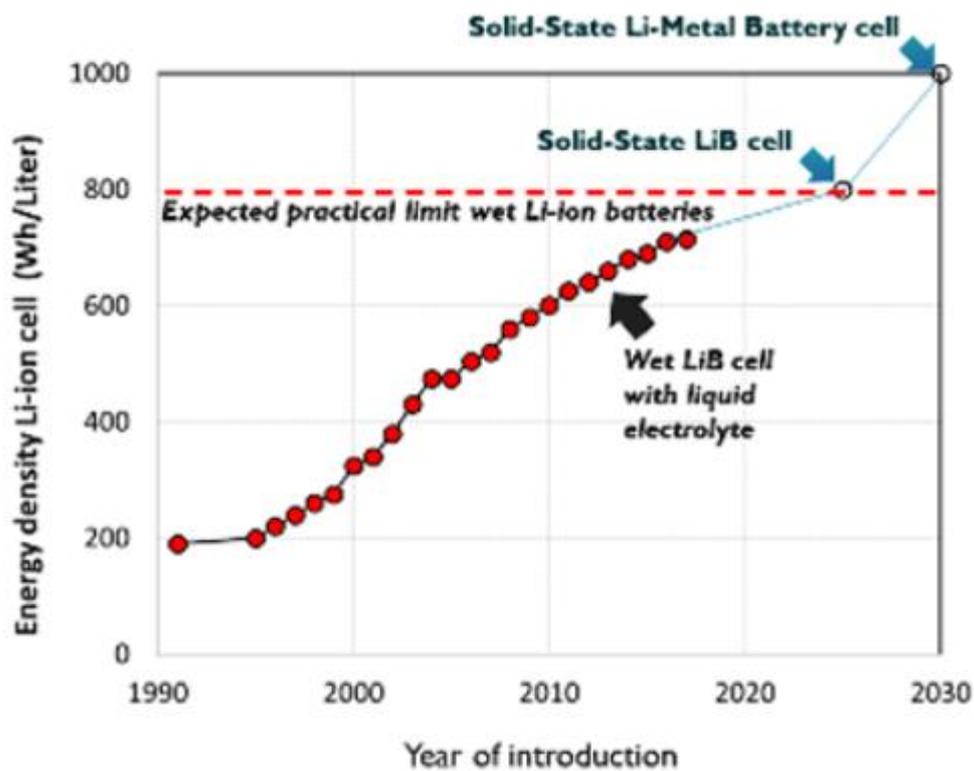


Figura 29: Estimación densidad de potencia de baterías con electrolito líquido

Pero ¿en qué consiste la evolución de las baterías de estado sólido? La estructura será la misma, se tienen dos electrodos, ánodo y cátodo, un separador para evitar que los electrones se muevan internamente en la batería y un electrolito para permitir el paso de los iones de litio. La diferencia es que este electrolito deja de ser un material líquido y es sólido. Las principales líneas de investigación están usando materiales como cristal, cerámicos o nanohilos de oro y manganeso. La estructura de las baterías sería de la siguiente manera [35]:

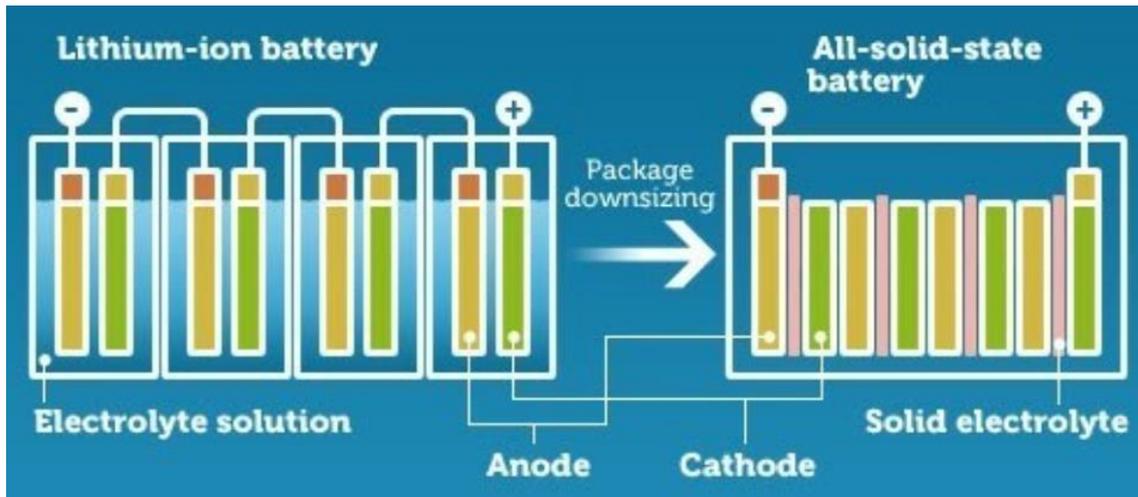


Figura 30: Diferencia entre baterías de estado sólido y de electrolito líquido

Pero no es tan sencillo. No es solo cambiar el electrolito líquido por el sólido, sino que, para que funcione, hay que cambiar también el ánodo por otro tipo de material. En los primeros estudios que se hicieron con esta idea se empezaron a utilizar metales de litio como ánodos, pero estos tenían un gran problema, y es que, en los procesos de carga de la batería se podían producir dendritas en el ánodo. Las dendritas son cristales que pueden perforar el electrolito generando un cortocircuito entre los electrodos y así dejar inservible la celda. Este es un diagrama simplificado de estos casos.

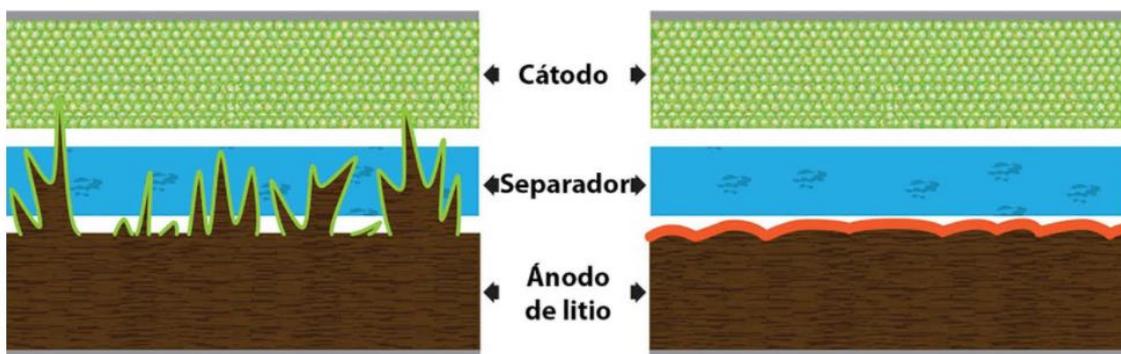


Figura 31: Formación de dendritas

Pero estos problemas ya se están empezando a solucionar. Hay empresas como Samsung que, en su Instituto de Tecnología Avanzada, ha desarrollado un prototipo de una batería de estado sólido en formato de bolsa, dado que las baterías que fabrica para la automoción son de este tipo. Esto le permitirá cambiar la tecnología en la cadena de montaje sin muchos cambios. Estos han utilizado como ánodo una capa de un compuesto de Plata y Carbono (Ag-C) con un espesor de 5  $\mu\text{m}$  y un electrolito de tipo cristal de sulfuro [36]. El prototipo tenía una capacidad de 0.6Ah, una densidad energética sobre 900Wh/L, una larga vida útil, probada en 1000 ciclos, y una eficiencia sobre el cálculo de Coulomb del 99,8%. Esta es la integral respecto el tiempo de la corriente que ha salido de la celda. Ver la siguiente ecuación:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t_0) - \int_{t_0}^t \frac{\eta(\tau)I(\tau)}{C_b^o} d\tau$$

Como ya se puede entrever, y más que se van a resumir ahora, las ventajas que tienen este tipo de baterías son bastante notables:

- La densidad energética que tienen es bastante superior, pudiendo alcanzar los 1000 Wh/L o incluso más.
- Al tener un aumento de densidad se consigue así aumentar la autonomía del automóvil pudiendo competir en este aspecto con los vehículos de combustión.
- La vida útil de las celdas aumenta al disminuir la degradación de los materiales empleados.
- Se reduce el tiempo de recarga sustancialmente, otro factor que limita la entrada del vehículo eléctrico en la sociedad.
- Las celdas disminuyen de tamaño, pero aumentan de peso. Son más seguras debido a que el elemento inflamable, que es el electrolito líquido, se sustituye por uno sólido que no es inflamable, y no se necesita emplear muchas estructuras para protegerlas. Por lo que en conjunto el paquete de baterías resulta ser más ligero que las anteriores.

Dadas todas estas mejoras que se han comentado es lógico que la mayoría de las marcas de automóviles hayan puesto sus intereses en esta tecnología. Algunas de ellas como BMW y Ford han firmado alianzas con una empresa llamada Solid Power para que cuando completen su desarrollo puedan utilizarlas en sus coches. Se espera su implementación a gran escala para cerca del 2025, aunque algunos fabricantes como Toyota intentarán empezar a usarlas a finales de 2022 [37].

Después de estas baterías de estado sólido, el profesor Hinntenach indica que las baterías que se utilizarán en torno al 2030 son las baterías de Litio-Azufre. Sobre el papel éstas tienen una gran mejora respecto al resto ya que tienen mejores prestaciones, son más económicas y ecológicas. El cátodo estaría formado por un metal de litio y el ánodo por un compuesto de azufre y además utilizaría la tecnología del electrolito sólido, para así aumentar su densidad energética.

Actualmente los problemas que tienen estos tipos de baterías se producen internamente. Debido a la reacción química que tiene lugar en el interior de la celda se produce sulfuro de litio sólido y polisulfuro de litio líquido lo que genera una pérdida de material activo y corrosión, esto hace que la batería se degrade más rápidamente y pierda prestaciones de capacidad y vida útil [38].

Se está investigando en la utilización de catalizadores para evitar este tipo de reacciones o hacerlas reversibles y así mejorar la vida útil de las celdas. En el Instituto de Ciencia y

Tecnología de Gwangju (GIST) han realizado pruebas introduciendo oxalato de cobalto en el cátodo de azufre con resultados satisfactorios en los que el catalizador absorbe azufre en la reacción y así evita la creación del sulfuro de litio y el polisulfuro de litio, mejorando su vida útil.

Todavía queda mucho para que este tipo de baterías lleguen al mercado, pero cuando lo hagan seguramente se convertirán en las más utilizadas debido a sus ventajas:

- Están compuestas por azufre, que es un material mucho más sencillo de obtener y es muy abundante en el planeta.
- El método de obtención del azufre es menos costoso y contaminante respecto al resto de materiales. Además, estas serían 100% reciclables ayudando más al medioambiente.
- El peso se vería reducido alrededor del 50% por lo que se podrían utilizar, incluso, en otros sectores de transporte pesados como la aviación.
- Tendrán una autonomía superior en un 40-50% debido a un aumento de la densidad energética que pueden alcanzar.

Para fechas posteriores no se sabe a ciencia cierta qué energía es la que va a impulsar los automóviles. El desarrollo de nuevos tipos de baterías seguirá adelante intentando conseguir mejoras de las prestaciones. Estas podrían ser baterías de aire, utilizando los materiales orgánicos...

### 3.1.2. Supercondensadores

Otro de los elementos de almacenaje de energía que se utilizan en la industria de la automoción son los supercondensadores, o también llamados ultracondensadores. Son condensadores con capacidades, de Faradios (F), superiores a las que tienen los que se utilizan normalmente en la tecnología de consumo actual.

Los supercondensadores están constituidos por dos electrodos recubiertos de un material poroso, para así poder aumentar la superficie de contacto del electrodo y en consecuencia la capacidad de éste. En el interior se encuentra un electrolito líquido y un separador para evitar el cortocircuito.

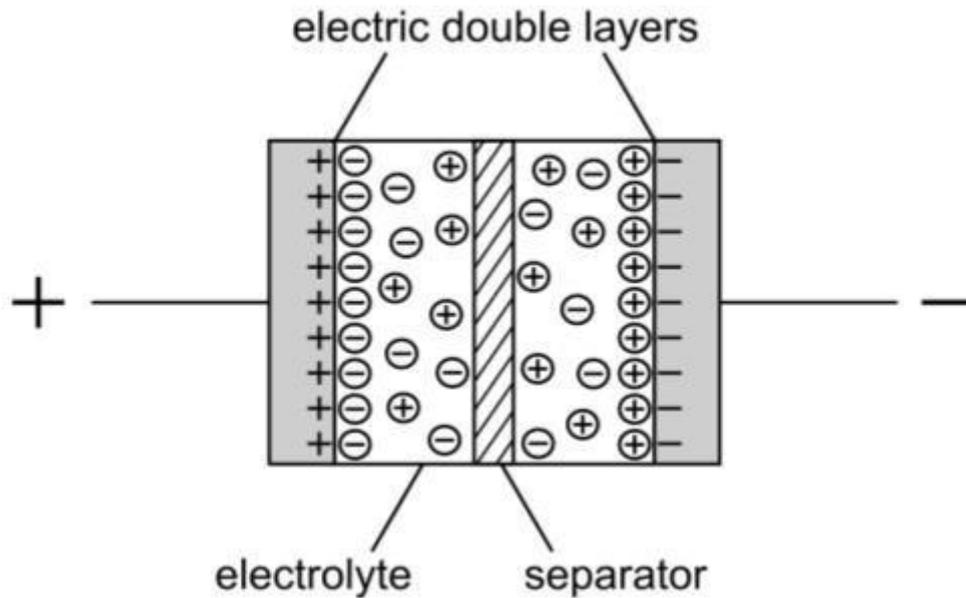
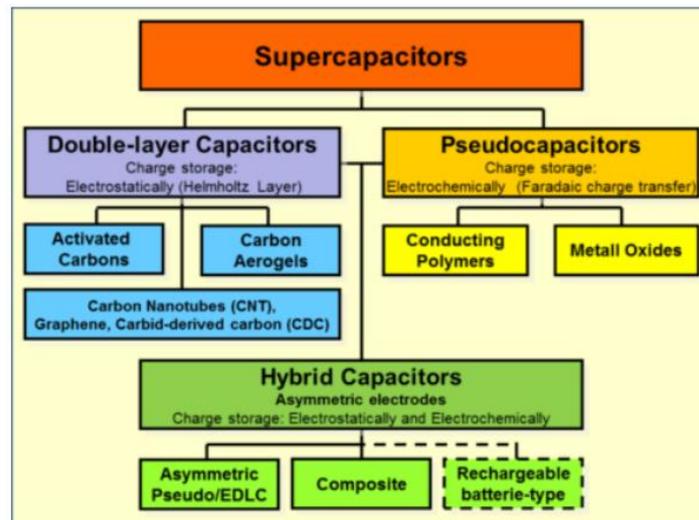


Figura 32: Estructura de un supercondensador

Al disponer de un electrolito en su interior, en vez de un elemento dieléctrico como tienen los condensadores normales, se produce un efecto de doble capa eléctrica, descubierto y definido por Helmholtz en 1853, en la cual se dan dos tipos de almacenamiento: la doble carga interfacial, que almacena la energía electrostática que se produce por la separación de la carga, y la pseudocapacidad, que es el almacenamiento electroquímico energético que se obtiene de las reacciones químicas que se dan entre el electrodo y el electrolito [39].

Teniendo esto en cuenta se pueden categorizar los supercondensadores en tres tipos:

- *Condensadores electroquímicos de doble capa eléctrica:* Este tipo el electrodo se construye fundamentalmente de materiales de carbono, el efecto de la doble carga es superior a la pseudocapacidad.
- *Pseudocondensadores:* Son construidos con polímeros conductores u óxidos de metales, principalmente metales de transición.
- *Condensadores híbridos:* Estos trabajan en los dos tipos de almacenamiento, tienen en cuenta el proceso físico y el químico por igual.



*Figura 33: Tipos de supercondensadores*

Una vez que se ha explicado cómo están contruidos los supercondensadores y que tipos hay paso a explicar sus características principales. La principal ventaja que presentan los supercondensadores frente a las baterías es que tienen una densidad de potencia bastante más elevada que las baterías anteriormente descritas, y esto significa que la capacidad de carga y descarga es mucho más rápida y es capaz de entregar la energía que tiene almacenada casi al instante. Esta característica mejora sustancialmente uno de los factores limitantes que tiene el vehículo eléctrico en la actualidad: el tiempo de recarga que se reduce en gran medida.

Otra ventaja de los supercondensadores es su vida útil, dado que la producción de energía se produce en parte por descargar la energía estática que tiene entre los electrodos y no dispone de materiales que se vean afectados durante su funcionamiento. La cantidad de ciclos que puede hacer sin perder cualidades es muy elevada, superando los 10.000 ciclos sin degradación, permitiendo trabajar en buenas condiciones durante 10-15 años.

Teniendo en cuenta estas características, todos los coches eléctricos utilizarían estos sistemas en vez de las baterías. Esto nos lleva a preguntarnos, ¿por qué no se utilizan ya? Los supercondensadores no se utilizan como único sistema de almacenamiento dado que presentan un gran inconveniente: la densidad energética que tienen es muy inferior a la de una batería de litio actual, en torno a unas 20-30 veces menos.

