



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

Simulación de vehículos eléctricos

Autor:

Fernández Lanchares, Christian

Tutor:

**Alonso Ripoll, Francisco Javier
Departamento de Ingeniería
Eléctrica**

Valladolid, Julio de 2018.

Resumen:

El vehículo eléctrico está cada vez más en auge, gracias a la sensibilización acerca del cambio climático y las prestaciones que ofrecen actualmente, las cuales se han visto aumentadas, sobre todo la autonomía. Este aumento ha sido debido al uso de baterías de iones de litio. Para poder evaluar dichas prestaciones, es necesario disponer de unos modelos de este tipo de baterías que permitan realizar simulaciones realistas.

A lo largo de este trabajo se hace un repaso de las prestaciones de los vehículos eléctricos, se lleva a cabo la modelación de la batería de iones de litio, y se realiza una simulación basada en este modelo que se aplica a distintos ciclos de conducción.

Dicha estrategia se utiliza para analizar el comportamiento del Tesla Model S, ante los ciclos NEDC, 10-15 y el ciclo americano en fase extraurbana. De esta manera se observan como varían las prestaciones en función de diversos factores.

Palabras claves:

1. Vehículo eléctrico.
2. Baterías.
3. Ciclos de conducción.
4. Modelos.
5. Autonomía.

Agradecimientos:

En este pequeño apartado quería agradecer a todos los que han estado allí durante estos largos años en la carrera y durante la realización de este trabajo. En especial el incondicional apoyo de mis padres, hermano, abuelos, el resto de mi familia y amigos.

También quiero agradecer a mi tutor Francisco Javier Alonso Ripoll por la confianza y la dedicación depositada en mí para la realización de este trabajo, y los consejos que me han aportado luz a mi futuro.

¡Gracias a todos, va por vosotros!

Índice:

Resumen:.....	3
Palabras claves:	3
Agradecimientos:.....	5
Índice:.....	7
Lista de figuras:	10
Lista de tablas:	13
1 Introducción, objetivos y estructura:	15
1.1 Introducción:.....	15
1.2 Objetivos:.....	16
1.3 Estructura:.....	17
2 Simulación del vehículo eléctrico:	19
2.1 Sistema eléctrico del vehículo:	19
2.1.1 Motores eléctricos:	19
2.1.1.1 Motores asíncronos o de inducción:.....	19
2.1.1.2 Motores síncronos de imanes permanentes:	23
2.1.1.3 Motores de corriente continua:.....	25
2.1.1.4 Motores de flujo axial de imanes permanentes:	25
2.1.1.5 Motores de reluctancia conmutada:	27
2.1.2 Bloque electrónico:.....	27
2.1.2.1 Cargador:.....	28
2.1.2.2 Inversor:	28
2.1.2.3 Rectificador:	31
2.1.2.4 Convertidor:	32
2.1.3 Sistemas auxiliares:.....	32
2.1.4 Controlador del vehículo:.....	33
2.1.5 Frenado regenerativo:	34
2.1.5.1 Frenado paralelo:.....	35
2.1.5.2 Frenado serie:	36
2.2 Sistema mecánico del vehículo:.....	37

2.2.1	Sistema de Frenado mecánico:.....	37
2.2.2	Sistema de Transmisión:	38
2.2.3	Mantenimiento:	40
2.3	Prestaciones del vehículo eléctrico:.....	40
3	Ciclos de conducción:	45
3.1	Ciclo NEDC:.....	45
3.2	Ciclo Japonés:.....	46
3.3	Ciclo WLTP:.....	47
3.4	Ciclo Americano:	48
4	Baterías de tracción:	51
4.1	Introducción:.....	51
4.2	Tipo de baterías:	52
4.2.1	Baterías de Plomo-Acido:.....	52
4.2.2	Baterías de Níquel-Cadmio:	53
4.2.3	Baterías de Níquel-Metal hidruro:	53
4.2.4	Baterías de Litio:	54
4.2.4.1	Baterías LCO (LiCoO ₂):.....	54
4.2.4.2	Baterías LMO (LiMn ₂ O ₄):	55
4.2.4.3	Baterías LFP (LiFePO ₄):	56
4.2.4.4	Baterías LPO (Litio-Polímero):.....	57
4.2.5	Futuro de las baterías:	57
4.2.5.1	Baterías de Litio-Azufre:.....	57
4.2.5.2	Baterías de Litio-Metal:.....	58
4.2.5.3	Baterías de estado sólido:.....	58
4.2.6	Conclusiones:	59
4.3	Cuidado y envejecimiento de las baterías:	60
4.3.1	Cuidado de baterías:	60
4.3.2	Envejecimiento de baterías:	60
4.4	Sustitución de baterías:	62
4.5	Sistemas de refrigeración de baterías:	63
5	Modelo de baterías de Ion-Litio:	65
5.1	Definición y tipos de modelos:.....	65

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

5.2	Modelos electroquímicos:	66
5.3	Modelos de circuito equivalente:	68
5.3.1	Modelo con una resistencia interna:	69
5.3.2	Modelo con un grupo RC en paralelo:	70
5.3.3	Modelo equivalente de Thevenin:	70
5.3.4	Modelo PNGV:.....	71
5.3.5	Modelo de polarización total:.....	72
5.4	Modelos propuestos por otros autores:.....	73
5.4.1	Modelo propuesto por Chem:	73
5.4.2	Modelo propuesto por Tremblay:.....	74
5.4.3	Modelo propuesto por Dubarry:.....	76
5.5	Criterios para la elección de modelo:	78
6	Resultados obtenidos:.....	79
6.1	Programación del modelo de Chem en Matlab:.....	79
6.1.1	Asociación de los elementos serie y paralelo:	80
6.1.2	Introducción de las componentes del modelo:	81
6.1.3	De monocelda a multicelda:	82
6.1.4	Verificación del modelo:	83
6.2	Aplicación del modelo a nuestro vehículo objeto de estudio:.....	83
6.2.1	Cálculo del Consumo del Tesla Model S:	84
6.2.2	Adaptación del modelo:.....	86
6.3	Resultados:.....	87
6.3.1	Autonomía:	87
6.3.2	Influencia del frenado regenerativo:	93
6.3.3	Influencia de la pérdida de capacidad:	94
6.3.4	Influencia de la temperatura y tamaño de rueda:.....	95
7	Conclusiones y trabajos futuros:.....	97
7.1	Conclusiones:	97
7.2	Trabajo futuros:	98
	Bibliografía.....	99
	Anexos:.....	103