Pero esto no descarta su uso de forma definitiva en el mundo de la automoción. Se están desarrollando combinaciones de materiales para poder mejorar sus características. Un ejemplo sería el de la empresa QUT [40] que ha diseñado un tipo de supercondensador compuesto por un cátodo de carburo de titanio, típico de los condensadores y un ánodo de grafeno, típico de las baterías. Con este prototipo se ha conseguido una autonomía de 233 km, muy por debajo de la que ofrecen las baterías que ya se están utilizando, aunque tiene las ventajas que ya hemos comentado antes y es que se puede cargar más rápidamente y entregar más potencia.

Por otra parte, la técnica que tiene más posibilidades de llegar a implementarse es la de desarrollar sistemas híbridos de acumuladores de energía eléctrica. Esto significaría disponer

en un mismo automóvil de una batería y un pack de supercondensadores para que trabajen de forma conjunta y así mejorar las prestaciones del vehículo

En el artículo “Hybrid Energy Storage System using supercapacitor for electric vehicles” [41] han diseñado y simulado un sistema como el descrito anteriormente, en el que al mismo bus de corriente continua, llamado DC Link, se conectan los dos sistemas.

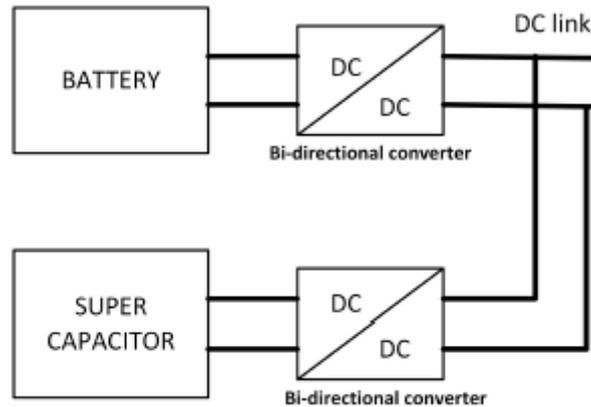


Figura 34: Sistema híbrido con baterías y supercondensadores

Con este tipo de arquitectura se pretende que los supercondensadores se encarguen de entregar la energía en los momentos que se produzcan picos de corriente, ya que estos tienen más facilidad para suministrar grandes cantidades de potencia en poco tiempo sin sufrir problemas internos. Por ello se diseñó un control en el que cuando se detectara un pico de corriente, la energía fuera suministrada por el supercondensador, mientras que cuando la corriente estaba estabilizada se usara la batería. En la siguiente imagen se pueden apreciar los bloques de control que se emplearon, el sistema de control utilizado es un PI.

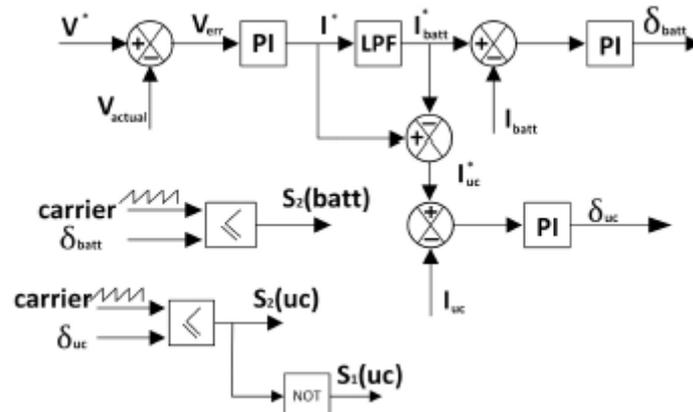


Figura 35: Control del sistema híbrido

Para la realización del ensayo primero se comprobó cómo se comportaba el sistema sin los supercondensadores, en el cual tiene variaciones rápidas en la corriente que se tiene que suministrar. Se observa que estos picos son instantáneos, los cuales pueden dañar a las celdas de la batería. Posteriormente se realiza la misma simulación, pero con los supercondensadores como sistema de apoyo. En este caso las variaciones de corriente que sufre la batería son mucho más suaves, lo que ayuda a alargar su vida útil. En cambio, los supercondensadores sí que admiten estos picos de corriente, y no se dañan. En la siguiente imagen se ven a la izquierda las gráficas del sistema solo con batería, mientras que a la derecha se muestran los resultados del sistema híbrido. La primera fila es la tensión del DC Link, la segunda fila es la corriente que entrega la batería en ambos casos y la última es la gráfica de la corriente del supercondensador.

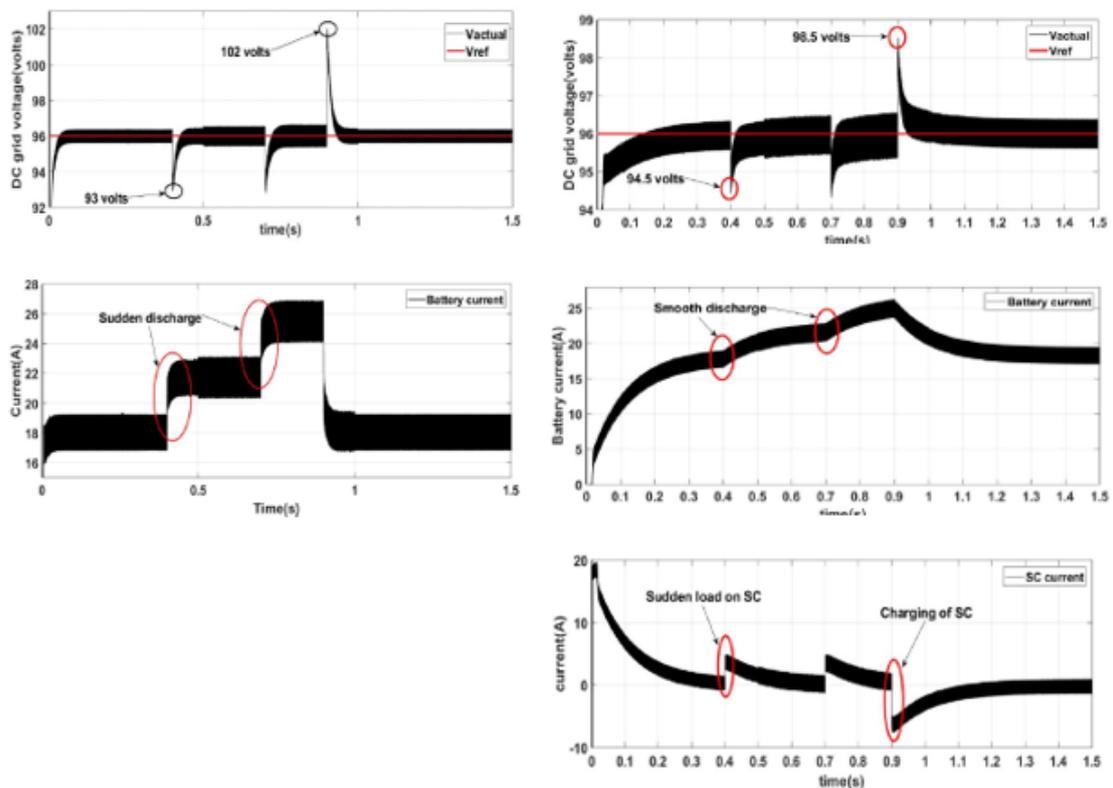


Figura 36: Comparación de comportamiento entre una batería y el sistema híbrido

Observando estos resultados se concluye que este sistema puede ser interesante en el sector del automóvil, dado que mejora el rendimiento del sistema y además cuida el estado de la batería evitando descargas rápidas, lo cual alarga la vida útil de esta.

## 3.2 BMS (Battery Management System)

El primer coche que incorporó un sistema de BMS fue el Ford Ranger EV en 1998 y actualmente es uno de los elementos más importantes en los vehículos eléctricos. El conjunto de la batería que tienen estos coches está formado por packs, debido a la modularidad que se consigue, pudiendo colocarlas en distintas posiciones consiguiendo así configuraciones distintas en función del vehículo que se fabrique. Estos packs, a su vez, están formados por celdas individuales que tienen una tensión nominal cercana a los 3.6 - 3.8 Voltios. Para poder conseguir las tensiones y corrientes de funcionamiento para el sistema de tracción se deben conectar estas celdas en serie y paralelo. En la gráfica siguiente se puede apreciar la curva de funcionamiento habitual de una celda de este tipo.

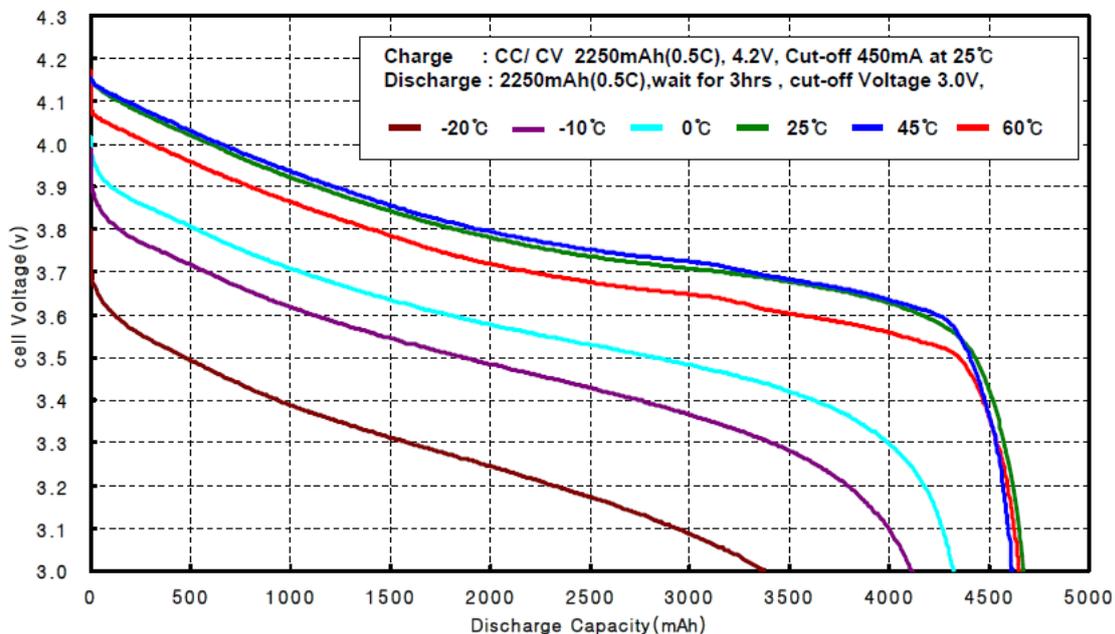


Figura 37: Curva de tensión de una celda en función de la temperatura

Como se puede ver en la figura 37, un factor muy importante para el correcto funcionamiento de estas celdas es la temperatura en la que se produzca la carga y descarga, dado que esto puede hacer que en un primer instante se reduzca el rendimiento y a largo plazo se vea reducida su vida útil al dañarse internamente en estas condiciones. Una de las funciones que tiene el BMS es la de comprobar la temperatura de cada una de las celdas y, en caso de ser necesario, dar la orden correspondiente al sistema de refrigeración para calentar o enfriar las celdas para que éstas trabajen en la temperatura correcta, que suele ser de 25º C.

Además de obtener los datos de temperatura de cada una de las celdas, también obtiene la información de las tensiones de las celdas, así como la corriente que entra y sale de cada una de estas. Aunque, si se quiere simplificar, se puede obtener la corriente a la salida de cada uno

de los conjuntos serie/paralelo de celdas. Con estos tres datos se puede obtener información muy valiosa del conjunto de la batería.

Al obtener todos estos datos, el BMS sirve como sistema de adquisición de datos que se utilizará a posteriori para mejorar los sistemas implicados en la gestión de la batería. También, gracias a estos datos, se puede hacer una buena gestión de la energía del vehículo en cada momento.

Aunque todas las celdas en principio tengan las mismas propiedades por ser de los mismos materiales, puede ser que, por problemas de fabricación o por desgaste, haya celdas que se carguen o descarguen más rápido que el resto de las que se encuentran en el mismo conjunto [42]. Esto afecta a que la celda más “débil” es la que determina el funcionamiento del resto. Por ejemplo, cuando se está descargando y una de las celdas se queda sin energía ese conjunto al completo se apaga, aunque en el resto de las celdas siga habiendo energía utilizable. En el caso contrario que la batería se esté cargando, si una de las celdas obtiene su carga máxima el conjunto deja de cargarse, aunque el resto todavía no estén completamente cargadas. Como es lógico esto afecta a las prestaciones del vehículo ya que se desperdicia energía en ambos procesos.

Para evitar estos inconvenientes, el BMS tiene la función de hacer un balance entre cada una de las celdas para que las tensiones sean lo más parecidas posibles entre ellas, para así mejorar las prestaciones de cada conjunto de celdas. Este balanceo se puede hacer de dos maneras, llamadas *pasivo* o *activo*.

El *balanceo pasivo* es el más sencillo, aunque se utiliza más para las baterías de plomo y ácido, y consiste en derivar esa energía hacia el chasis de la batería.

El *balanceo activo*, que es el más utilizado en las baterías ion litio, es el que necesita un circuito suplementario que se encargue de transferir la energía de las celdas más cargadas. Algunos de estos sistemas se analizan en el artículo “*Various Methods Used for Battery Balancing in Electric Vehicles*” [43] y los más importantes son los siguientes:

- **Resistencias de descargas:** Este método es el más barato, sencillo y en consecuencia el más utilizado. Este sistema, durante la carga de la batería, si el BMS detecta una sobre tensión en alguna de las celdas, con un sistema de interruptores conectan las resistencias de descarga hasta que la tensión de todas las celdas sea la misma. El problema de este sistema es que se necesita una resistencia por cada una de las celdas y al pasar por ellas la corriente se produce calor que puede dañar el conjunto de celdas.

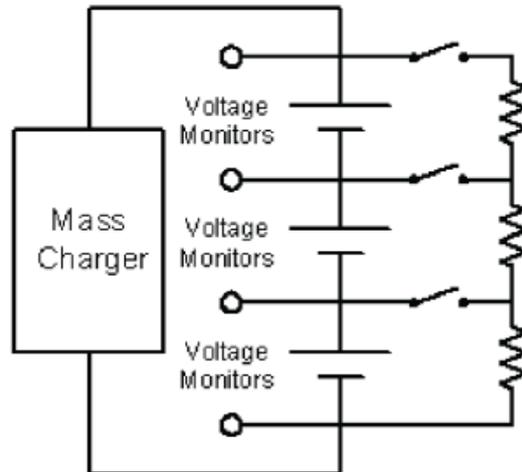


Figura 38: Balanceo con resistencias de descarga

- Control con condensadores:** En este sistema se utilizan condensadores que, en el caso de que alguna de las celdas este ya cargada, se activan los interruptores que conectan el condensador. Éstos se cargan y después se puede utilizar esta energía de nuevo para cargar las celdas que tienen menos energía. Los inconvenientes que tiene este sistema es que es muy complejo dado que se necesitan dos interruptores por condensador y que además se utiliza uno menos, por lo que una de las celdas se queda sin balancear. Por ello, es un sistema incompleto.

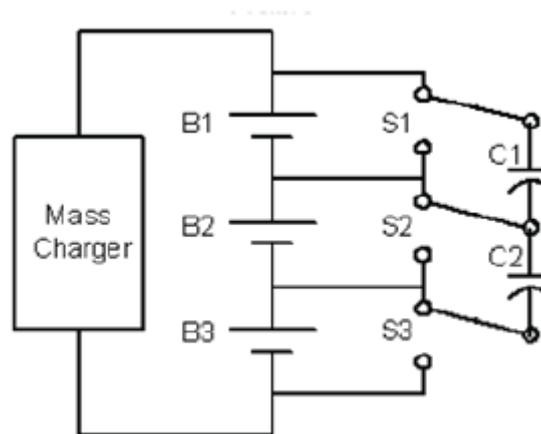


Figura 39: Balanceo con condensadores

- Convertidores de potencia:** Este es otro de los métodos más utilizados en los vehículos eléctricos dado que es muy eficaz y fiable. En ellos se utilizan convertidores bidireccionales que permiten la conexión de dos celdas, la que está más cargada y la que está menos cargada para así mejorar el estado de carga de la más débil. Esto se consigue a través de unos interruptores que controla el BMS.

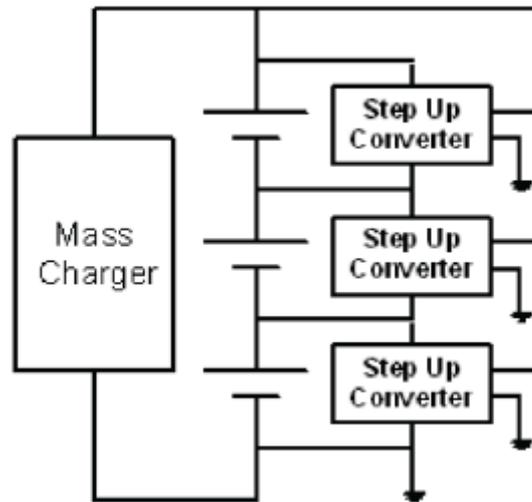


Figura 40: Balanceo utilizando convertidores

El problema que tiene este método es que solo se pueden conectar dos celdas al mismo tiempo, por lo que no se pueden balancear todas las celdas a la vez. Además, este sistema es muy complejo y costoso dado que las baterías que se utilizan en los coches eléctricos tienen un gran número de celdas.

En otro artículo, "EV BMS with Time-Shared Isolated Converters for Active Balancing and Auxiliary Bus Regulation" [44], se plantea un sistema que utiliza la idea de los convertidores, pero simplificándolo al utilizar solo uno de estos por conjunto. Además, para poder conseguir un sistema en el que se conecten todas las celdas en una parte del convertidor, se utiliza la batería de los sistemas auxiliares para completar el bus. La arquitectura del sistema sería la siguiente:

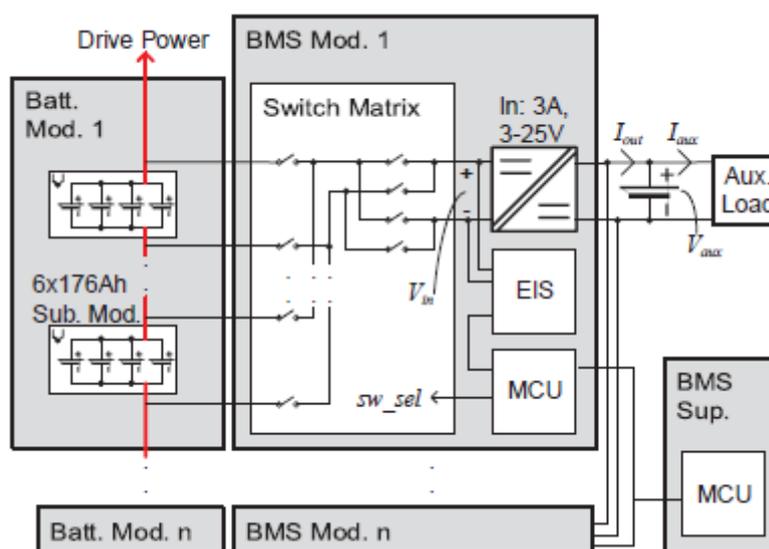


Figura 41: BMS con balanceo de convertidores

En el sistema se ve que el conjunto de las celdas se conecta a un solo convertidor, en donde la tensión de entrada variara entre 3-4.2 V. En este bloque, denominado BMS mod, se evalúa el estado de cada una de las celdas para conectarlas al convertidor cuando éstas estén más descargadas que el resto. Cada uno de los conjuntos de celdas tienen esta misma configuración y cada uno de ellos se van conectando al bus en función de las necesidades que tengan. También hay un BMS que supervisa a cada uno de estos submódulos para conseguir el correcto funcionamiento del sistema completo.

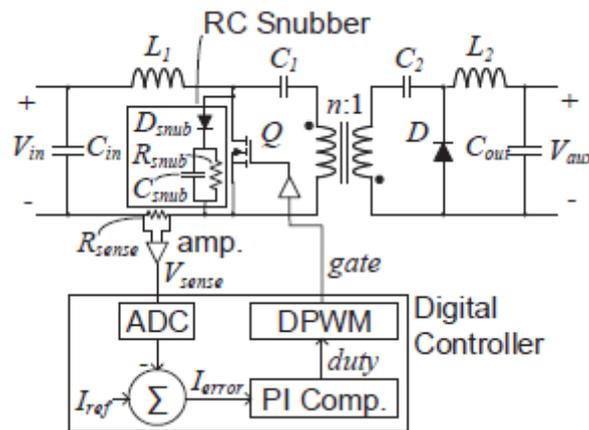


Figura 42: Sistema de control de balanceo

En la figura 42 se puede apreciar cual es la configuración del convertidor que se ha utilizado y la parte de control que tiene el sistema para, a través de un control PI, obtener una señal de control PWM que defina el pulso necesario para obtener los valores deseados.

Gracias a estos sistemas, con convertidores, se puede conseguir balancear todas las celdas, tanto para el caso de que una se cargue más rápidamente, como para cuando una se descarga más que el resto para cargarla y así alargar el tiempo de utilización del conjunto de celdas.

Con esto se tiene una monitorización constante del estado de las celdas a la hora de cargarse y descargarse aumentando así el rendimiento de las baterías todo lo posible. Además, con estos procesos de control se consigue aumentar la vida útil dado que no se dañan las celdas por dentro al no tener sobrecargas ni descargas bruscas y se mantiene a las celdas en un estado similar al resto.

Aunque en la figura 41 se ha visto un esquema del BMS de un caso específico, como es el caso del uso de un convertidor, en la figura 43 se puede apreciar un diagrama más general de cómo es un BMS.

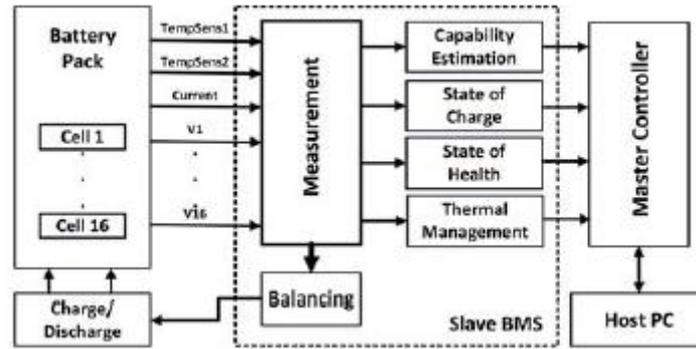


Figura 43: Estructura general de un BMS

A nivel Hardware se puede ver que cada uno de los paquetes de celdas tiene un sistema de BMS que se encarga de controlar sus celdas. Este sistema se encarga de obtener los datos y con ellos calcular los parámetros de estado de carga (SoC) de las celdas. El resultado es el porcentaje de energía que le queda al conjunto de celdas. Esta información es muy importante debido a que, en base a esto, se calcula cual es la autonomía restante del vehículo.

También se calcula el estado de salud (SoH) de cada una de las celdas. Esto determina si la capacidad máxima de la celda sigue siendo la misma que tenía al inicio o si ha disminuido, que es lo normal que suceda a lo largo del tiempo por todos los factores que ya se han comentado. Si la celda sigue almacenando la misma energía es que tiene un buen estado de salud, pero cuando esta capacidad va disminuyendo este factor se empeora.

Toda esta información se manda a un módulo central (máster) que reúne la de todos los conjuntos y analiza el estado general de la batería al completo. Después, este módulo central manda la información al resto de sistemas para que se pueda notificar al usuario, al personal de servicio o a cualquiera que pueda necesitarla.

Por ello, este máster debe tener varios sistemas de comunicación disponibles como es la serie utilizada con el resto de los BMS esclavos (slaves), la comunicación CAN con el resto de los sistemas del coche, ya que este es el protocolo de comunicación más utilizado en el sector de la automoción entre sistemas debido a su robustez y la gran cantidad de elementos que se pueden conectar a él [45]. Además, este máster puede incorporar salidas y entradas digitales o analógicas para otros requisitos que pueda tener el sistema.

Se está intentando desarrollar un BMS inteligente que consiga predecir los estados de carga de las baterías. En el artículo *“An Extensive Comparison of State of Charge Estimation of Lithion ion Battery – Towards Predictive Intelligent Battery Management System for Electric Vehicles”* [46] se analizan cuáles son los posibles métodos de estimación basándose en modelos de baterías y realizando simulaciones en Matlab Simscape.

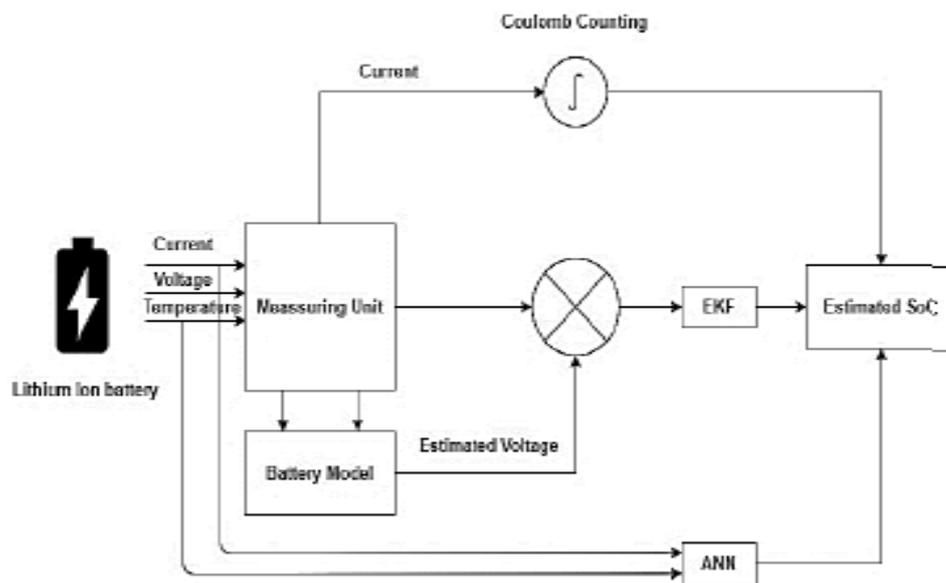


Figura 44: Modelado de simulación para BMS predictivo

Como se puede ver se han utilizado tres métodos para estimar el estado de carga

- **Coulomb counting:** Este método es el más sencillo y el más utilizado. Se encarga de calcular los amperios que se han consumido en un tiempo determinado. Esto se consigue integrando el valor de la corriente, dividida por su capacidad total, con respecto al tiempo. El problema de este método es saber con certeza cuál es el estado de carga previo y además, que la precisión de la medida de corriente tiene que ser elevada para no introducir mucho error.

$$SoC_t = SoC_0 + \int_0^t \frac{I_t}{C_{bat}}$$

- **Extended Kalman Filter (EKF):** Este método utiliza los datos del modelo de Simscape. El filtro de Kalman es un estimador de estado lineal que supera los errores de estimación de estado mediante la elección adecuada de la covarianza del error. Los sistemas complejos no lineales, como la batería de iones de litio, utilizan el algoritmo de filtro de Kalman extendido para estimar su estado.
- **Artificial Neuronal Network (ANN):** Las redes neuronales son elementos que utilizan el *machine learning* que tiene una gran flexibilidad a la hora de resolver sistemas no lineales. Para que una red neuronal funcione correctamente hay que entrenarla con el sistema a analizar. Para conseguir la mejor respuesta se necesitan hacer pruebas y quedarnos con la que obtenga mejores resultados.

En el artículo se analizan estos tres métodos para ver cuál es el que tiene un menor error a la hora de comparar el valor real con el predicho. Para esto se han utilizado dos ecuaciones de cálculo de error, Mean Average Error (MAE) y Root Mean Square Error (RMSE).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_1^n (\text{real value} - \text{predicted value})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (\text{real value} - \text{predicted value})^2}$$

Figura 45: Ecuaciones para obtención del error

Con estas ecuaciones y una vez realizadas las simulaciones, se obtuvieron los siguientes resultados:

Method	Parameters	
	MAE	RMSE
CC	-0.49627	0.01820
EKF	-0.00474	0.00190
ANN	-0.00138	0.00076

Figura 46: Resultados de las simulaciones

Viendo estos resultados se puede concluir que el mejor método es el que utiliza la red neuronal, dado que sus errores han sido los más pequeños, aunque también es cierto que este método es el más complejo de realizar.

### 3.2.1. Adquisición de datos

Como se ha descrito antes, una de las funciones principales del BMS es la de adquirir los datos de la batería como el voltaje, temperatura y corriente, entre otros. Estos datos se obtienen a través de los BMS esclavos que se encuentran en cada conjunto.

- **Tensión de las celdas**

Para obtener el valor de tensión de cada una de las celdas éstas se deben conectar a un chip, normalmente un microcontrolador, que disponga de canales ADC (Analog Digital Converter) para poder convertir el valor de tensión analógico en un dato digital y así poder utilizarlo. Estos son algunos de los ejemplos que se utilizan en la industria:

- Infineon Technologies (Siemens AG group) ha lanzado el TLE9012AQU [47], un chip que combina la adquisición de datos con el balanceo de celdas. Este microcontrolador

admite hasta un total de 12 canales ADC para 12 celdas para obtener los datos de tensión en todo el rango de operación y temperaturas con una precisión de  $\pm 5,8$  mV. A su vez, admite hasta cinco sensores de temperatura externos para el control de temperatura.

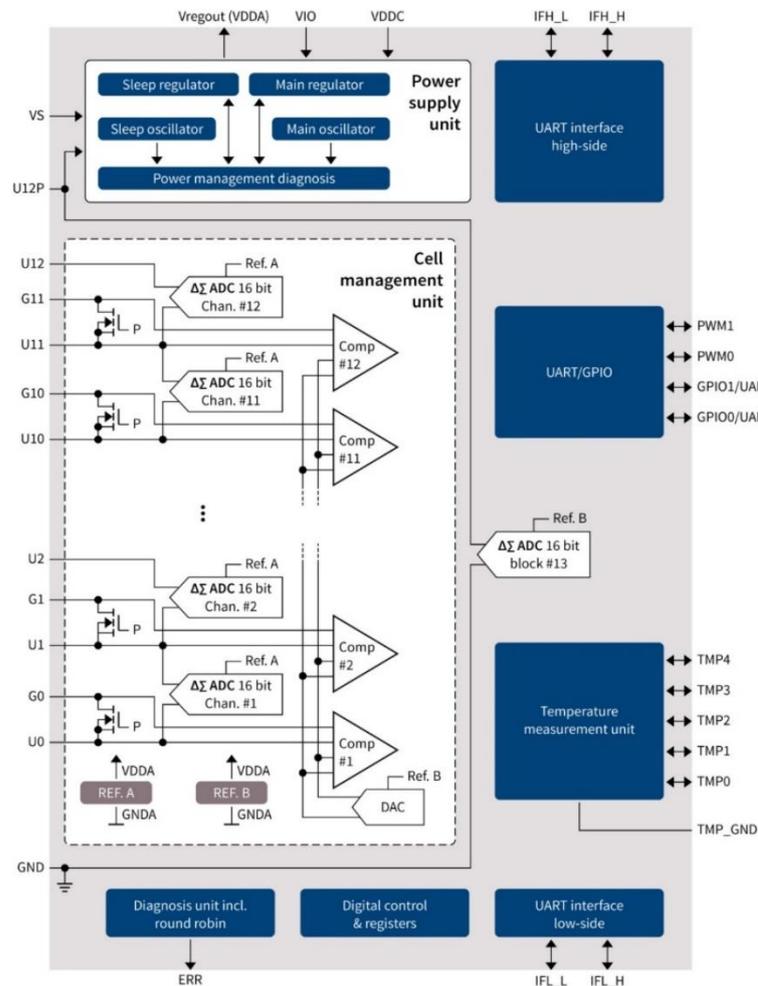


Figura 47: Microcontrolador Infineon Technologies TLE9012AQU

Como se ve en la imagen éste incorpora una interfaz de comunicaciones UART para comunicarse con otros BMS en el mismo sistema. El protocolo de comunicación permite un total de 20 microcontroladores conectados en serie y en anillo por lo que, si un dispositivo falla, el resto sigue pudiendo comunicarse. Teniendo en cuenta que cada uno puede controlar 12 celdas hace un total de 240 en el sistema, las cuales se pueden conectar en serie o en paralelo ya que el chip es capaz de diferenciarlos.

Además, incorpora un sistema interno de 12 interruptores en el interior del circuito integrado para gestionar un balanceo de celdas con una corriente máxima de 150 mA. En caso de que el balanceo necesite más corriente también dispone de otros 12 interruptores externos para conectar alguno de los sistemas de balanceo activo que ya se han definido anteriormente.

- STMicroelectronics también ha desarrollado algunos chips para la gestión de tensión de las baterías. Desde 2008 tiene acuerdos con empresas como LG Chem para el

desarrollo de elementos para BMS o el sistema de tracción eléctrica. Uno de estos elementos es el controlador L9963 con el cual se pueden monitorizar hasta 14 celdas [48].

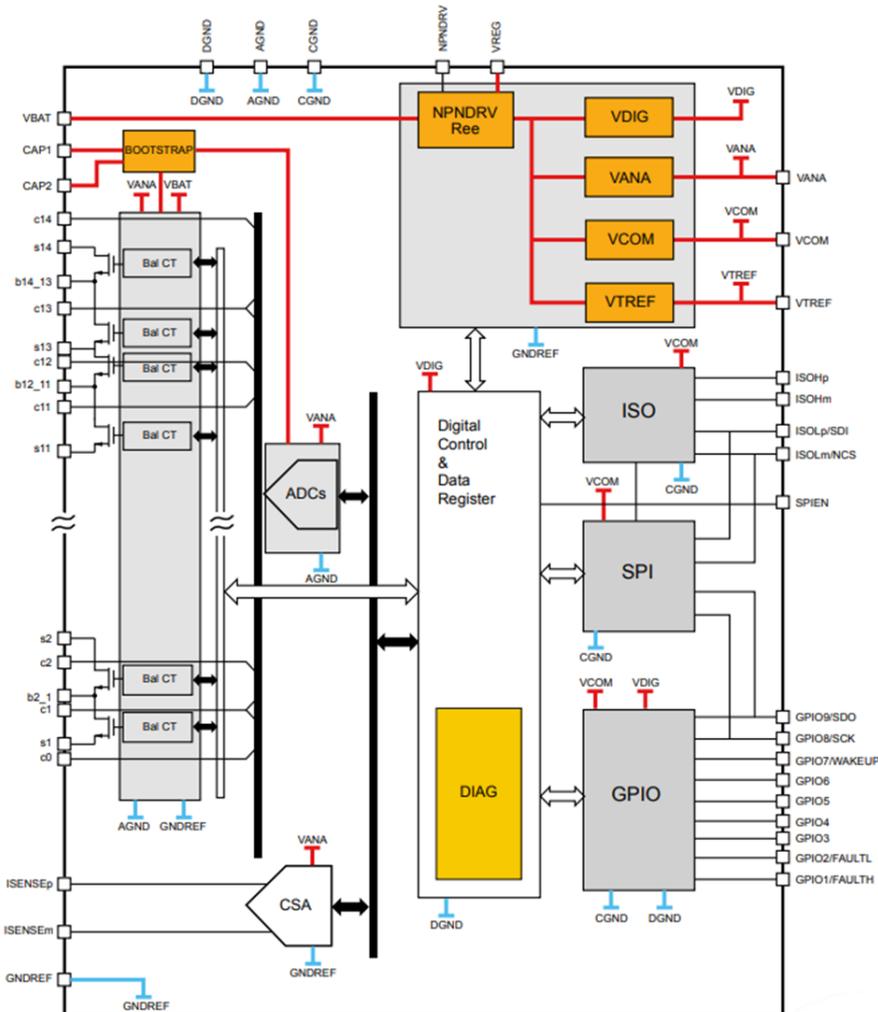


Figura 48: Microcontrolador STM L9963

Este circuito puede obtener los valores de tensión desde 1,7 V a 4,7 V con una precisión de  $\pm 2$  mV, un error casi nulo. Los valores de las 14 celdas se pueden obtener de manera simultánea evitando así problemas de desincronización entre las lecturas de los datos. De esta forma, las decisiones de balanceo son más acertadas. Al igual que en el caso anterior, con este microcontrolador se puede monitorizar hasta 7 sensores de temperatura externa.