Lista de figuras:

Figura 1.1 Distintivos ambientales disponibles. (Zaragoza, 2017).....	15
Figura 2.1 Rotor en jaula de ardilla. (Fraile Mora, 2015).....	19
Figura 2.2 Rotor devanado o con anillos. (Fraile Mora, 2015).....	20
Figura 2.3 Circuito equivalente de un motor asíncrono. (Fraile Mora, 2015)	21
Figura 2.4 Característica del par de un motor de inducción. (Alonso Ripoll, 2017)	21
Figura 2.5 Característica del rendimiento de un motor de inducción. (Alonso Ripoll, 2017)	22
Figura 2.6 Zonas de funcionamiento de un motor de inducción. (Alonso Ripoll, 2017) ..	22
Figura 2.7 Motor eléctrico de imanes permanentes. (Dani meganeboy, 2017).....	24
Figura 2.8 Sección del motor eléctrico del Renault ZOE. (Dani meganeboy, 2017)	24
Figura 2.9 Estructura de un motor de corriente continua. (Dani meganeboy, 2017)	25
Figura 2.10 Motor integrado en la rueda. (Alonso Ripoll, 2017)	26
Figura 2.11 Motor de reluctancia conmutada. (Alonso Ripoll, 2017).....	27
Figura 2.12 Modos de carga. (Dani meganeboy, 2017)	28
Figura 2.13 Variación de la característica del par al variar la tensión y la frecuencia. (Alonso Ripoll, 2017)	29
Figura 2.14 Inversor con IGBTs alimentando un motor. (Alonso Ripoll, 2017)	30
Figura 2.15 Señales de disparo (Izq.) y señales de salida (Der.). (Alonso Ripoll, 2017)	30
Figura 2.16 Fundamento de operación del PWM. (Alonso Ripoll, 2017)	31
Figura 2.17 Inversor ideal y secuencia de disparo. (Alonso Ripoll, 2017).....	31
Figura 2.18 Esquema básico de un coche eléctrico. (Dani meganeboy, 2017).....	32
Figura 2.19 Sistema de aire acondicionado (Izq.) y calefacción (Der.)Del Mitsubishi i-MiEV. (Dani meganeboy, 2017)	32
Figura 2.20 Esquema de la unidad de control. (Dani meganeboy, 2017).....	33
Figura 2.21 Cuadrantes del espacio par-velocidad. (Alonso Ripoll, 2017).....	33
Figura 2.22 Elementos de la estrategia de frenado paralelo. (Dani meganeboy, 2017) ..	36
Figura 2.23 Elementos de la estrategia de frenado serie. (Dani meganeboy, 2017).....	36
Figura 2.24 Esquema del sistema de frenado del Renault ZOE. (Dani meganeboy, 2017)	37
Figura 2.25 Esquema del sistema de frenos. (Sabelotodo, s.f.).....	37
Figura 2.26 Sistema de transmisión con caja de cambios. (Dani meganeboy, 2017).....	38
Figura 2.27 Sistema de transmisión con grupo reductor y diferencial. (Dani meganeboy, 2017)	39
Figura 2.28 sistema de transmisión con rueda motorizada. (Dani meganeboy, 2017)	39
Figura 2.29 Esquema del sistema mecánico y eléctrico del Tesla Model S. (Dani meganeboy, 2017)	39
Figura 2.30 Detalle del sistema eléctrico y del grupo reductor del Nissan Leaf. (Dani meganeboy, 2017)	40
Figura 2.31 Comparación de las gráficas de tracción de un V.C.I y un V.E. (Dani meganeboy, 2017)	40

Figura 2.32 Velocidad máxima para distintas pendientes. V.C.I de 4 marchas(a) y V.E (b). (Alonso Ripoll, 2017)	42
Figura 2.33 Mapa de rendimiento para distintos regímenes de un motor. (Yamaguchi, 2011)	42
Figura 3.1 Grafico velocidad-tiempo del ciclo NEDC. (Foro coches, 2015).....	46
Figura 3.2 Grafica velocidad-tiempo para el ciclo 10-15. (EPA, 2017).....	46
Figura 3.3 Grafica velocidad-tiempo para el ciclo WLTP. (Jmcc500, 2017)	47
Figura 3.4 Grafica velocidad-tiempo para el ciclo FTP-75. (EPA, 2017).....	48
Figura 3.5 Grafica velocidad-tiempo del ciclo de fase extraurbana. (EPA, 2017).....	48
Figura 3.6 Graficas velocidad-tiempo para los ciclos US06 y SC03. (Salva_malprtida, 2012)	49
Figura 4.1 Componentes de una batería de Pb-Ácido. (Alonso Ripoll, 2017).....	52
Figura 4.2 Reacciones durante la descarga de una batería de Níquel-MeH. (López Martínez, 2015).....	54
Figura 4.3 Estructura química de LCO. (Brant, 2014).....	55
Figura 4.4 Estructura química de las baterías LMO. (Brant, 2014)	56
Figura 4.5 Estructura química de las baterías LFP. (Molenda & Molenda, 2011).....	57
Figura 4.6 Estructura de una batería de Litio-Azufre. (Sanchez Criado, s.f.)	58
Figura 4.7 Comparación entre las baterías de Litio-ion y las baterías de estado sólido. (Fernández, 2017)	59
Figura 4.8 Degradación experimental de la batería de Tesla frente a los kilómetros. (Noya, 2016).....	61
Figura 4.9 Degradación en laboratorio de la batería de Tesla según el número de ciclos realizados. (HYE, 2018)	61
Figura 4.10 Sistema de refrigeración de Tesla. (Fernandez, 2016).....	64
Figura 5.1 Capacidad de una batería de Pb-Ácido frente a intensidad de descarga. (Alonso Ripoll, 2017)	67
Figura 5.2 Esquema del modelo de resistencia interna. (He, Xiong, & Fan, 2011).....	69
Figura 5.3 Variación de la resistencia interna de la batería en función del SOC. (Jiang, 2015)	69
Figura 5.4 Esquema del modelo RC realizado por SAFT. (He, Xiong, & Fan, 2011)	70
Figura 5.5 Esquema del modelo de Thevenin. (He H. , Xiong, Guo, & Li, 2012)	71
Figura 5.6 Esquema del modelo PNGV. (He, Xiong, & Fan, 2011)	71
Figura 5.7 Esquema del modelo de polarización dual. (He, Xiong, & Fan, 2011)	72
Figura 5.8 Esquema propuesto por (Chem & Rincon-Mora, 2006)	73
Figura 5.9 Grafica de descarga con datos experimentales y simulados. (Chem & Rincon-Mora, 2006)	74
Figura 5.10 Implementación del modelo de Tremblay en Simulink. (Tremblay, 2009)....	75
Figura 5.11 Descarga (a) y Carga (b) de una batería de Litio de 2.3 Ah y 3.3V. (Tremblay, 2009)	76
Figura 5.12 Modelo propuesto por (Dubarry & Liaw, 2007).....	76
Figura 5.13 Ensayos de caracterización del modelo. (Dubarry & Liaw, 2007).....	77
Figura 5.14 Resultados obtenidos en el modelo. (Dubarry & Liaw, 2007)	77

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Figura 6.1 Esquema propuesto por (Chem & Rincon-Mora, 2006).	79
Figura 6.2 Parámetros de TCP PL-383562 a temperatura ambiente. (Chem & Rincon-Mora, 2006)	80
Figura 6.3 Configuración serie(a) y circuito equivalente(b), propuesto por (Kim, Park, Chang, & Choi, 2012)	82
Figura 6.4 Graficas tensión-tiempo para una descarga de 0,42 A (Izq.) y de 0,85 A(Der.).(Elaboración propia)	83
Figura 6.5 Tesla Model S 85 kWh. (km77, s.f.).....	83
Figura 6.6 Comparación batería de tesla con las baterías AA. (Wikipedia, 2018)	84
Figura 6.7 Fuerzas a las que está sometido un vehículo. (Alonso Ripoll, 2017)	85
Figura 6.8 Grafica Potencia-tiempo para el ciclo NEDC.(elaboración propia).	86
Figura 6.9 Gráfica voltaje-tiempo para el ciclo NEDC.(elaboración propia).	88
Figura 6.10 Gráfica intensidad-tiempo para el ciclo NEDC.(elaboración propia).	88
Figura 6.11 Gráfica SOC-tiempo para el ciclo NEDC.(elaboración propia).....	88
Figura 6.12 Gráfica voltaje-tensión para el ciclo HFET.(elaboración propia).....	89
Figura 6.13 Gráfica intensidad-tiempo para el ciclo HFET.(elaboración propia).	89
Figura 6.14 Gráfica SOC-tiempo para el ciclo HFET.(elaboración propia).	90
Figura 6.15 Gráfica voltaje-tiempo para el ciclo 10-15.(elaboración propia).	90
Figura 6.16 Gráfica intensidad-tiempo para el ciclo 10-15.(elaboración propia).	91
Figura 6.17 Gráfica SOC-tiempo para el ciclo 10-15.(elaboración propia).	91
Figura 6.18 Gráfica voltaje-tiempo para un ciclo 10-15.(elaboración propia).....	92
Figura 6.19 Gráfica Intensidad-tiempo para un ciclo 10-15.(elaboración propia).....	92
Figura 6.20 Gráfica SOC-tiempo para un ciclo 10-15.(elaboración propia).	92
Figura 6.21 Energía regenerada durante el frenado. (Alonso Ripoll, 2017)	93
Figura 6.22 Gráfica Autonomía-rendimiento del frenado regenerativo.(elaboración propia).....	93
Figura 6.23 Gráfica Autonomía-Pérdida de capacidad.(elaboración propia).	94
Figura 6.24 Gráfica autonomía-temperatura, en función del tamaño de rueda y uso del sistema de climatización.(elaboración propia).	95
Figura 6.25 Tipos de llantas para el Tesla Model 3. (Rodriguez, 2017)	95

Lista de tablas:

Tabla 2.1 Comparación de las prestaciones de los V.C.I frente a los V.E. (Alonso Ripoll, 2017)	41
Tabla 2.2 Autonomía de los vehículos eléctricos actuales.(Elaboración propia).....	43
Tabla 4.1 Característica de las baterías Plomo-Ácido. [Elaboración propia]	53
Tabla 4.2 Características de las baterías de Níquel-Cadmio. [Elaboración propia]	53
Tabla 4.3 Características de las baterías de Níquel-MeH. [Elaboración propia].....	54
Tabla 4.4 Comparación de las baterías de Litio. [Elaboración propia]	59
Tabla 4.5 Opciones para el alquiler/compra de baterías del ZOE. (Viñuela, 2017)	62
Tabla 4.6 Condiciones y precio mensual del alquiler de las baterías del ZOE. (Viñuela, 2017)	63
Tabla 5.1 Resumen de los modelos electroquímicos. (He H. , Xiong, Guo, & Li, 2012)	68
Tabla 5.2 Resultados de la aplicación del modelo de (Chem & Rincon-Mora, 2006).....	74
Tabla 6.1 Valores de las componentes de la TCP PL-383562. (Chem & Rincon-Mora, 2006)	87
Tabla 6.2 Comparación de los resultados de autonomía obtenidos. (elaboración propia).	87

1 Introducción, objetivos y estructura:

1.1 Introducción:

La contaminación del aire es un tema que nos preocupa a todos, cada vez se tiene más presente y desde las instituciones cada vez se toman más medidas. Por ejemplo, como hablaremos en este trabajo, y sobre todo desde el famoso caso del “dieselgate”, las administraciones han modificado la normativa, endureciendo los ciclos de homologación.

A nivel nacional, al igual que sucede en otros países europeos, se están tomando muchas medidas para controlar el tema de la contaminación, como son las siguientes acciones:

- ✚ Prohibición o aumento del precio del aparcamiento para vehículos de gasolina anteriores al 2.000 y diésel con matrículas anteriores al 2.006.
- ✚ Favorecer el uso del transporte público y bicicletas.
- ✚ Ayudas a la adquisición de vehículos menos contaminantes y una mayor instalación de puntos de recarga.
- ✚ Endurecimiento de la ITV y radares “anticontaminación”.
- ✚ Prohibición de entrada en las ciudades, mediante distintivos como se puede observar en la Figura 1.1:

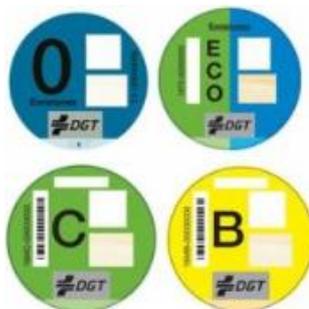


Figura 1.1 Distintivos ambientales disponibles. (Zaragoza, 2017)

Debido a todo esto, se está produciendo un importante auge en los vehículos con combustibles alternativos, como son los vehículos de combustión a gas natural comprimido (GNC), gas natural licuado (GNL) o gas licuado del petróleo (GLP), así como el vehículo eléctrico. Este último es el que utilizamos en este TFG para conocer las prestaciones y componentes que lo forman, y poder aportar un punto de vista en orden a su viabilidad como una opción libre de emisiones.