El diseño del L9963 consigue que no sea necesario la utilización de diodos Zener para alimentarlo, lo que hace que la batería no se descargue mientras no esté en uso, ya que el consumo del BMS durante un tiempo prolongado puede conllevar que éstas se descarguen solas. En este caso, en lugar de usar una comunicación UART para comunicarse con el resto de BMS, utiliza la comunicación serie SPI (Serial Peripheral Interface) para mandar información al resto de elementos conectados al mismo canal.

Además, desde STMicroelectronics tiene disponible, y recomiendan su uso, uno de los microcontroladores de la serie SPC5 que se encargan de ser los maestros en la gestión de la energía y los que reciben la información de los esclavos para unificarla e informar del estado general de la batería.

- Maxim Integrated Product es otra de las empresas de circuitos integrados que han desarrollado microcontroladores para el uso de BMS [49]. El MAX17853 utiliza una arquitectura flexible que le permite monitorizar entre 8 y 14 celdas, dependiendo de las necesidades de diseño, conectadas en paralelo o en serie diferenciándolos de forma sencilla. Esto permite a los fabricantes realizar cambios en la configuración y así adaptarse a las demandas del mercado.

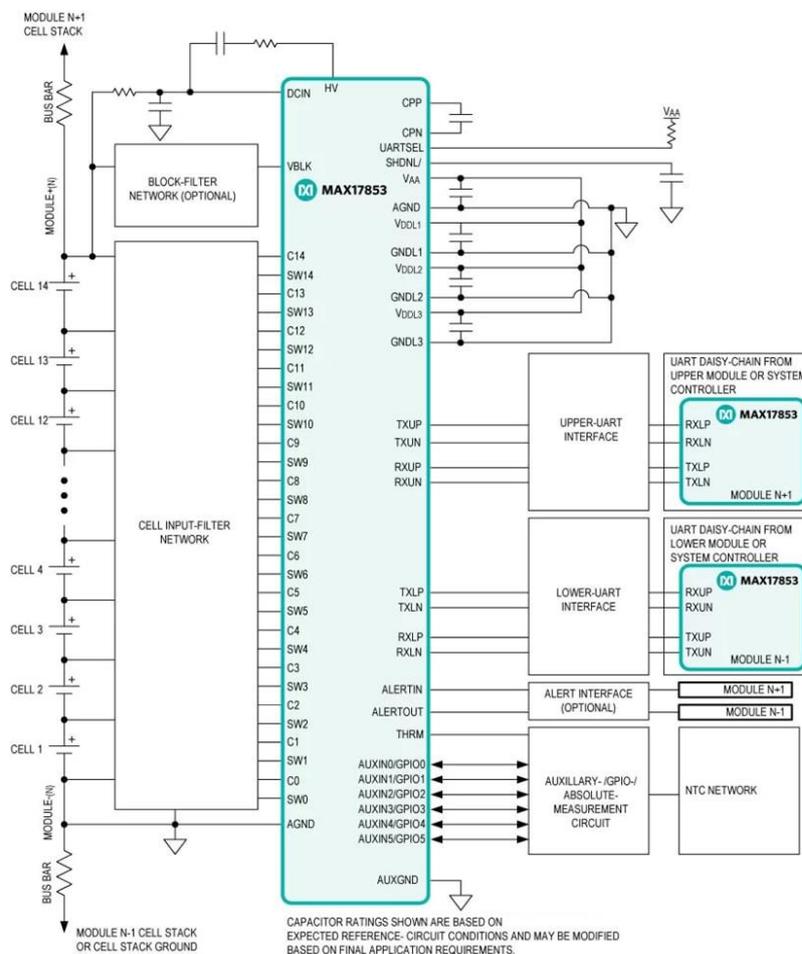


Figura 49: Microcontrolador Maxim Integrated MAX17853

Este microcontrolador fué de los primeros en lograr la compatibilidad con la norma ASIL\_D (Automotive Safety Integrity Level) que define la ausencia de riesgos que corre el sistema en caso de un mal funcionamiento de algunos de los sistemas eléctricos o electrónicos. La D representa el grado de seguridad del sistema, siendo la A el grado más bajo y la D el más elevado, por lo que en este caso el MAX17853 cumple los mayores requisitos de exigencia de seguridad.

- **Temperatura de las celdas**

La temperatura se tiene que controlar en todos los elementos electrónicos que trabajen con corrientes elevadas ya que su funcionamiento puede verse afectado por efecto de la temperatura. Esto incluye desde los motores eléctricos, el inversor hasta las baterías. Para el control de estas últimas se encarga el BMS. Como ya hemos visto existen microcontroladores que permiten la conexión de sensores externos de temperatura a la vez que la de tensión. Los sensores son los NTC.

NTC significa Negative Temperature Co-efficient, y funciona como una resistencia que disminuye su valor en función de la temperatura calculando el voltaje que sobre el dispositivo se puede calcular la resistencia que tiene y así a su vez obtener la temperatura, siguiendo la ecuación o curva que facilite el fabricante.

Uno de estos sensores es el B58703M1103A, un sensor desarrollado especialmente para aplicaciones como la automoción por la empresa TDK [50]. Ha sido testado en diferentes condiciones climáticas, químicas y mecánicas para garantizar un correcto funcionamiento a largo plazo, ya que el control de temperatura es un factor muy importante en la gestión de las baterías.



*Figura 50: Sensor de temperatura NTC*

El sensor está diseñado para trabajar con temperaturas entre los  $-40^{\circ}\text{C}$  y los  $150^{\circ}\text{C}$  de forma continua, pudiendo alcanzar  $200^{\circ}\text{C}$  durante un corto periodo de tiempo, con una tolerancia del 1%. Los cables del sensor cumplen el estándar LV112-4 para cables eléctricos en vehículos de motor y además van trenzados para evitar posibles alteraciones de medidas debido a los campos electromagnéticos. Además, el B58703M1103A incorpora una orejeta de cobre con un agujero para rosca M4 que permite colocarlo en todo tipo de posiciones con esta rosca.

- **Datos de corriente**

A la hora de obtener los datos de corriente se puede realizar de dos maneras: una es con un *sensor de corriente Hall*, que tienen un núcleo ferromagnético y al pasar la corriente por el

interior se genera un campo magnético. En función de este campo se puede determinar cuál es la corriente que ha circulado por el cable [51]. En la siguiente imagen se puede ver cómo funcionan más en detalle.

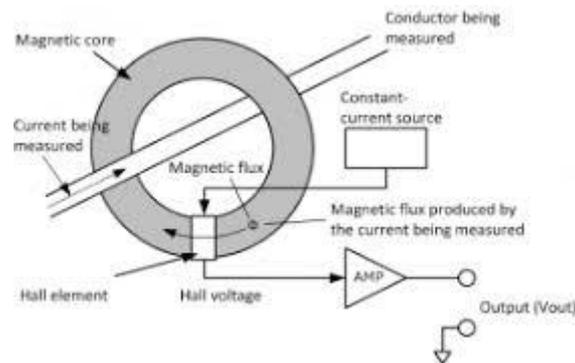


Figura 51: Sensor de corriente Hall

Estos sensores tienen una precisión mayor cuando pasan corrientes elevadas, ya que se genera más campo electromagnético. Un ejemplo de estos sería el modelo MLX91218, que puede medir corrientes desde 200 A hasta más de 2000 A. Una aplicación para este tipo de sensor sería tomar la corriente total que sale de la batería al completo, que puede estar entre esos valores fácilmente

Para el otro método se utiliza una resistencia, llamada “shunt”, de valor pequeño que esta entre 1 mΩ y 100 mΩ para que el consumo que tenga esta no altere al sistema [52]. Después obtenemos el valor de tensión que tiene esta resistencia y con este utilizamos la ley de Ohm para obtener finalmente la corriente. Un ejemplo de funcionamiento sería el siguiente:

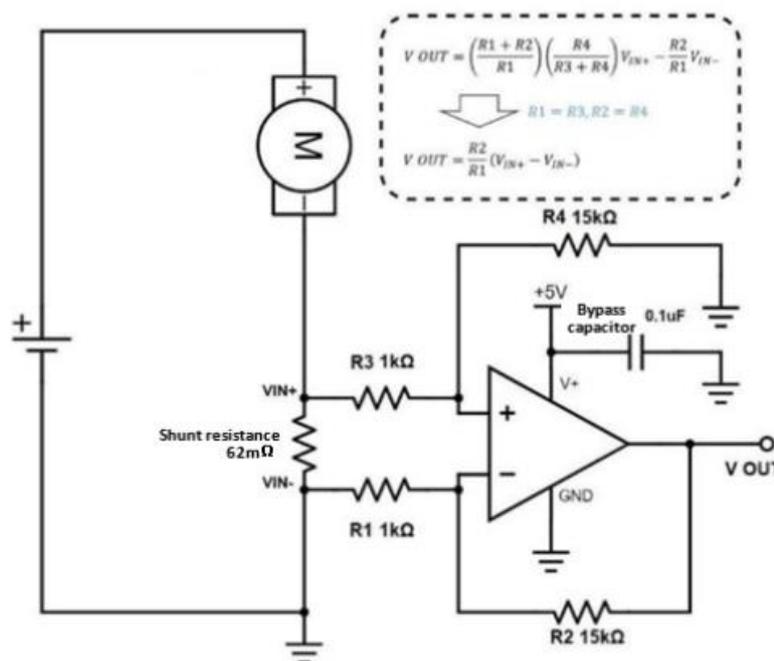


Figura 52: Medición de corriente por una resistencia “shunt”

- **Otros tipos de medición**

Como se ha visto anteriormente los BMS calculan el estado de carga de las baterías en función de la tensión y corrientes. Estos cálculos dependen de la veracidad y precisión de los datos obtenidos, lo que puede ser fuente de error. En el Instituto Fraunhofer ISC están desarrollando un proyecto con el cual se pueda obtener el estado de carga de la batería a través de sensores de ultrasonidos [53].

El estado de carga de las celdas es directamente proporcional a la densidad del ánodo. A medida que se descarga esta densidad disminuye y cuando se carga aumenta. Por lo que, al poder conseguir esa densidad utilizando los sensores de ultrasonidos, se puede obtener el valor sin depender de los cálculos de tensión y corriente. Además, este sistema de medición se puede alimentar desde otro medio que no sea la batería de tracción, lo que hace que no se produzcan autodescargas cuando la batería no esté en uso.

Por otro lado, aunque las baterías estén estancas en sus respectivas cajas y el diseño de los conductos de refrigeración sean también estancos y estén probados, a lo largo del tiempo estos pueden fallar. Debido a la corrosión de los materiales y a factores externos como el polvo, pequeños objetos que impacten en el exterior de la caja al ir circulando o por el agua de la lluvia o salpicaduras, puede suceder que se introduzca tanto líquido refrigerante como agua dentro del compartimento de las baterías.

Aunque por diseño se intente evitar todos estos casos, tiene que haber alguna manera de detectarlo en caso de que esto ocurra para impedir un daño mayor. Para evitarlo la empresa Amphenol Advanced Sensor ha diseñado un sensor que detecta la acumulación de agua o líquido refrigerante estancado dentro de los compartimentos de las baterías [54]. Estos sensores son capaces de detectar desde 2,8 mm de líquido estancado y así activar una alarma para que se acuda al taller a revisarlo cuanto antes y poder solucionarlo.

### 3.2.2. BMS inalámbricos (WBMS)

Actualmente todos los BMS se comunican entre ellos a través de un arnés de cables pesado y costoso. Aunque es un sistema robusto de comunicaciones tiene ciertos inconvenientes como el deterioro con el paso del tiempo, la continuidad entre ellos que puede verse afectada por cortes en los cables, que ocupan un espacio que podría ser utilizado por otros sistemas o que son difíciles de mantener y reparar.

Para evitar estos problemas las empresas están desarrollando sistemas BMS que se comunican de manera inalámbrica. Esto permite una reducción de peso y tamaño, evita mantenimientos costosos y además añade un gran factor de modularidad, ya que si se quieren hacer modelos con más paquetes de celdas no se necesita hacer un cableado nuevo para la conexión. Esto favorece a la autonomía ya que se consiguen sistemas más livianos al reducir el cableado necesario al 90% y permitir más espacio extra para baterías.

Una de las opciones que se plantean es la de utilizar la nube como sistema de almacenamiento de datos. Una empresa emergente como ION Energy ha lanzado una batería funcional para

vehículo pequeño, de dos o tres ruedas, el cual es portátil y modular [55]. Ray Electric Motors, una empresa española de motos eléctricas se han asociado para trabajar conjuntamente.



Figura 53: Cloud BMS de ION Energy

Esta batería incluye un BMS inteligente para sacar el máximo partido a la energía que contiene, además de tener varios sistemas de comunicación inalámbrica como Bluetooth para conectarse al smartphone del usuario y recibir toda la información necesaria. Otro es la comunicación que tiene para mandar información a la nube mediante mensajes OTA (Over the air) y almacenar ahí los datos.

Esto se puede utilizar en dos aplicaciones, una es para empresas que tengan este tipo de vehículos para *car sharing* y así poder tener toda la información de su flota de vehículos al alcance y poder gestionar los estados de carga y de vida de todas las baterías.

Por otro lado, estos datos se pueden almacenar en grandes bases de datos donde se pueda aplicar el *big data* para trabajar con ellos y mejorar el sistema mediante el análisis de los mismos [56]. Dado el poder que la información tiene ahora en la industria 4.0, esto es una ventaja muy importante con respecto a sus competidores.

Otro de los métodos de comunicación inalámbrica es la radio frecuencia (RF). Este sistema está más pensado para realizar la comunicación entre los BMS esclavos, que se encargan de un conjunto de celdas, con el resto y con el microcontrolador maestro que administra y junta toda la información.

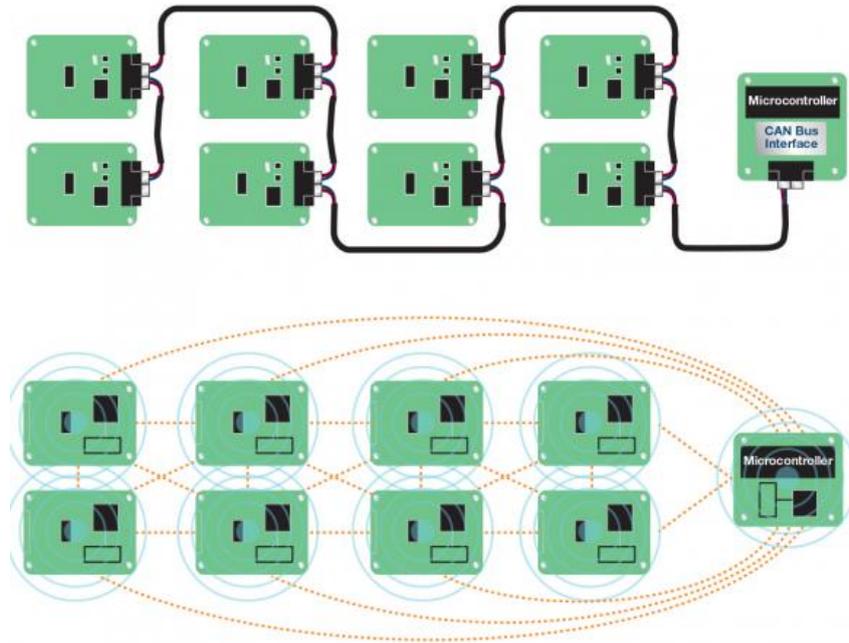


Figura 54: BMS cableado frente a BMS inalámbrico

Al igual que en los casos anteriores se van a dar solo algunas de las soluciones que están desarrollando las empresas de circuitos integrados. En este caso van a ser los de Texas Instruments y Analog Devices [57].

La solución de Texas Instruments utiliza el chip CC2662R-Q1, que se basa en una comunicación de RF de 2.4 GHz SimpleLink, una frecuencia cercana a la que utiliza el Bluetooth Low Energy (BLE) aunque con ciertas modificaciones para mejorar su funcionamiento, seguridad y evitar interferencias. En la siguiente figura se puede ver un diagrama del microcontrolador [58].