1.2 Objetivos:

Como objetivo específico en el presente Trabajo Fin de Grado es llevar a cabo la simulación del comportamiento de una batería de un vehículo eléctrico sometida a distintos ciclos de conducción, para de esta manera poder averiguar su autonomía y las condiciones de descarga de la batería.

Para poder llegar a este objetivo general, se han planteado unos objetivos específicos que son los siguientes:

- ✚ Conocer las distintas partes que posee el vehículo eléctrico, entender su funcionamiento y los distintos tipos disponibles de cada elemento.
- ✚ Averiguar que es un ciclo de conducción, para que se utilizan y los tipos de ciclos que hay a nivel mundial.
- ✚ Poder simular una batería de Ion-Litio, para lo cual hay que conocer los modelos de baterías disponibles y optar por la programación de uno en la herramienta matemática Matlab.
- ✚ Poder adaptar el modelo a la batería que disponemos, calcular el consumo de nuestro vehículo ante distintos ciclos de conducción y poder obtener los resultados de autonomía y componentes de descarga deseados.

1.3 Estructura:

En este apartado se va a explicar la estructura del TFG, en el cual se ha decidido desarrollar el estado del arte a lo largo de él.

- ✚ Capítulo 1: se realiza una introducción de lo que se va a desarrollar en el trabajo, se fijan los objetivos a conseguir y se explica la estructura que posee.
- ✚ Capítulo 2: En este capítulo se explica el funcionamiento de los distintos elementos que forman parte del vehículo eléctrico, a excepción de las baterías que se le dedica de forma íntegra el capítulo 4. También se comentan las prestaciones que ofrecen los vehículos eléctricos comparados con los vehículos de combustión.
- ✚ Capítulo 3: dentro de este capítulo hemos descrito lo que son y la función de los distintos ciclos de conducción que hay actualmente y los futuros.
- ✚ Capítulo 4: se realiza una recopilación de la información de los distintos tipos de baterías y sus principales características. Dentro de estos tipos de baterías, se ha hablado tanto de las baterías que eran utilizadas en el pasado como las que están actualmente en auge, además de las líneas futuras. También se incluye unos apartados sobre el cuidado, envejecimiento y sustitución de baterías como del sistema de refrigeración de las mismas.
- ✚ Capítulo 5: dentro de este capítulo podemos encontrar los distintos modelos electroquímicos y de circuito equivalente, así como modelos propuestos por investigadores de otras universidades.
- ✚ Capítulo 6: en este capítulo se simula un modelo de los vistos en el capítulo anterior, y adaptaremos dicho modelo para el Tesla Model S de 85 kWh. Iremos sacando distintas simulaciones de nuestro programa para diferentes ciclos de conducción.
- ✚ Capítulo 7: en este último capítulo se muestran las conclusiones extraídas del trabajo y los posibles trabajos futuros que se puedan llevar a cabo.
- ✚ Por último se acompaña de la bibliografía consultada y los anexos con las fichas técnicas consultadas.

2 Simulación del vehículo eléctrico:

En este apartado vamos a hablar de las principales características técnicas de los elementos que componen nuestro vehículo eléctrico. Este capítulo es complementado con el capítulo 4 Baterías de tracción, que es donde explicamos el funcionamiento y los tipos de baterías.

2.1 Sistema eléctrico del vehículo:

En este apartado vamos a introducir los elementos principales del sistema eléctrico del vehículo.

2.1.1 Motores eléctricos:

En un vehículo eléctrico el motor de combustión es sustituido por el motor eléctrico. Este motor es el encargado de transformar la energía eléctrica que se le proporciona entre sus bornes a energía mecánica, la cual a través de la transmisión pasa a las ruedas, permitiendo así el movimiento del vehículo.

Vamos a analizar a continuación los diversos tipos de motores eléctricos que se utilizan en tracción, o que tienen perspectivas de utilizarse en desarrollos futuros.

2.1.1.1 Motores asíncronos o de inducción:

Fue desarrollado a finales del siglo XIX independientemente por Galileo Ferraris y Nikolas Tesla. Es el motor más utilizado en la industria, alrededor del 80 % de motores de la industria son de este tipo. Destacan por su alta eficiencia, coste bajo, bajo ruido y vibraciones, fiabilidad y un par constante. Por la contra posee una baja densidad de potencia, el bajo par de arranque y el riesgo de sobrecarga.

Estos motores están formados por el estator y el rotor. El estator es un anillo cilíndrico de chapas magnéticas, donde se encuentran las bobinas inductoras desfasadas entre si 120° . El rotor está formado por un conjunto de chapas apiladas formando un cilindro, que tiene unas ranuras en la circunferencia exterior en las que se coloca el devanado. Hay dos tipos de rotor que son los siguientes:

- ✓ Rotor en jaula de ardilla: se dispone de una serie de conductores de cobre o aluminio puestos en cortocircuito por dos anillos laterales. Como se ve en la Figura 2.1.

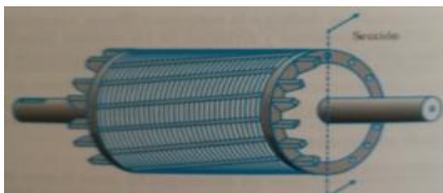


Figura 2.1 Rotor en jaula de ardilla. (Fraile Mora, 2015)

- ✓ Rotor devanado o con anillos: se tiene un arrollamiento trifásico similar al del estator, en los que por un lado se conectan en estrella y por el otro se envía a unos anillos aislados. Esta disposición hace posible la introducción de resistencias para limitar las corrientes. Podemos observar esta configuración en la Figura 2.2.

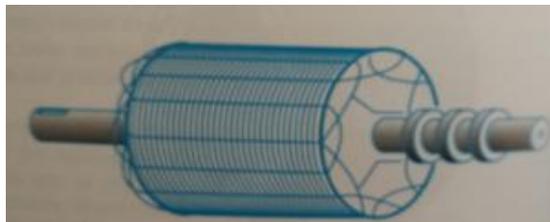


Figura 2.2 Rotor devanado o con anillos. (Fraile Mora, 2015)

Al introducir en los tres devanados del estator sendas corrientes de una red trifásica de frecuencia f , se produce una onda rotativa de una fuerza magnetomotriz distribuida sinusoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce un campo magnético giratorio cuya velocidad mecánica en r/min, viene expresada por la siguiente formula:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

A n_1 se le conoce como la velocidad de sincronismo y p es el número de pares de polos de la máquina.

Pero esta velocidad de sincronismo no es la velocidad a la cual gira el rotor. Esto es debido a que, si la velocidad del rotor se aproxima a la velocidad de sincronismo, las fuerzas electromotrices inducidas en los conductores del rotor se verán reducidas también. Por consiguiente se reducen las corrientes que atraviesan el rotor, provocando una reducción del par electromagnético del motor.

Por lo que hemos dicho en el anterior párrafo, el motor va a girar a una velocidad n menor que la velocidad de sincronismo o n_1 . Esta velocidad n será tanto menor, cuanto mayor sea el par resistente ofrecido por la carga que mueve el motor. Esta variación entre la velocidad del motor y la velocidad síncrona, queda reflejada con el coeficiente de deslizamiento (s), el cual tiene la siguiente formula:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2.2)$$

El estudio eléctrico del motor asíncrono se lleva a cabo mediante un circuito equivalente, como se muestra en la Figura 2.3.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

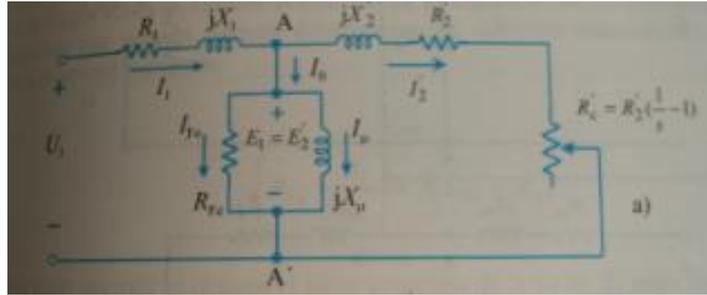


Figura 2.3 Circuito equivalente de un motor asíncrono. (Fraile Mora, 2015)

De todas estas resistencias y reactancias que aparecen en el circuito, nos interesa la R_c' . Esta resistencia es ficticia y da idea sobre la potencia mecánica que disponemos en el eje.

El par motor viene descrito por la siguiente fórmula:

$$T = \frac{3 \cdot R_c' \cdot I_2'^2}{s \cdot n_s} \quad (2.3)$$

Donde n_s es la velocidad de sincronismo en radianes por segundo.

Podemos observar en la Figura 2.4, la característica par-deslizamiento. En ella se puede observar que si el motor está parado el deslizamiento tiene el valor 1, y que cuando el deslizamiento es 0, el motor no proporciona par. Esto es debido a que el motor se encuentra en el punto de sincronismo. Se observa también que hay un punto máximo de par, el cual separa la gráfica en dos partes. La de la izquierda es una parte inestable en la cual tiene lugar la aceleración y en la de la derecha es la parte estable. En esta parte estable de funcionamiento se dice que el motor posee de una característica dura o estable, en la cual el par disminuye muy poco con la velocidad, por eso se dice que estos motores giran a una velocidad asíncrona prácticamente constante.

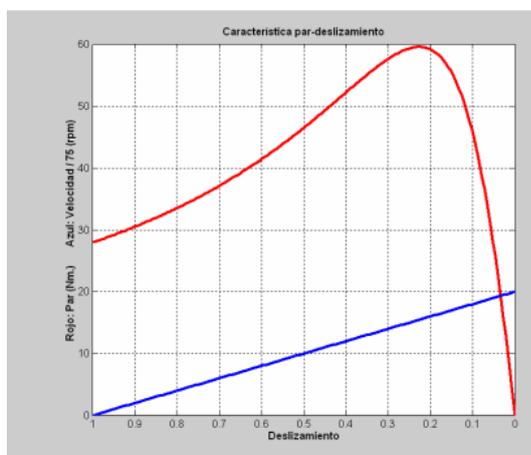


Figura 2.4 Característica del par de un motor de inducción. (Alonso Ripoll, 2017)

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

En la Figura 2.5 podemos observar como varia el rendimiento respecto al deslizamiento. El punto más alto es el que debería de ser el deslizamiento nominal del motor, en este punto el motor es donde menos pérdidas posee, es decir, el punto con mayor rendimiento. También podemos observar la importancia del dimensionamiento en estos motores, en que si utilizamos el motor a potencias más bajas de la nominal, el deslizamiento se acerca a cero y el rendimiento sería penoso.

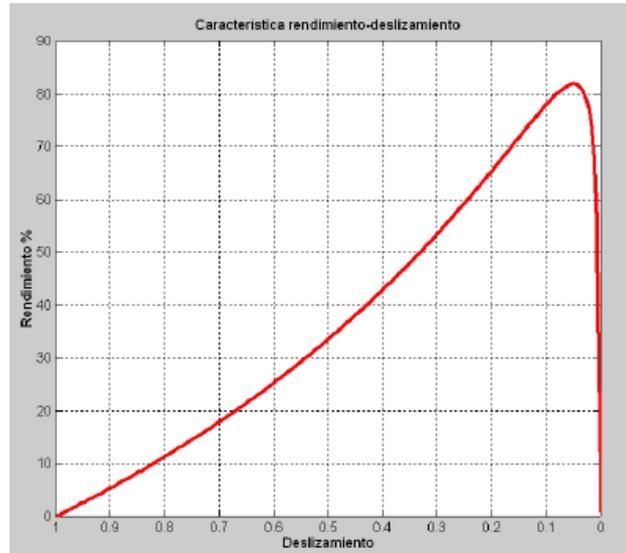


Figura 2.5 Característica del rendimiento de un motor de inducción. (Alonso Ripoll, 2017)

En la Figura 2.6 podemos observar la gráfica de par-velocidad, con las tres zonas en las que puede trabajar este tipo de motor.