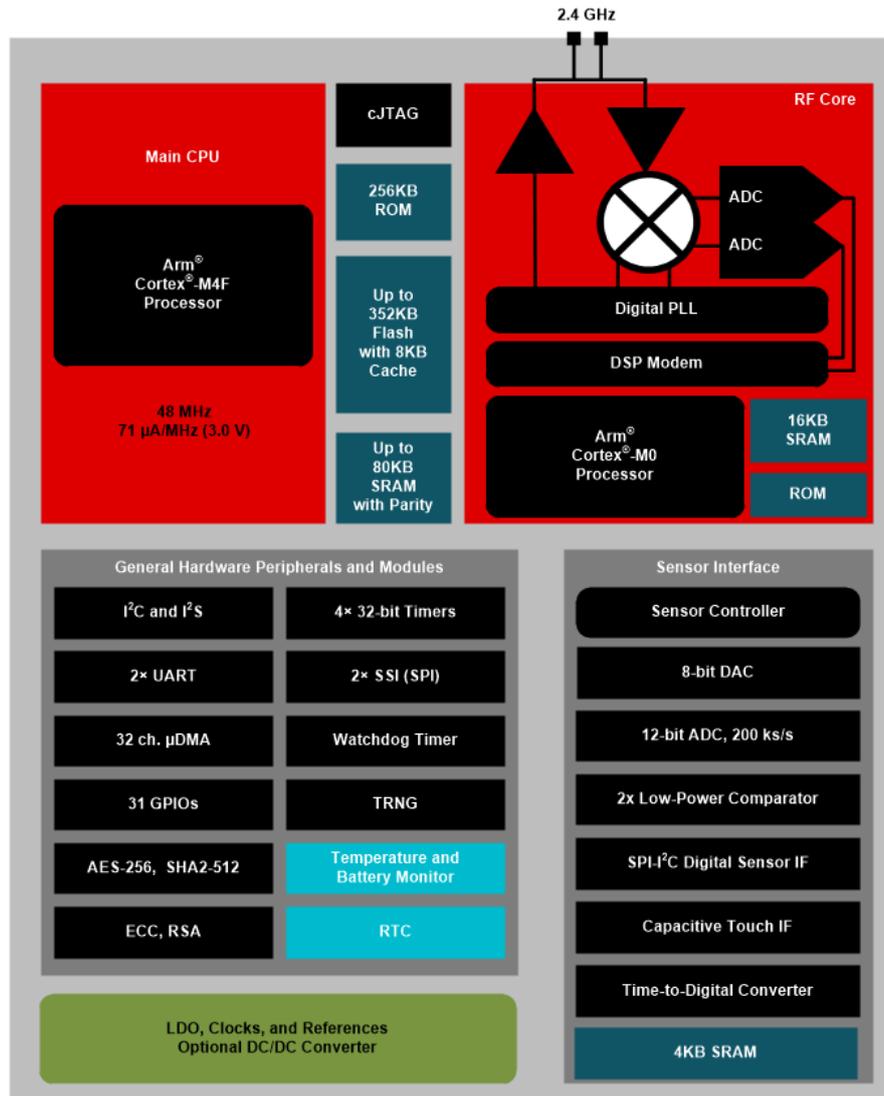
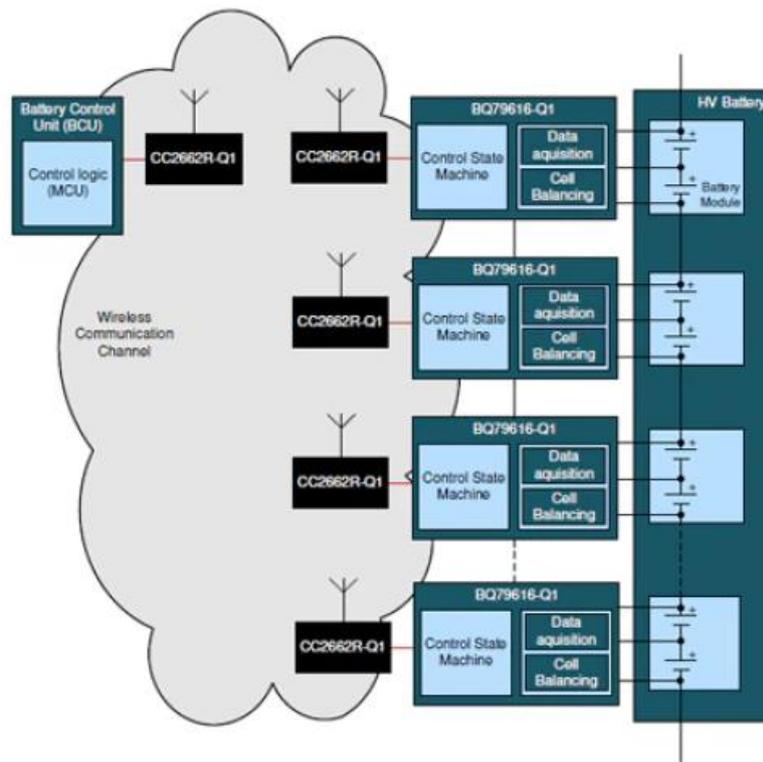


Figura 55: Chip Texas Instruments CC2662R-Q1

Además, Texas Instruments ha solicitado a la empresa independiente alemana TÜV SÜD que comprara el funcionamiento de este sistema WBMS para poder conseguir el certificado de cumplimiento ASIL-D, cuyo significado ya se ha explicado anteriormente. Se ha comprobado que utilizando esta comunicación tiene una tasa de error en el envío de paquetes de datos menor de  $10^{-7}$ .

El circuito integrado CC2662R-Q1 que se encarga de la comunicación se conecta tanto a los sistemas de medición de datos de las celdas como al módulo central que se encarga de recibir toda la información. La precisión del sistema en la lectura de voltajes es de  $\pm 2$  mV con una latencia entre mensajes de 2 ms, lo que permite una lectura casi inmediata de todos los módulos, a una velocidad máxima de 1,2 Mb/s en el mejor de los casos [59]. Para mayor seguridad se intenta que todo el paquete de baterías este dentro de una jaula de Faraday, una caja metálica, para que así se bloqueen las interferencias que puedan existir en el entorno exterior. Con este sistema se puede llegar a conectar hasta 100 nodos simultáneamente. Teniendo en cuenta que cada uno de ellos puede gestionar entre 12-18 celdas, se pueden controlar baterías de un gran número de celdas con este WBMS.



*Figura 56: Sistema BMS inalámbrico usando el chip CC2662R-Q1*

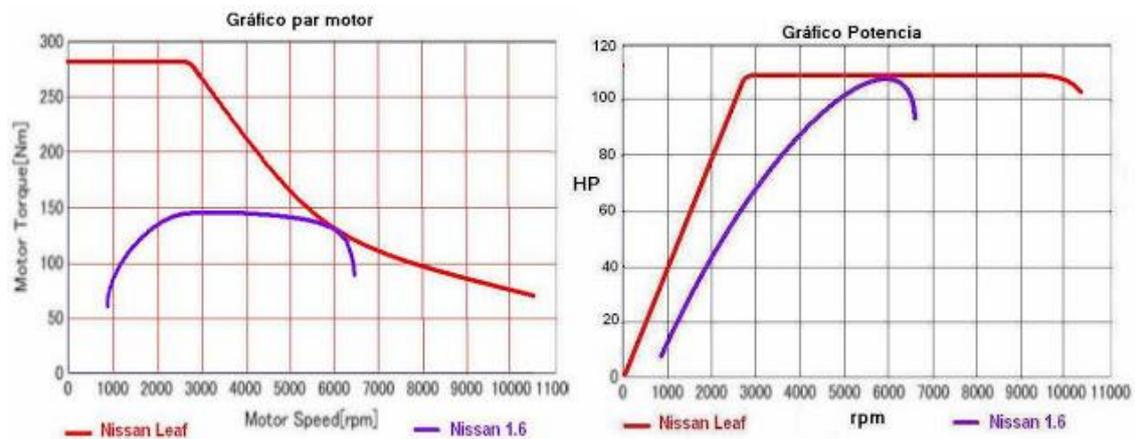
Por otro lado, Analog devices se ha unido a General Motors para desarrollar un sistema WBMS para todos sus modelos eléctricos que utilizarán las baterías Ultium, los cuales están previstos para 2023 [60]. Todavía están en fase de desarrollo, pero sí que se sabe que utilizará una comunicación similar a la de Texas Instruments, empleando radiofrecuencia de 2,4 GHz.

Dado que GM quiere usar este WBMS para todos los modelos, le permitirá abaratar costes porque el desarrollo será el mismo para todos. Lo único que puede verse afectado es el número de módulos que existan en la batería y la disposición que tengan, pero, al no tener que hacer un cableado para cada uno, el ahorro en materiales y en la fase de diseño es substancial.

### 3.3. Motores eléctricos

Otro de los elementos más importantes, en cualquier tipo de automóvil, es el motor que transforma la energía en movimiento. En los coches tradicionales ha sido un motor de combustión. En los coches eléctricos se tiene que instalar un motor eléctrico que haga esta función.

Un detalle curioso es que las propias marcas de automóviles no dan mucha información sobre los motores que utilizan sus modelos. Mientras que en los vehículos de combustión sí que se informa de las características que tienen sus motores como son la cilindrada, potencia, tipo de inyección de combustible, ratio de compresión y una larga lista de información, cuando miras los modelos eléctricos no hay tanta explicación sobre las características de los motores eléctricos. Si que se informa de la potencia y de la disposición, si es trasera, delantera o a las cuatro ruedas, con dos motores por eje, pero nada del tipo de corriente que utiliza, tensión de trabajo...



*Figura 57: Comparación prestaciones motor eléctrico vs combustión*

Los dos tipos de motores tienen características y prestaciones completamente diferentes, como se puede ver en la imagen. En estas gráficas se están comparando dos motores con la misma potencia nominal (109 CV). El de la curva roja es eléctrico y el de la curva morada es de gasolina, pero sus gráficas son completamente diferentes [61].

Analizando la gráfica del par, que es la fuerza con la que gira el eje del motor y se mide en Newton/metro, lo primero que se aprecia es que en los motores eléctricos la entrega de par máximo es inmediato desde parado, mientras que en el caso del motor de gasolina hay una franja de revoluciones, de parado a 800 rpm (revoluciones por minuto), en las que no se genera potencia porque el motor se desincroniza y se acaba parando. Cuando el de combustible comienza a entregar potencia lo hace de manera progresiva hasta que se alcanza el máximo cerca de 3000 rpm.

Esto se traduce en que la aceleración que se consigue en los coches eléctricos es muy superior al resto. De hecho, con algunos motores eléctricos que tienen un par muy elevado se les ha

tenido que restringir en las aceleraciones desde parado porque llegaban a romper los palieres que conectan el motor a las ruedas. También se puede observar como el motor eléctrico tiene más par durante todo el régimen de revoluciones. Por esta razón, los motores de combustión interna necesitan cajas de cambios que modifiquen la relación de transmisión para conseguir que el motor trabaje en las mejores condiciones y obtener el par y velocidad adecuados.

Observando ahora la gráfica de potencia se puede apreciar que, efectivamente, los dos alcanzan el mismo máximo de 109 CV en algún momento de su funcionamiento. En esta gráfica también se puede apreciar que la curva del eléctrico siempre es superior a la de combustible. Además, este último solo alcanza la potencia máxima durante unas pocas revoluciones cercanas a las 6000, mientras que el eléctrico alcanza el máximo mucho más rápidamente, poco antes de 3000 rpm y mantiene la potencia durante más tiempo, hasta las 9500 revoluciones. Esta es otra característica interesante. En la mayoría de los motores de gasolina, salvo los de alto rendimiento, sus revoluciones de corte están entre 7000 y 8000. Por el contrario, los motores eléctricos pueden extender su funcionamiento a más de 10000 rpm.

Todos estos datos indican que las prestaciones que se consiguen en el coche eléctrico son mucho mejores que en el de gasolina, ya no solo en par y potencia, sino también cuando se habla de eficiencia energética. En el caso de los motores de combustión las prestaciones se encuentran entre el 20 y el 30 por ciento porque existen muchas pérdidas en el proceso.

La pérdida de energía más importante es la del calor generado que se disipa por el sistema de escape y la que absorbe el bloque del motor que luego hay que disipar para que no se recaliente. Además, al tener tantos elementos mecánicos entre la explosión de combustible y el movimiento de la rueda, hay muchos elementos intermedios, correa de distribución, engranajes de la caja de cambios, cigüeñal, etc., que también generan pérdidas.

Por otro lado, los motores eléctricos no tienen todos estos problemas. Los elementos mecánicos intermedios son casi inexistentes y la potencia se genera mediante el uso de campos electromagnéticos, por lo que no se necesita calor para generar el movimiento. Gracias a esto se consigue una eficiencia energética media del 90%, pudiendo alcanzar en algunos casos el 95%. Comparando este valor con el de combustible se puede apreciar la mejora que supone el uso de estos motores.

Ahora bien, ¿cómo funciona un motor eléctrico? Estos se pueden separar en dos categorías generales, diferenciados por el tipo de alimentación que tienen: si es de Corriente Continua (DC) o si es Corriente Alterna (AC). Sin embargo, ambos tienen una estructura general similar y es la siguiente [62]:

- **Estator:** Es el cilindro exterior que se mantiene estático durante el funcionamiento y que tiene en su interior las bobinas de cobre. Con el paso de corriente por estos cables se genera el campo magnético que hará mover el motor. Este campo magnético se va girando mediante conmutaciones o cambios de fase, dependiendo del tipo de motor que sea, si es de AC o DC.
- **Rotor:** Es la parte móvil del motor, al cual se le acopla un eje de salida para transferir el movimiento. Este eje puede ser de varias formas, que se explicarán más adelante, y su funcionamiento se debe a que el cilindro sigue la polaridad de campo magnético que genera el estator.

- **Carcasa exterior:** Todos los elementos están en el interior de una carcasa que se utiliza también para disipar el calor que se genera dentro. En algunos casos se coloca un ventilador en el propio eje del rotor para favorecer este enfriamiento.

Los motores eléctricos no necesitan de un sistema de caja de cambios ni embrague, elementos que sí son imprescindibles en los motores de combustión, aunque hay algunos modelos de altas prestaciones, como el Porsche Taycan, que cuenta con una caja de cambios automática de dos velocidades para mejorar su rendimiento [63].

### 3.3.1. Motores de corriente continua

Estos motores, como su propio nombre indica, son los que utilizan corriente continua para funcionar y en la industria de la automoción se usan principalmente dos de ellos.

- **Motor DC con escobillas**

Este motor consta de un par de arranque muy elevado, lo que le hace ideal para operaciones de tracción. Tiene un fácil control de la velocidad a través de un controlador externo. Este motor funciona con unas escobillas que están en contacto con el colector, que hace las funciones de conmutador para alimentar las bobinas y generar los campos electromagnéticos con el electroimán y que va cambiando su polaridad para así repeler los imanes que están fijos en el exterior [64]. Además de estas características también es un motor bastante barato de fabricar.

Por otro lado, tiene algunos inconvenientes. Aunque se ha dicho que tiene un par elevado, esto solo sucede a baja velocidad siendo esto un problema, por ejemplo, para circular por una autopista. También, al tener las escobillas en contacto con el colector, se generan arcos eléctricos que produce desgaste de las piezas, generan calor y reducen su eficiencia.

En la siguiente imagen se puede apreciar un motor de estas características despiezado:

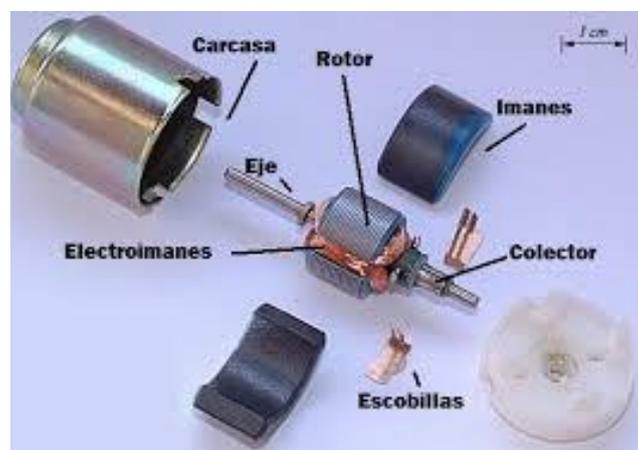


Figura 58: Explosionado de motor con escobillas

- **Motor sin escobillas (BLDC)**

A diferencia del anterior, éste dispone de un sistema de imanes permanentes en el rotor con los polos intercalados para así evitar el problema de las escobillas, mientras que en el estator se encuentran unos postes con bobinas enrolladas, que generan el campo electromagnético. La conmutación, y en consecuencia el control de velocidad y par se realiza mediante un circuito electrónico independiente, evitando así problemas de mantenimiento. Esta es la estructura de los motores BLDC:

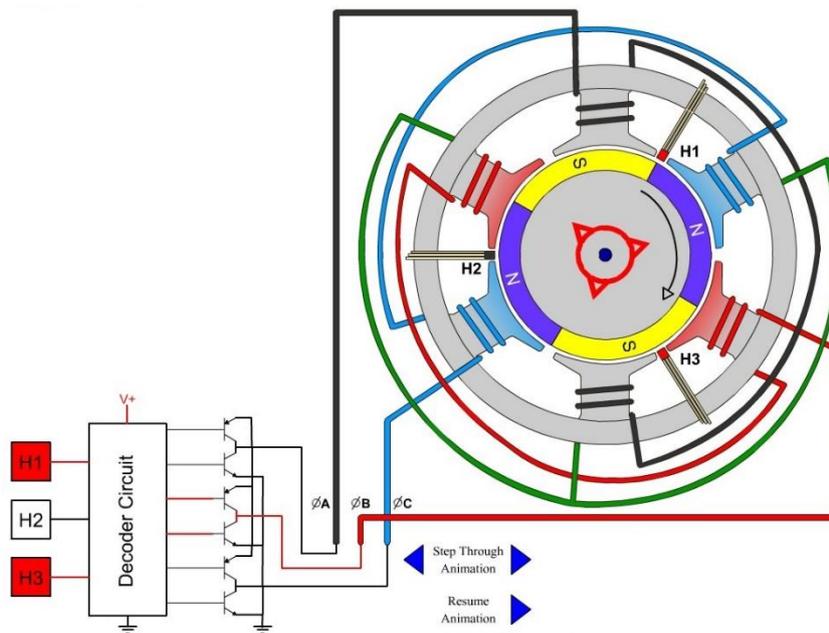


Figura 59: Estructura interna motor BLCD

Este tipo de motores se caracteriza por tener un par de arranque elevado, alta eficiencia, alta densidad de potencia y la eliminación del ruido. Además, algunos de estos motores, por el tamaño que tienen, se pueden incorporar directamente a las ruedas para eliminar los engranajes y demás elementos mecánicos. Esto se suele hacer en las bicicletas y en las motos, pero también se puede implementar en vehículos de altas prestaciones que tengan tracción a las cuatro ruedas.

Aunque tiene muy buenas prestaciones, como ya se ha visto, también tiene inconvenientes como el precio, que son muy caros de fabricar y, en caso de una sobre tensión puede afectar a los imanes permanentes del rotor y el control que se tiene que hacer en la conmutación es complejo. Algunos de estos inconvenientes se pueden ir simplificando a medida que avanza la tecnología por lo que, en un futuro, estos motores cada vez se usaran más en aplicaciones en la industria de la automoción.

### 3.3.2. Motores de corriente alterna

A diferencia de los anteriores estos motores se alimentan por corriente alterna (CA) monofásica o trifásica, aunque la mayoría de los casos en automoción se utilizan los últimos. Entre los más utilizados se encuentran los siguientes [65].

- **Motor asíncrono (motor de inducción)**

El funcionamiento de este tipo de motores es distinto a cualquier otro. Se utiliza una corriente alterna para excitar las bobinas que se encuentran en el estator para generar un campo magnético giratorio. Este campo magnético, a su vez, induce una corriente en el rotor, normalmente de tipo jaula de ardilla que, de nuevo, crea otro campo magnético. Éste trabaja a una frecuencia ligeramente distinta, lo que hace que el motor sea asíncrono. Al girar estos campos magnéticos se produce el movimiento en el eje generando el par. Aquí se puede ver la estructura de un motor asíncrono:

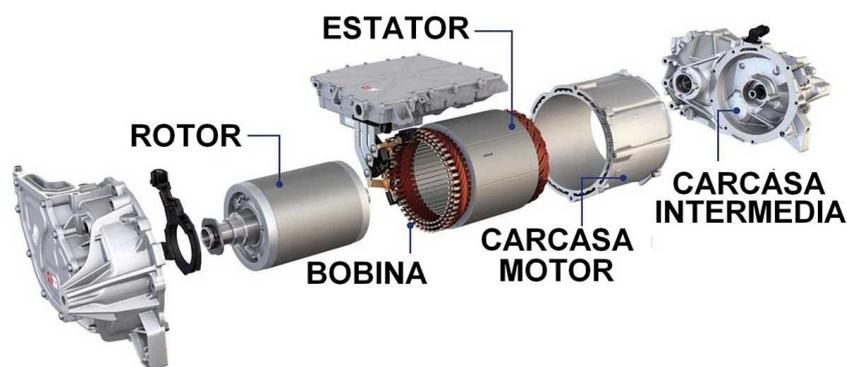


Figura 60: Explosionado motor inducción

Si se conectan estos motores directamente a la fuente de alimentación tienen poco par de arranque, pero esto se puede corregir fácilmente con técnicas de control como el control escalar de tensión y frecuencia (V/F), control vectorial o control directo de par (DTC), con las que se consigue una entrega de par casi constante desde el arranque.

Esto se aprecia en la figura 61. La curva envolvente es la que se consigue con el correcto control de frecuencia para las distintas velocidades de funcionamiento. Las curvas intermedias representan cómo es la relación par/velocidad con las distintas configuraciones. Esto se consigue gracias a que, al no tener imanes permanentes, la densidad de flujo se puede ajustar con los valores de tensión y frecuencia.

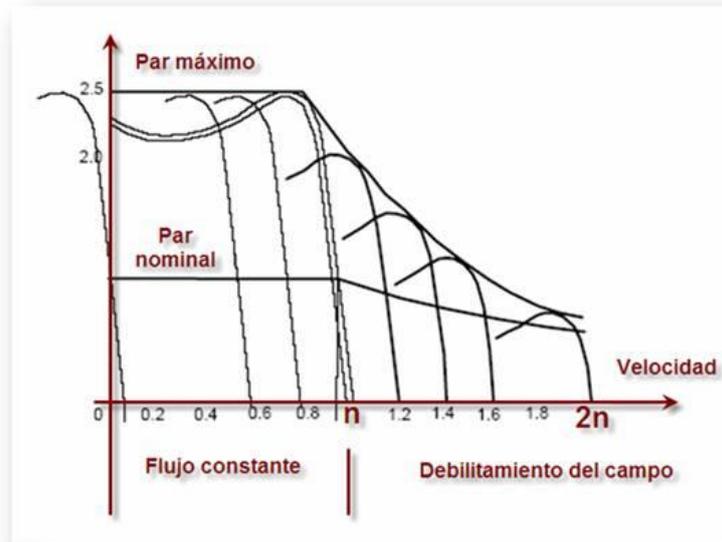


Figura 61: Curva par/velocidad de un motor asíncrono en arranque directo

Estos motores son utilizados por Tesla, que fabrica uno de los mejores coches eléctricos. Esto se debe a sus buenas prestaciones, a que no necesita casi mantenimiento y a que es de los motores más utilizados en la industria, por lo que es barato de conseguir

- **Motores síncronos de imanes permanentes**

En estos motores, al igual que en el caso de los BLDC, se incorporan en el rotor unos imanes permanentes que no necesitan ser energizados. A través de las bobinas del estator se genera un campo magnético el cual sigue el rotor gracias a dichos imanes.

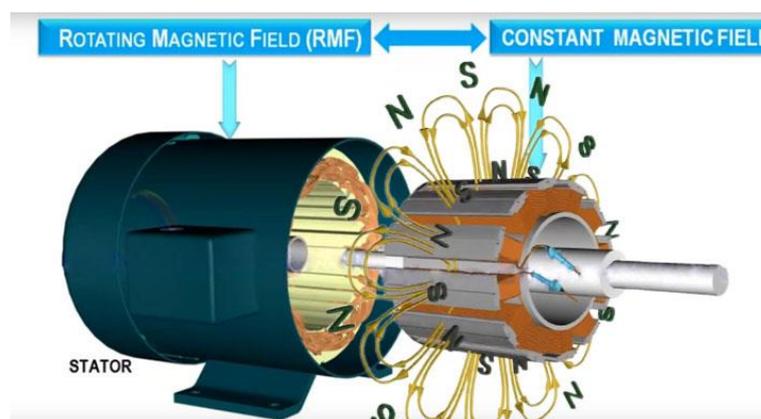


Figura 62: Motor síncrono de imanes permanentes

Las características de estos motores son bastante buenas, teniendo un par elevado a diferentes velocidades, una buena eficiencia y un coste medio entre los motores de inducción y los BLDC. Esto hace que sea una de las mejores opciones para el sector de la automoción

debido también a que su control de la velocidad es sencillo de realizar. Estos motores se están instalando en coches como el Toyota Prius, Chevrolet Bolt EV, Ford Focus Electric, y Nissan Leaf entre otros.

- **Motores de reluctancia conmutados (SRM)**

En estos motores se introduce corriente en el estator conmutándola a través de un sistema externo y, como en todos, se forma un campo magnético giratorio en el estator. En este caso, el rotor está formado por un material magnético con forma de polos salientes para favorecer el magnetismo y así poder girar siguiendo el campo magnético.

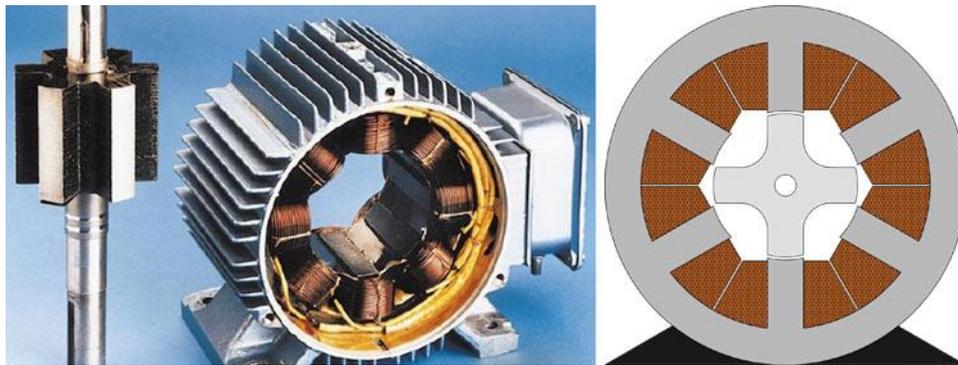


Figura 63: Ejemplo motor SMR

Las características de este motor son: una gran aceleración dado que la inercia del rotor, al no tener imanes permanentes, es menor, una buena densidad de potencia y un sistema muy robusto. Algunos de los inconvenientes que presenta este motor son el complejo sistema de conmutación entre fases dado que se tiene que saber en todo momento la posición del rotor, la complejidad del diseño y el ruido que produce.

Teniendo en cuenta estas características, el grupo Renault tiene a su departamento de motores trabajando para desarrollar motores de este tipo que mejoren las prestaciones frente a sus competidores. En un futuro los motores SRM pueden ser muy competitivos, una vez se hayan introducido en el mercado y mejoren sus características.

### 3.3.3. Comparación entre motores

En el artículo “*Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study*” [66] hablan sobre todos estos motores y se realizan unas comparaciones sobre algunos de los factores más importantes y de los que ya se han comentado en cada caso.

- **Densidad de potencia.**

La densidad de potencia es la relación que existe entre la potencia del motor en kW frente al peso de este medido en kg. Los motores que tiene mayor densidad de potencia son los que tienen en el rotor los imanes permanentes, gracias a la potencia de estos últimos.

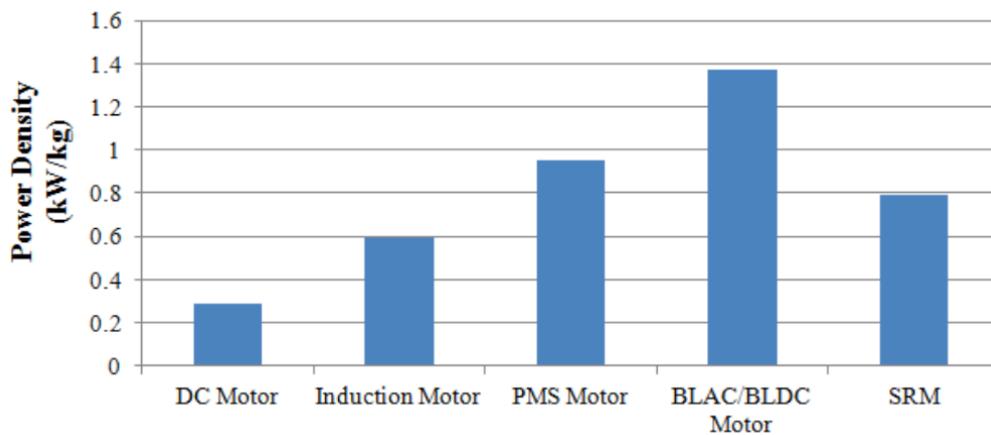


Figura 64: Comparación densidad de potencia

- **Eficiencia energética**

Ya se ha comentado que la eficiencia energética de los motores eléctricos es bastante más elevada que la de los de combustión. El que tiene una mayor eficiencia es el BLDC, que en algunos casos puede llegar a superar el 95% y después se situaría el motor de inducción que está cerca del 90%.

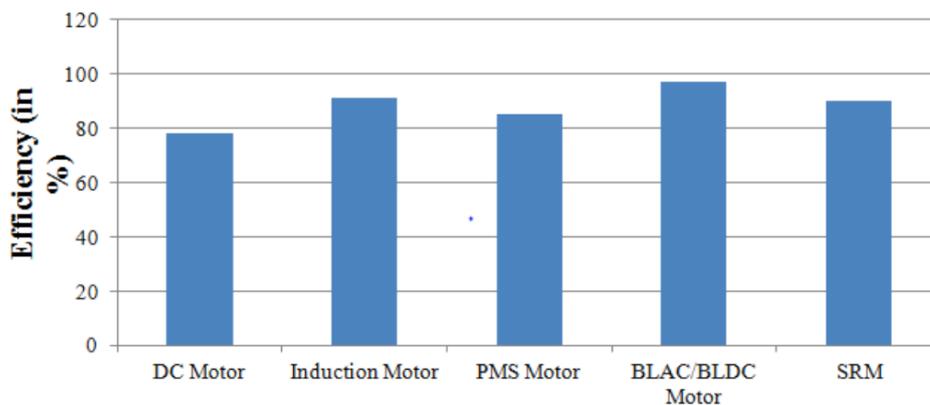


Figura 65: Comparación eficiencia energética

- **Precio**

Otro factor muy importante a la hora de bajar el precio del vehículo es abaratar costes, intentando que los elementos sean los más baratos posibles. En el caso de los motores, los que tienen imanes permanentes son más caros. Por otro lado, el motor DC de escobillas es el más barato, seguido del motor de inducción.

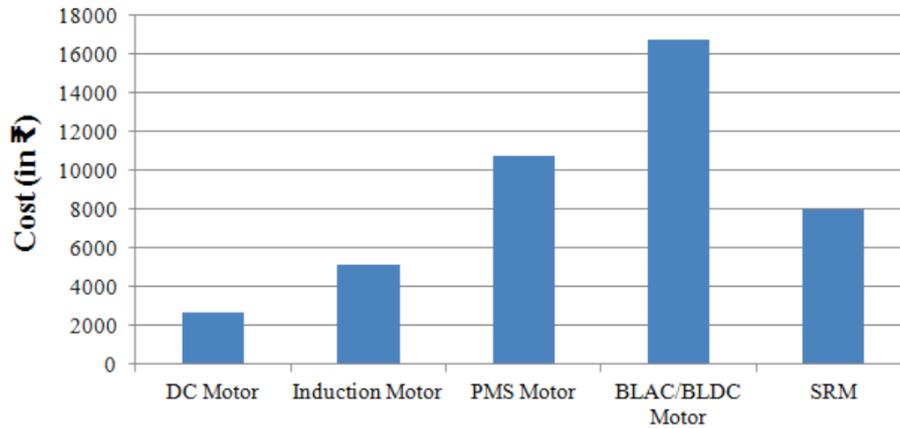


Figura 66: Comparación de costes

Teniendo estos datos en cuenta se puede concluir que los motores de CA son los más equilibrados con lo que respecta a las prestaciones y, además, son más baratos. Por eso son los más utilizados en el sistema de tracción de los coches. Cuando llegue el momento en que los motores BLDC se abaraten puede ser que empiecen a ser utilizados por los fabricantes de coches.

### 3.4. PEC (Power Electronics Controller)

Ahora ya se sabe cómo son los elementos en los que se acumulan la energía, baterías y supercondensadores, y los elementos que transforman la energía en movimiento para que el vehículo pueda circular, los motores. Lo siguiente es identificar los elementos intermedios en los que se transforma la energía.

Como se ha dicho, en algunos vehículos se puede incorporar un sistema híbrido en el cual estén disponibles supercondensadores y/o baterías y estos trabajan a distintas tensiones. Las baterías suelen trabajar a unas tensiones entre 250 V y 360 V. Por otro lado, los supercondensadores tienen un rango de funcionamiento entre 150 V y 400 V, mientras que la tensión a la que suelen trabajar los motores eléctricos es de entre 400 V y 750 V.

Como las tensiones de ambos sistemas de acumulación son distintas, si estas se conectaran directamente al motor estaría limitado por el que antes se quedara sin energía, además que la tensión no sería la adecuada. Por ello se utiliza un bus de alta tensión (HV DC Bus) que sirve para unificar la tensión y en función de los estados de carga de cada sistema de acumulación se decide cuál de ellos se conecta o desconecta. La estructura general sería como se ve en la siguiente imagen [67].