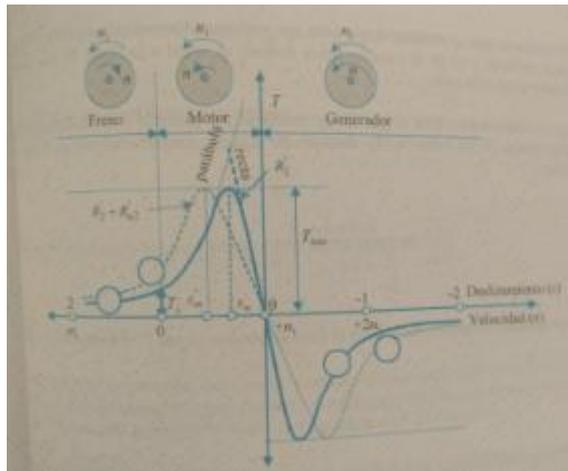


Figura 2.6 Zonas de funcionamiento de un motor de inducción. (Alonso Ripoll, 2017)

Las ventajas que posee este tipo de motor respecto a los demás, son las siguientes:

- ✓ Robustos mecánica y térmicamente, con un mantenimiento bajo, compactos y con un alto rendimiento.
- ✓ Económicos, al ser fáciles de fabricar.
- ✓ Si se utiliza el control vectorial mediante el uso de un convertidor electrónico de potencia, va a tener un buen comportamiento dinámico.

Algunas desventajas que se pueden citar, son las siguientes:

- ✓ Baja densidad de potencia.
- ✓ Ligeramente menor eficiencia a baja velocidad, el motor pierde rendimiento si se reduce la velocidad.

Un ejemplo del uso de este tipo de motores es Tesla en su Model S. Utiliza un motor trifásico de inducción con rotor de cobre y posee 4 polos, gira hasta las 15.000 rpm y esta refrigerado por agua.

2.1.1.2 Motores síncronos de imanes permanentes:

Un motor síncrono es un maquina eléctrica en la que el rotor esta magnetizado y gira a la misma velocidad que el campo magnético:

$$n = \frac{60*f}{p} \quad (2.4)$$

En este tipo de motor el estator está formado por tres bobinas que están conectadas en estrella. El rotor está compuesto por electroimanes o imanes permanentes que son los encargados de crear un flujo constante en el entrehierro, de esta forma eliminamos la necesidad del uso de las escobillas y el rotor bobinado.

Su funcionamiento consiste en que los imanes permanentes generan un campo magnético de corriente continua, este campo entra en el núcleo del estator e interactúa con las corrientes que fluyen dentro de las bobinas para producir una interacción de par entre el rotor y el estator. A medida que el rotor gira, es necesario que la magnitud y la polaridad del estator varíen continuamente, para que de esta manera el par de torsión se mantenga constante y la conversión de corriente sea más eficiente. El aparato encargado de todo esto es el inversor. Podemos observar el esquema del motor en la siguiente Figura 2.7.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS



Figura 2.7 Motor eléctrico de imanes permanentes. (Dani meganeboy, 2017)

Como ventajas de este tipo de motor podemos destacar las siguientes:

- ✓ Alta densidad de potencia debido a la ausencia de conmutadores mecánicos y escobillas. Potencia constante en un amplio rango.
- ✓ Tamaño pequeño y peso reducido.
- ✓ Control bastante sencillo.
- ✓ Buena disipación térmica.
- ✓ Bajo coste de mantenimiento y alta capacidad de sobrecarga/par de arranque.

Como desventajas al tener en cuenta:

- ✓ A elevadas velocidades, las pérdidas en el estator pueden ser importantes y la eficiencia puede reducirse debido al riesgo de desmagnetización.
- ✓ Coste de fabricación elevada.
- ✓ Baja gama de velocidades y difícil uso para frecuencias elevadas.
- ✓ Importante mantener la refrigeración.
- ✓ Dependencia de tierras raras.

Actualmente se utiliza en vehículos híbridos y también en algunos eléctricos. Por ejemplo es usado en el Renault Zoé, podemos observar su esquema en la Figura 2.8.

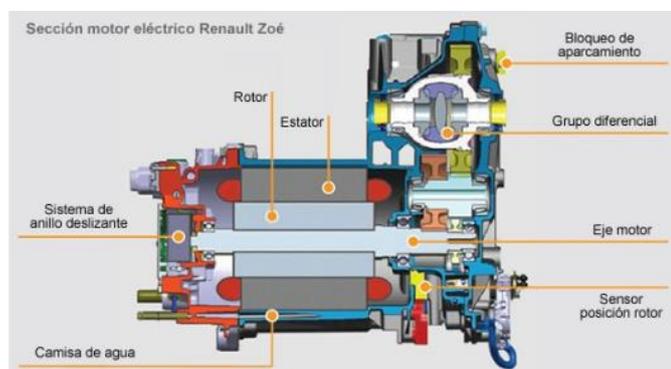


Figura 2.8 Sección del motor eléctrico del Renault ZOE. (Dani meganeboy, 2017)

2.1.1.3 Motores de corriente continua:

Estos tipos de motores fueron los primeros motores en aparecer en la tracción eléctrica de vehículos, pero actualmente han sido sustituidos por motores de corriente alterna. Esta sustitución se debió a que los motores de corriente alterna poseen mejores valores de rendimiento, relación de peso/potencia, menor coste de fabricación y mantenimiento. Aunque tenían una gran ventaja, que era su facilidad para controlarse con un reóstato y unos contactores, ante la ausencia de la electrónica que todavía no se había inventado. Podemos ver el esquema del motor en la Figura 2.9.

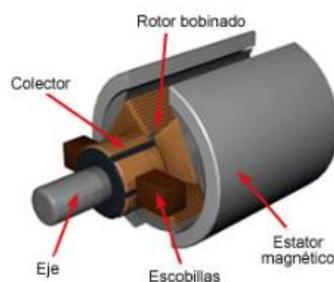


Figura 2.9 Estructura de un motor de corriente continua. (Dani meganeboy, 2017)

Existe una nueva versión de estos motores, que son los motores de corriente continua sin escobillas o Brushless. Estos motores tienen un funcionamiento muy parecido al motor síncrono de imanes permanentes, pero con la diferencia que la electrónica es considerada parte del motor.

Estos motores son muy pocos usuales, aunque podemos destacar el uso de un motor brushless en el vehículo híbrido, Honda Insight.

2.1.1.4 Motores de flujo axial de imanes permanentes:

Se descubrieron hacia 1830, antes que los motores de flujo radial. Pero con la llegada de estos últimos estos tipos de motores se dejaron de lado. Ahora con la preocupación por el medio ambiente, la búsqueda de máquinas eléctricas alternativas, el desarrollo de la electrónica y los imanes permanentes de alta energía, ha dado un gran impulso a la investigación de estos motores.