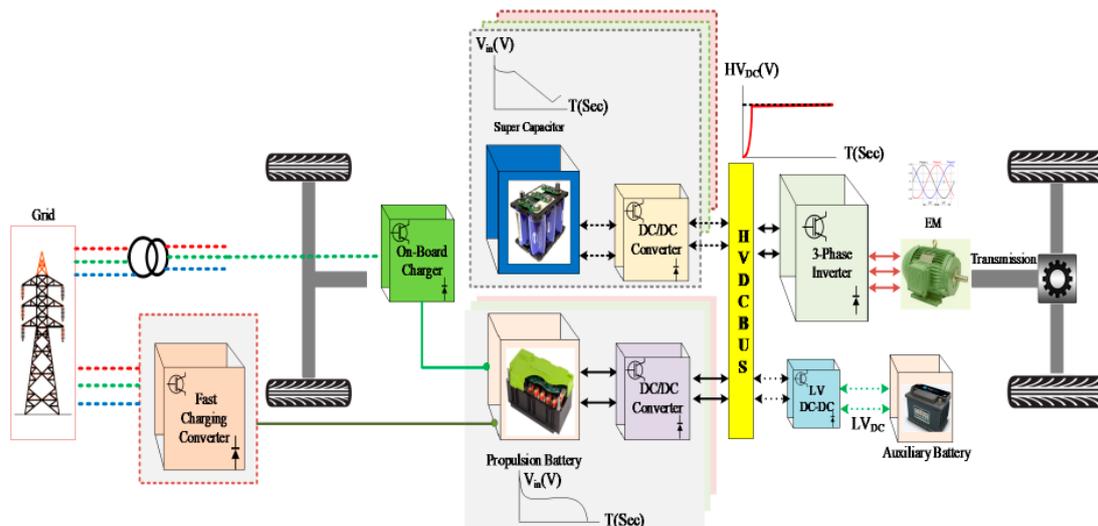


Figura 67: Esquema sistema de potencia del coche eléctrico

Como se puede apreciar, ambos sistemas se conectan al HV DC Bus gracias a unos convertidores de tensión continua que aumentan el nivel de tensión para acomodarlo a las necesidades de la carga. Esto depende de las prestaciones del vehículo, pero estos convertidores suelen disponer de una potencia desde 20 kW hasta 100 kW.

Estos convertidores pueden ser *unidireccionales* o *bidireccionales*. Para las aplicaciones de automoción se suelen usar estos últimos debido a que los motores pueden funcionar como pequeños generadores y cargar las baterías y condensadores durante las frenadas,

aumentando así la autonomía. La eficiencia de estos convertidores suele estar cerca del 92%, siendo limitada por los semiconductores basados en silicio.

Para realizar el control de estos elementos se utilizan transistores de potencia, normalmente IGBT, que se van conmutando a alta frecuencia para controlar la tensión de salida. Estos cambios de estado en los IGBT producen interferencias electromagnéticas (EMI), y a medida que sube la frecuencia de conmutación éstas son mayores. Debido a los sistemas de comunicación y elementos electrónicos que existen actualmente en los coches, estas interferencias se tienen que evitar dentro de lo posible.

Los convertidores se separan en dos grandes grupos: los que están aislados y los que no.

Los que *no están aislados* se suelen usar para los vehículos de media o alta potencia. Dentro de esta categoría se encuentran muchos que pueden, tanto elevar la tensión, como disminuirla. Pero estos últimos no tienen utilidad ya que siempre se va a querer aumentar la tensión.

Por otro lado, los que *son aislados* se caracterizan por tener la entrada y la salida aislada, como el propio nombre indica. Estos convierten la tensión en alterna para utilizar un transformador como aislador y después volver a convertir la tensión en continua con el valor de salida necesario.

Como se puede ver en la figura 68 hay una alta variedad de convertidores, tanto aislados como no, pero los más utilizados para los vehículos eléctricos son el *Boost DC-DC*, *Interleaved Boost DC-DC* y el *Full Bridge Isolates DC-DC* que se detallan a continuación [68].

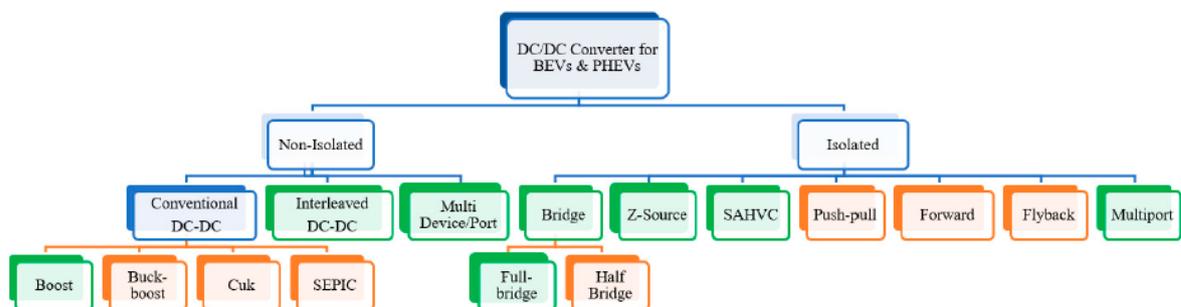


Figura 68: Distintos tipos de convertidores

- **Boost Converter**

El convertidor Boost está pensado para los casos que necesitan un aumento de tensión bajo, en torno al 5%. Este convertidor está compuesto por una bobina en la entrada para eliminar los picos que se introducen en la corriente. También dispone de un condensador que tiene la función de filtrar la tensión de salida para evitar que ésta tenga picos. Además, tiene dos elementos semiconductores que son un transistor de potencia controlado y un diodo. El esquema es el siguiente:

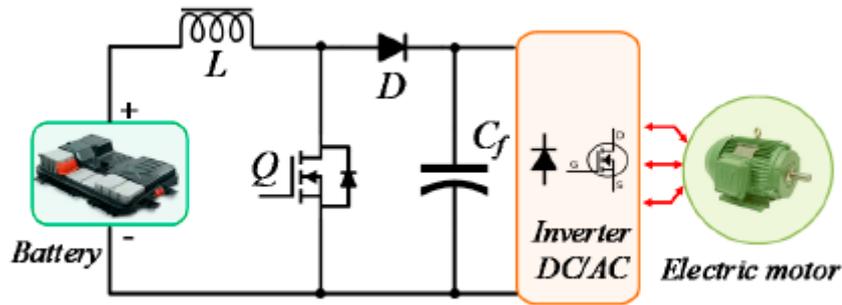


Figura 69: Esquema Boost converter

Para controlar la tensión de salida se utiliza una señal PWM que activa o desactiva el transistor a través del valor del ciclo de trabajo (D). Se obtiene de la siguiente ecuación.

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

Para calcular los valores de la bobina y el condensador se utilizan las siguientes ecuaciones teniendo en cuenta el valor del ciclo de trabajo.

$$L = \frac{(1 - D) \times V_{out}}{f_{sw} \times \Delta I_{lmax}} , \quad C = \frac{D \times I_{out}}{f_{sw} \times \Delta V_{out}}$$

- **Interleaved 4-Phase Boost Converter**

La estructura de este convertidor es muy similar a la del anterior pero multiplicada por N veces, en este caso 4. Esto permite que los elementos como la bobina y condensador sean menores que en el caso anterior. Con estas modificaciones se puede conseguir aumentos de tensión 4 veces superior en la salida que en la entrada. Por este motivo estos convertidores son utilizados en los casos en que se necesite un elevado aumento de tensión.

Además, con esta configuración, se consigue disminuir las ondulaciones en la corriente de entrada y la tensión de salida, factor que mejora la salud de las baterías y estabiliza la tensión del HV DC Bus. Las bobinas tienen un valor igual en todas ellas y están separadas por un núcleo magnético para impedir interferencias entre ellas.

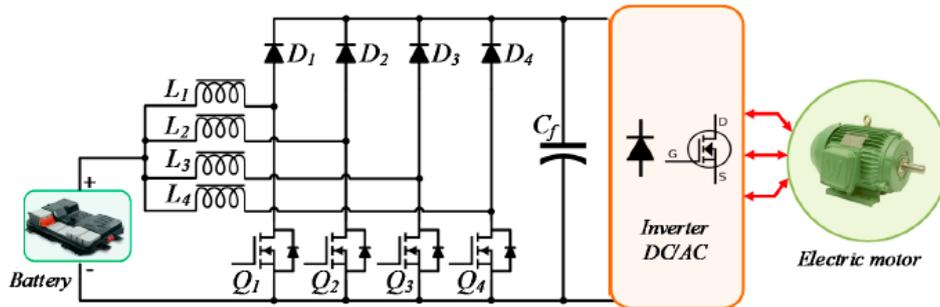


Figura 70: Esquema Interleaved 4-Phase Boost Converter

Este convertidor tiene una eficiencia cercana al 92%, y el cálculo del ciclo de trabajo se hace de la misma manera que en el caso anterior, pero sí que se modifican las ecuaciones para calcular los valores de la bobina y del condensador.

$$L = \frac{V_{out}}{4x f_{sw} x N x \Delta I_{lmax}} \quad , \quad C = \frac{\Delta I_{lmax}}{4x f_{sw} x N x \Delta V_{out}}$$

- **Full Bridge Boost Converter**

Este convertidor está formado por tres etapas. La primera que es un inversor que hace la conversión de DC a AC. La siguiente es el transformador de alta frecuencia que tiene la función de aislar la entrada y la salida y, además, la de elevar la tensión al valor deseado. Después se encuentra un rectificador que vuelve a convertir la tensión de AC a DC.

Con el ajuste del valor del ciclo de trabajo se puede controlar el valor de la tensión para que sea constante. Lo único que, en este caso, se tiene que mantener el ciclo de trabajo por encima de 50% para proteger los semiconductores. La eficacia de este tipo de convertidores es de aproximadamente el 91%, un poco menor que el anterior debido a que también incluye pérdidas en el transformador.

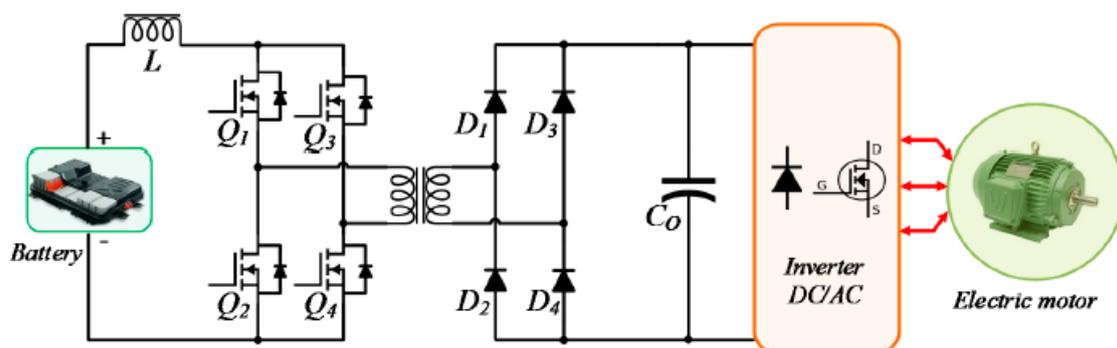


Figura 71: Esquema Full Bridge Boost Converter

En este caso los cálculos se hacen de manera diferente a las anteriores ya que hay que tener en cuenta el transformador. Las ecuaciones son las siguientes:

$$D = \frac{V_{out}}{2n \times V_{in}}$$

$$L = \frac{n \times D \times V_{out}}{2 \times f_{sw} \times \Delta I_{lmax}} \quad , \quad C = \frac{\Delta I_{lmax}}{8 \times f_{sw} \times \Delta V_{out}}$$

Una vez que se tiene la tensión de DC adecuada en el bus el siguiente paso es entregarla al motor. Como ya se ha dicho en la sección anterior la mayoría de los elegidos trabajan con corriente alterna, por lo que es necesario usar un inversor para que estos funcionen. Al igual que los convertidores estos tienen que ser bidireccionales para que la energía de regeneración de la frenada se pueda aprovechar y recargar las baterías.

Cuando los motores seleccionados son los de alterna normalmente se alimentan mediante trifásica, por lo que el inversor debe tener 6 transistores IGBT, 2 por cada una de las fases, para poder hacer la conversión correctamente [69]. En la siguiente imagen se puede ver como el esquema general de todo el sistema PEC con el inversor controlando un motor de inducción:

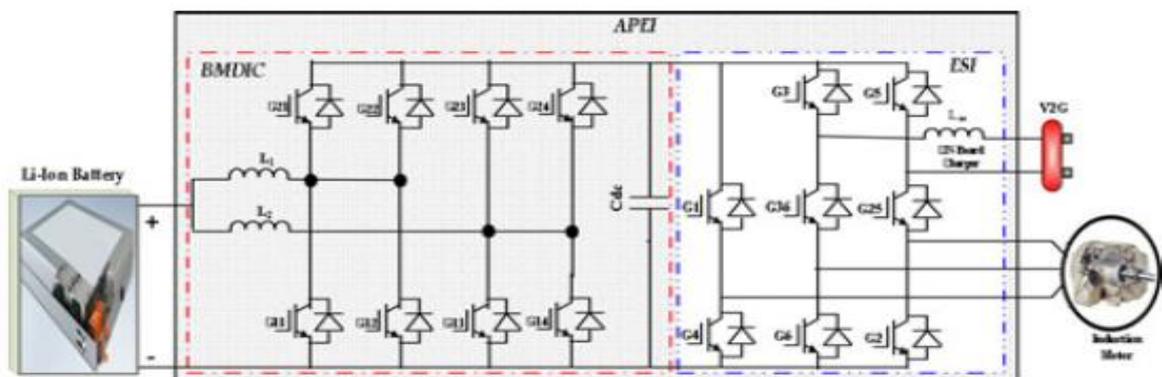


Figura 72; Esquema del sistema PEC

Además, el inversor tiene la función de controlar cuánta energía se le entrega al motor dependiendo de las condiciones de trabajo. La principal de ellas es la posición del pedal del acelerador o la demanda de velocidad de cruce. En el artículo *“An advanced Power Electronics Interface for Electric vehicles Applications”* [70] se plantea un sistema de control para estos casos.

Utilizando modelos matemáticos de los sistemas de control y los convertidores se realizaron simulaciones para comprobar su funcionamiento y cómo eran las señales.

En las siguientes graficas se puede ver la evolución de la velocidad del motor. En la segunda gráfica se observa cómo cambia el par aplicado cuando se solicita un cambio de velocidad. En

la siguiente se aprecia la corriente trifásica que circula por el estator y en la última la tensión de una de las fases.

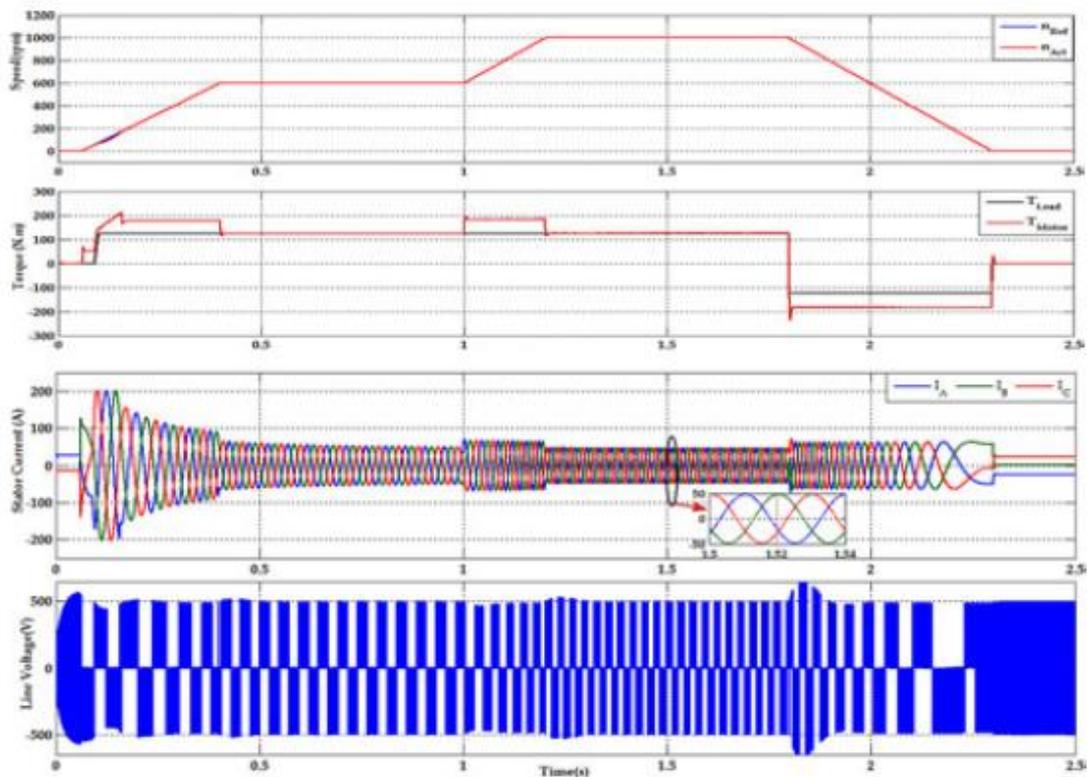


Figura 73: Gráficas del sistema PEC

Se puede observar que cuando hay cambios de par la corriente aumenta o disminuye en función de la demanda. Cuando se necesita más par la corriente sube y, en caso de que este sea estable, la corriente media también es constante. Otro factor importante es que cuando se procede a disminuir la velocidad se genera un par negativo, lo que activa la regeneración de energía. Se puede apreciar un poco en la gráfica de la corriente cómo se produce ese cambio de sentido.

## 4. Conclusiones

Dadas las restricciones y limitaciones que se están implementando en el sector de la automoción para mejorar el medio ambiente, es obvio que se necesita el desarrollo de tecnologías alternativas para el transporte. La que más interés ha generado en las marcas de coches, para su uso en el futuro, es el uso de baterías y/o supercondensadores como sistema de almacenamiento de energía, aunque hay otras posibilidades como es la pila de hidrógeno.

El coche eléctrico no es algo que se haya inventado en la última década, sino que llevan entre nosotros mucho más tiempo, aunque en la actualidad es cuando se le está dando más importancia y generando nuevas tecnologías que impulse su desarrollo. En este trabajo se habla del estado de estas tecnologías en estos momentos. El sector avanza a pasos agigantados y siempre hay actualizaciones sobre nuevos elementos, desarrollos y materiales que pueden revolucionar la industria.

En la actualidad existen algunos inconvenientes para los coches eléctricos, como son:

- La diferencia de precio entre un coche térmico y uno eléctrico, que estos últimos por ahora son más caros debido al precio de los componentes, principalmente la batería.
- La falta de una infraestructura sólida respecto a las estaciones de carga, dado que están todavía en desarrollo. Por otro lado, también los tiempos de carga son elevados si los comparamos con los combustibles fósiles.
- La autonomía de estos vehículos es un poco escasa en los vehículos que se comercializan actualmente, por lo que no se pueden utilizar para largos trayectos

A lo largo de este trabajo se han ido contando todas las mejoras que están previstas para que estos inconvenientes desaparezcan. Los fabricantes de coches están desarrollando plataformas modulares y escalables para así poder reducir costes y que tengan un precio más competitivo o incluso inferior a los de combustión interna. Se está intentando elevar la tensión de carga de las baterías para que en 15 minutos puedas tener la mayoría de la capacidad de la batería cargada.

El problema de la autonomía también se está solucionando al mejorar la capacidad de las baterías cambiando los materiales que utilizan, implementando sistemas híbridos con supercondensadores que evitan los grandes esfuerzos de aceleraciones bruscas, optimizando el sistema de los BMS para el balanceo de las celdas y la reducción de peso con los WBMS.

En mi opinión, los vehículos eléctricos actualmente son muy recomendados para personas que quieran utilizarlos para sus trayectos diarios, como por ejemplo ir al trabajo, teniendo un sistema de carga en la vivienda o en el espacio de oficinas. A medida que las mejoras vayan entrando en escena, los vehículos eléctricos serán una muy buena opción para la movilidad personal dando paso a un sistema de transporte más limpio, eficiente y sostenible, tanto para trayectos largos como cortos.

## Bibliografía

1. admin P. La evolución del automóvil [Internet]. Baysan. 2019 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://baysanquality.com/blog/la-evolucion-del-automovil/>
2. evolución tecnológica, el automóvil timeline. [Internet]. Timetoast timelines. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.timetoast.com/timelines/evolucion-tecnologica-el-automovil>
3. 7 Gráficas para entender la evolución del coche eléctrico | OVACEN [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://ovacen.com/evolucion-coche-electrico/>
4. ¿Quién inventó el híbrido? [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.autofacil.es/coches-electricos-e-hibridos/invento-coche-hibrido/83779.html>
5. Ibáñez. Los 10 coches más rápidos del mundo... Híbridos y eléctricos [Internet]. Motorpasión. 2013 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/los-10-coches-mas-rapidos-del-mundo-hibridos-y-electricos>
6. Coches eléctricos: pros y contras [Internet]. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.webconsultas.com/belleza-y-bienestar/medioambiente/coches-electricos-pros-y-contras>
7. Pérez E. Euro 7 señala el fin de los motores de combustión: un estricto límite que ha llevado a Audi a abandonar sus desarrollos en diésel y gasolina [Internet]. Xataka. 2021 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.xataka.com/vehiculos/euro-7-senala-fin-motores-combustion-estricta-norma-que-ha-llevado-a-audi-volvo-a-abandonar-sus-desarrollos-diesel-gasolina>
8. Murias D. Cómo la norma Euro 7 prevista para 2025 podría acabar con una gran parte de los motores de gasolina y diésel [Internet]. Motorpasión. 2021 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/industria/como-norma-euro-7-prevista-para-2025-podria-acabar-gran-parte-motores-gasolina-diesel>
9. Eléctricos H y. Coches eléctricos con plataformas 100% eléctricas o plataformas flexibles ¿Quién se equivoca? [Internet]. Híbridos y Eléctricos. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/suerte-echada-plataforma-electrica-plataformas-multitecnologia-quien-equivoca/20190917194216030230.html>
10. BMW plans dedicated platform for battery-electric cars [Internet]. eeNews Automotive. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/bmw-plans-dedicated-platform-battery-electric-cars>
11. Los coches híbridos enchufables triplican sus ventas en 2020 y los eléctricos suben casi un 80 % [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/industria/ventas-coches-electricos-coches-alternativos-espana-2020>

12. Improving electric vehicle economics | McKinsey [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/making-electric-vehicles-profitable>
13. La plataforma MEB de Volkswagen para coches eléctricos, ¿qué es y de qué es capaz? | forococheselectricos [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://forococheselectricos.com/2020/02/la-plataforma-meb-de-volkswagen-para-coches-electricos-que-es-y-de-que-es-capaz.html>
14. Eléctricos H y. Las cuatro plataformas eléctricas de Audi para fabricar 800.000 vehículos eléctricos al año [Internet]. Híbridos y Eléctricos. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/plataformas-electricas-audi/20200402124956034245.html>
15. Romero J. e-TNGA: Toyota presentó su plataforma para vehículos eléctricos y el primer teaser de su futuro SUV [Internet]. 16 Valvulas. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.16valvulas.com.ar/e-tnga-toyota-presento-su-plataforma-para-vehiculos-electricos-y-el-primer-teaser-de-su-futuro-suv/>
16. e-TNGA, la plataforma de los eléctricos de Toyota [Internet]. EVE. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eve2030.es/news-and-updates/e-tnga-la-plataforma-de-los-electricos-de-toyota/2020/>
17. Los detalles de la plataforma CMF-EV que llevarán los futuros eléctricos de Renault [Internet]. Todas las noticias de coches en un solo portal: Pruebas, fotos, vídeos, informes... 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://noticias.coches.com/noticias-motor/plataforma-cmf-ev-renault/404675>
18. Renault da nuevos detalles de la plataforma modular CMF-EV, especialmente diseñada para coches eléctricos | forococheselectricos [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://forococheselectricos.com/2020/12/renault-da-nuevos-detalles-de-la-plataforma-modular-cmf-ev-especialmente-disenada-para-coches-electricos.html>
19. Renault avanza la tecnología de la plataforma CMF-EV para sus futuros coches eléctricos [Internet]. Motor.es. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.motor.es/noticias/renault-plataforma-cmf-ev-futuros-electricos-202071900.html>
20. Iris. Así son las nuevas baterías y la plataforma de GM para vehículos eléctricos [Internet]. Somos Electricos - Web sobre movilidad y coches eléctricos. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://somoselectricos.com/nuevas-baterias-plataforma-gm-vehiculos-electricos/>
21. Motores y transmisiones Ultium Drive: General Motors completa su plataforma eléctrica modular - Actualidad - Híbridos y Eléctricos | Coches eléctricos, híbridos enchufables [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/motores-transmisiones-ultium-drive-general-motors-plataforma-electrica-modular/20200916184727038144.html>
22. Hyundai nos detalla las características de su nueva plataforma global eléctrica E-GMP [Internet]. Todas las noticias de coches en un solo portal: Pruebas, fotos, vídeos, informes... 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en:

<https://noticias.coches.com/noticias-motor/hyundai-e-gmp-plataforma-coches-electricos/410018>

23. Eléctricos H y. E-GMP: el corazón de los próximos coches eléctricos Hyundai, con sistema de 800 V incluido [Internet]. Híbridos y Eléctricos. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/plataforma-egmp-coches-electricos-hyundai-datos/20201202095809040509.html>
24. Eléctricos H y. La nueva plataforma eVMP de PSA promete coches eléctricos con 650 km de autonomía [Internet]. Híbridos y Eléctricos. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/plataforma-evmp-coches-electricos-grupo-psa/20200729132754036951.html>
25. PSA presenta la eVMP, una plataforma para eléctricos con 650 kilómetros de autonomía | Neomotor: coches, motos y todo motor [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://neomotor.sport.es/industria/psa-presenta-la-evmp-una-plataforma-para-electricos-con-650-kilometros-de-autonomia.html>
26. REE hits the track with 3 modular EV platforms [Internet]. Automotive World. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.automotiveworld.com/news-releases/ree-hits-the-track-with-3-modular-ev-platforms/>
27. Autonomous & Electric Car Technology • REE.Auto Corner Module [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://ree.auto/technology/>
28. Alternative Fuels Data Center: How Do All-Electric Cars Work? [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
29. De la pila de Volta al Powerwall de Elon Musk: breve historia de las baterías [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: [https://www.eldiario.es/hojaderouter/ciencia/bateria-pila-historia-tesla-powerwall\\_1\\_2671125.html](https://www.eldiario.es/hojaderouter/ciencia/bateria-pila-historia-tesla-powerwall_1_2671125.html)
30. Rathi A. How we get to the next big battery breakthrough [Internet]. Quartz. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://qz.com/1588236/how-we-get-to-the-next-big-battery-breakthrough/>
31. Tesla announces 'tabless' battery cells that will improve range of its electric cars - The Verge [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.theverge.com/2020/9/22/21449238/tesla-electric-car-battery-tabless-cells-day-elon-musk>
32. First look at Tesla's new structural battery pack - Electrek [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://electrek.co/2021/01/19/tesla-structural-battery-pack-first-picture/>
33. The future of electric-car batteries, according to Mercedes [Internet]. DrivingElectric. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.drivingelectric.com/mercedes-benz/1662/future-electric-car-batteries-according-mercedes>

34. Slovic M. Solid-State EV Battery Exhibits 500-Mile Range [Internet]. Electronic Design. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21127102/solidstate-ev-battery-exhibits-500mile-range>
35. Baterías de estado sólido: qué son y por qué son el futuro del automóvil [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/industria/baterias-estado-solido-que-que-futuro-automovil-ri>
36. Solid state battery prototype cell extends EV range to 800km [Internet]. eeNews Automotive. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/solid-state-battery-prototype-cell-extends-ev-range-800km>
37. BMW y Ford apuestan por las baterías de estado sólido de Solid Power para sus coches eléctricos: cómo funcionan y qué las hace tan atractivas [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.xataka.com/automovil/bmw-ford-apuestan-baterias-estado-solido-solid-power-para-sus-coches-electricos-como-funcionan-que-hace-atractivas>
38. Eléctricos H y. Un hallazgo fundamental para las baterías de litio-azufre las acerca a su comercialización [Internet]. Híbridos y Eléctricos. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/hallazgo-fundamental-baterias-litio-azufre-acerca-comercializacion/20210225114729042854.html>
39. Lobo ECP. ESTUDIO DE LOS SUPERCONDENSADORES Y SU VIABILIDAD COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS. :166.
40. Eléctricos H y. Lo mejor de los dos mundos: se carga como un supercondensador y tiene la capacidad de una batería [Internet]. Híbridos y Eléctricos. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/supercondensador-hibrido-recarga-rapida-capacidad-bateria/20210204143140042246.html>
41. Patnaik C, Lokhande MM, Pawar SB. Hybrid Energy Storage System using supercapacitor for Electric Vehicles. En: 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT) [Internet]. Vellore, India: IEEE; 2019 [citado 2 de septiembre de 2021]. p. 1-5. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8960252/>
42. Lokhande JS, Daigavhane PM, Sarkar M. A Critical Approach Towards a Smarter Battery Management System for Electric Vehicle. En: 2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)(48184) [Internet]. Tirunelveli, India: IEEE; 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. p. 232-5. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9142869/>
43. Vardwaj V, Vishakha V, Jadoun VK, Jayalaksmi NS, Agarwal A. Various Methods Used for Battery Balancing in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. En: 2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC) [Internet]. Mathura, Uttar Pradesh, India: IEEE; 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. p. 208-13. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9087018/>

44. Gong Z, van de Ven BAC, Lu Y, Luo Y, Gupta K, da Silva C, et al. EV BMS with Time-Shared Isolated Converters for Active Balancing and Auxiliary Bus Regulation. En: 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia) [Internet]. Niigata: IEEE; 2018 [citado 2 de septiembre de 2021]. p. 267-74. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8507737/>
45. Shah S, Murali M, Gandhi P. Platform Software Development for Battery Management System in Electric Vehicle. En: 2019 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET) [Internet]. Bhubaneswar, India: IEEE; 2019 [citado 2 de septiembre de 2021]. p. 262-7. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8744886/>
46. Amanathulla KM, Pillai AS. An Extensive Comparison of State of Charge Estimation of Lithium Ion Battery — Towards Predictive Intelligent Battery Management System for Electric Vehicles. En: 2020 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR) [Internet]. Malappuram, India: IEEE; 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. p. 1-5. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9249992/>
47. Sensing and balancing chip targets battery management system designs [Internet]. eeNews Automotive. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/sensing-and-balancing-chip-targets-battery-management-system-designs-0>
48. Battery management chip increases range, reliability of electric cars [Internet]. eeNews Automotive. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/battery-management-chip-increases-range-reliability-electric-cars>
49. EV battery monitor meets ASIL-D requirements [Internet]. eeNews Automotive. 2019 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/ev-battery-monitor-meets-asil-d-requirements>
50. Robust NTC thermistor for e-mobility [Internet]. eeNews Automotive. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/robust-ntc-thermistor-e-mobility>
51. Camara M. Sensores de corriente MLX91219 de 200 a 2000 A para automoción - [Internet]. diarioelectronicohoy.com. 2021 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.diarioelectronicohoy.com/sensores-de-corriente-mlx91219-de-200-a-2000-a-para-automocion/>
52. Team DE. How to Measure Circuit Current with a Shunt Resistor [Internet]. Device Plus. 2021 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.deviceplus.com/others/how-to-measure-circuit-current-with-a-shunt-resistor/>
53. Measuring battery status with ultrasound: cheaper, more reliable than BMS [Internet]. eeNews Automotive. 2017 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/measuring-battery-status-ultrasound-cheaper-more-reliable-bms>

54. Sensor detects water in Electric Vehicle (EV) battery packs [Internet]. eeNews Automotive. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/sensor-detects-water-electric-vehicle-ev-battery-packs>
55. BMS connects vehicle battery to the online universe [Internet]. eeNews Automotive. 2018 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/bms-connects-vehicle-battery-online-universe>
56. Karmawijaya MI, Nashirul Haq I, Leksono E, Widyotriatmo A. Development of Big Data Analytics Platform for Electric Vehicle Battery Management System. En: 2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT) [Internet]. Bali, Indonesia: IEEE; 2019 [citado 2 de septiembre de 2021]. p. 151-5. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8994013/>
57. Slovick M. Wireless BMS for EVs Reduce Weight, Simplify Design, Maximize Performance. Electron Des. :11.
58. Frenzel L. Bluetooth Enhances EV and Hybrid Battery-Management Systems [Internet]. Electronic Design. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21133774/bluetooth-enhances-ev-and-hybrid-batterymanagement-systems>
59. Instruments T. TI revolutionizes EV battery management with the industry's best performing wireless BMS solution, the first concept assessed for enabling ASIL D systems [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.prnewswire.com/news-releases/ti-revolutionizes-ev-battery-management-with-the-industrys-best-performing-wireless-bms-solution-the-first-concept-assessed-for-enabling-asil-d-systems-301202987.html>
60. GM relies on ADI's wireless battery management system [Internet]. eeNews Automotive. 2020 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.eenewsautomotive.com/news/gm-relies-adis-wireless-battery-management-system>
61. Motor eléctrico versus motor de combustión: par, potencia y eficiencia | forococheselectricos [Internet]. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://forococheselectricos.com/2011/11/motor-electrico-versus-motor-de.html>
62. El motor de un coche eléctrico: tipos y funcionamiento [Internet]. SoyMotor.com. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://soymotor.com/coches/articulos/el-motor-de-un-coche-electrico-984469>
63. La nueva transmisión de dos marchas que mejora a los coches eléctricos [Internet]. ADSLZone. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.adslzone.net/e-movilidad/noticias-tecnologia/coches-electricos-dos-marchas-inmotive/>
64. Electronics E, Electronics P, Electronics A, Things I of, Electronics A, Vehicles E, et al. Types of Motors used in Electric Vehicles [Internet]. Circuit Digest. 2019 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-motors-used-in-electric-vehicles-ev>

65. PRIMECOMTECH. What Types Of Motors Are Used In Electric Vehicles? [Internet]. PRIMECOMTECH. [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.primecom.tech/blogs/news/what-types-of-motors-are-used-in-electric-vehicles>
66. Bhatt P, Mehar H, Sahajwani M. Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study. SSRN Electron J [Internet]. 2019 [citado 2 de septiembre de 2021]; Disponible en: <https://www.ssrn.com/abstract=3364887>
67. Chakraborty S, Vu H-N, Hasan MM, Tran D-D, Baghdadi ME, Hegazy O. DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicles, Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Fast Charging Stations: State of the Art and Future Trends. 2019;43.
68. Al M, Van J, Gualous H. DC/DC Converters for Electric Vehicles. En: Soylu S, editor. Electric Vehicles - Modelling and Simulations [Internet]. InTech; 2011 [citado 2 de septiembre de 2021]. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations/dc-dc-converters-for-electric-vehicles>
69. Makrygiorgou JJ, Alexandridis AT. Power Electronic Control Design for Stable EV Motor and Battery Operation during a Route. Energies. 24 de mayo de 2019;12(10):1990.
70. Hegazy O, Barrero R, Van Mierlo J, Lataire P, Omar N, Coosemans T. An Advanced Power Electronics Interface for Electric Vehicles Applications. IEEE Trans Power Electron. diciembre de 2013;28(12):5508-21.