La ventaja de estos motores respecto a los demás motores es su reducido tamaño, que le harían óptimo para la integración en el interior de cada rueda (Figura 2.10). Esta configuración optimiza el número de componentes, masa, flujo de potencia y tiempo de montaje del vehículo. También favorece una mayor estabilidad, así como un mayor espacio en el vehículo.



Figura 2.10 Motor integrado en la rueda. (Alonso Ripoll, 2017)

En este tipo de motores el campo magnético atraviesa el entrehierro en dirección radial, que es la misma dirección en la cual están colocados los conductores. De esta manera el campo axial actúa sobre la corriente radial con una fuerza tangencial que es la causante de que el rotor gire.

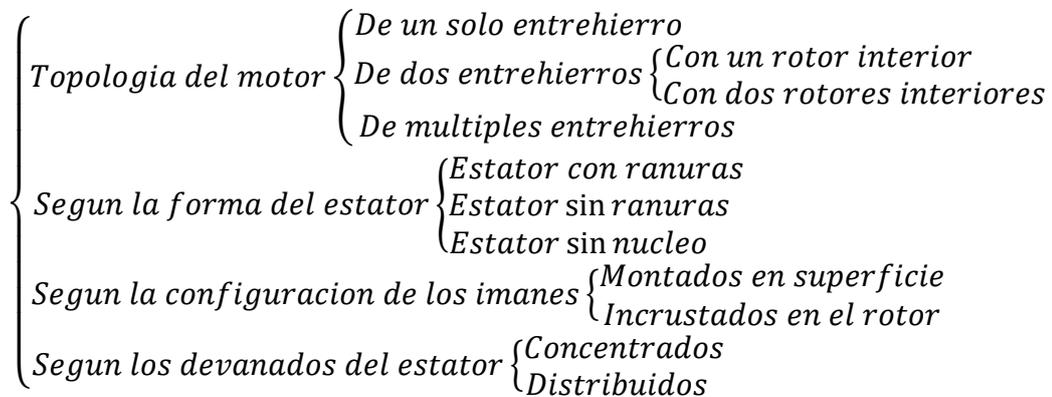
Algunas ventajas que poseen son las siguientes:

- ✓ Su autoventilación es muy eficaz, devanados sencillos y económicos.
- ✓ Por su gran momento de inercia, el rotor actúa como un volante de inercia.
- ✓ El par posee poco rizado y es un motor silencioso.
- ✓ En la configuración de motor integrado, se alcanza mayor densidad de par por unidad de volumen.

Pero también presentan las siguientes desventajas:

- ✓ La fuerza magnética de atracción entre el estator y el rotor es muy grande.
- ✓ El ensamblaje es costoso y la realización de las ranuras en el devanado del estator son costosas.
- ✓ Las versiones mayores plantean problemas mecánicos debido a las fuerzas de inercia por el gran diámetro.
- ✓ Posee baja densidad de par por unidad de masa.

Respecto a las formas constructivas podemos verlas en el siguiente esquema:



2.1.1.5 Motores de reluctancia conmutada:

Son unos motores que todavía no han tenido uso en la industria, son motores muy distintos a los motores tradicionales. Tanto el estator como el rotor poseen la configuración de polos salientes, aunque lo que más sorprende es la ausencia de devanados o imanes permanentes en el rotor. Posee mucha variedad en sus formas constructivas. Podemos observar la forma del estator y el rotor en la Figura 2.11.



Figura 2.11 Motor de reluctancia conmutada. (Alonso Ripoll, 2017)

Su funcionamiento se basa en el que el motor gira al orientarse los dientes del rotor con el campo magnético producido por la corriente eléctrica que recorre el devanado del estator, buscando el camino que posea la menor reluctancia. Mediante la conmutación de los bobinados, que es llevada a cabo por el dispositivo electrónico de potencia, podemos conseguir el par y la velocidad de giro deseada.

Algunas ventajas de estos tipos de motores, son las siguientes:

- ✓ Pueden trabajar a mayor temperatura por no disponer de aislantes en el rotor y disponer de una fácil ventilación.
- ✓ Son robustos, económicos, sin apenas mantenimientos y puede trabajar con fallos en algunas de las fases de estator.
- ✓ Mayor rendimiento y más compacto que los de corriente continua, pero superados por los motores de imanes permanentes.
- ✓ La región de par máximo y constante de la característica par-velocidad es muy amplia.

2.1.2 Bloque electrónico:

El bloque electrónico de potencia es el director del sistema energético de nuestro vehículo, sin él ni el motor eléctrico ni baterías podrían llevar a cabo sus funciones.

Todo este bloque está compuesto normalmente por el cargador, inversor, rectificador y convertidor, como es el caso del Renault ZOE. Gracias a todos estos elementos es capaz de regular los flujos de intensidad que circulan por el motor y las baterías.

Algunas especificaciones a tener en cuenta respecto a la electrónica, son las siguientes:

- ✓ Vida útil entre 15 y 20 años con un número de ciclos sobre los 10.000.
- ✓ Variaciones de temperatura de 100°C.
- ✓ La resistencia a las vibraciones (5-12g) y choques (50-100g), se suelen colocar en el comportamiento motor, pero no encima del motor.
- ✓ El código IP depende de la localización dentro del vehículo, pero no deberá ser inferior a un IP 54 (protección frente a polvo y agua).

2.1.2.1 Cargador:

El cargador es el elemento que se encarga de absorber la electricidad directamente desde la red y la transforma en corriente continua para poder cargar la batería principal. En el caso de los cargadores ultra-rápidos de corriente continua (DC), no se utiliza el cargador interno del vehículo, sino que se carga la batería directamente, como se puede observar en la Figura 2.12.

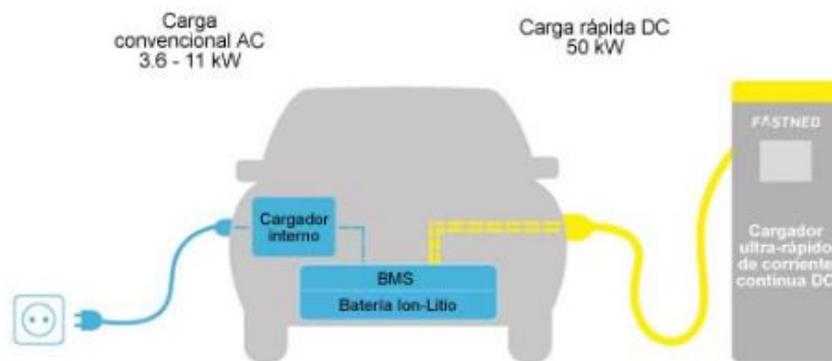


Figura 2.12 Modos de carga. (Dani meganeboy, 2017)

Renault dispone de un tipo de cargador denominado Camaleón que está protegido por una patente, el cual es el único del mercado que consigue alimentarse en el 100% de los puntos de recarga de Europa, así como en un enchufe convencional.

2.1.2.2 Inversor:

El inversor es junto con el motor y la batería uno de los elementos más importante en el vehículo eléctrico. Es el encargado de suministrar al motor la tensión y frecuencia variable, La variación de la tensión y la frecuencia de alimentación del motor se traducirá en un desplazamiento y en la modificación de la característica del par del motor, como se ve en la Figura 2.13.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

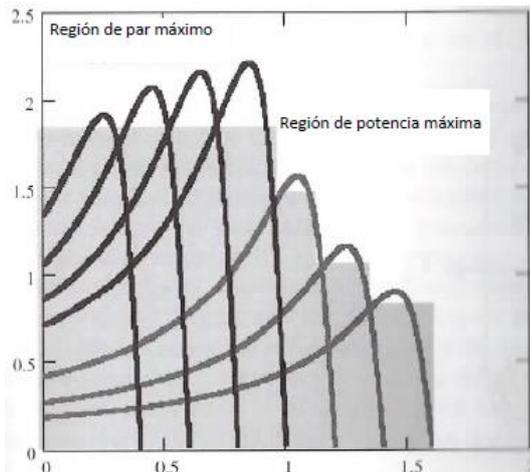


Figura 2.13 Variación de la característica del par al variar la tensión y la frecuencia. (Alonso Ripoll, 2017)

El par es proporcional a la relación que hay entre la tensión/frecuencia, en la zona de arranque y bajas velocidades, es decir, para el tramo izquierdo de la característica. En esta parte el inversor realiza un control escalar, consiste en mantener constante V/f .

El valor del par que habrá que mantener constante, estará relacionado con la necesidad de una determinada aceleración del vehículo. Este par puede llegar a estar limitado por la corriente que circule por el motor, y en cualquier caso, por la potencia que pueda suministrar el motor.

En la frontera entre la parte de la característica de par constante y la de potencia constante, se encuentra la velocidad de base. Que es la velocidad que suministra el motor cuando se llega al valor máximo de tensión, y por lo cual, al valor máximo de potencia.

El inversor por lo visto anteriormente es el encargado de acercar las curvas de par y potencia a su comportamiento ideal. De esto se deriva el no uso o la reducción de los sistemas de caja de cambios y transmisión.

Respecto a la tecnología de la que están compuesto los inversores, se suele usar los MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). El problema es que trabaja a baja tensión y por lo cual la potencia que puede suministrar es baja. Con la llegada de la tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) se impusieron frente a los MOSFET. Este hecho fue debido a que pueden operar a tensiones más elevada, 375 V o más, y con corrientes medias y altas, del orden de 10 a 1.000 A. Todo esto se traduce en la capacidad de operar a una mayor potencia que los MOSFET.

Un IGBT es un transistor controlado por tensión que posee tres terminales. Uno de ellos es el que se denomina puerta G o Gate, y es en el cual se aplica una tensión, para permitir la circulación de corriente a través del transistor. Otra ventaja respecto al MOSFET es que puede trabajar a unas frecuencias de conmutación de hasta 50 kHz, con menores pérdidas por conducción. Podemos ver un inversor de esta categoría alimentando a un motor en la Figura 2.14.

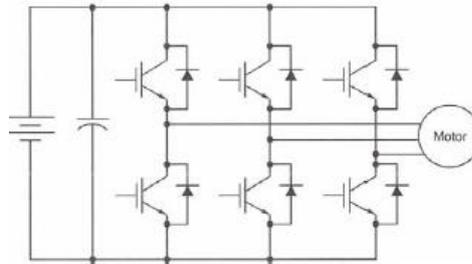


Figura 2.14 Inversor con IGBTs alimentando un motor. (Alonso Ripoll, 2017)

Respecto al modo de operación hay dos técnicas, que son el six-step y el PWN senoidal.

En el modo de operación six-step es el más sencillo y cada ciclo de funcionamiento, que posee una duración de 2π radianes, se divide en 6 intervalos de $\pi/3$ radianes cada uno. En cada intervalo de estos permanecerán 3 IGBTs en ON y otros tres en OFF, de manera que no estén activados nunca dos IGBTs de la misma rama a la vez. Se puede observar la secuencia de operación y la salida en la Figura 2.15.

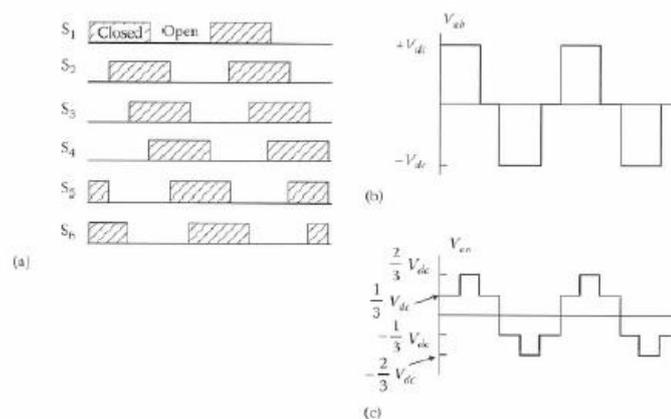


Figura 2.15 Señales de disparo (Izq.) y señales de salida (Der.). (Alonso Ripoll, 2017)

Se obtiene una tensión no senoidal, pero con el valor eficaz y la frecuencia buscados. Esta técnica posee una gran distorsión armónica, la cual alguna favorece al funcionamiento del motor, pero otra la perjudica según el valor del armónico.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Para remediar algunos de los inconvenientes anteriormente citados, aparece la técnica del PWM (Power Width Modulation). Con esta técnica no conseguimos eliminar los armónicos, pero hacemos que aparezcan a unas frecuencias mucho más elevadas que con la anterior técnica. Esto permite que el filtrado sea de mayor calidad y permite un mejor control de la onda fundamental.

La señal de disparo de los IGBTs se obtiene gracias a la intersección de dos señales de control: una denominada portadora que es una señal triangular a una frecuencia superior y la otra es una señal con la forma de la onda a generar y que se denomina modeladora. Esto se puede ver en la Figura 2.16.

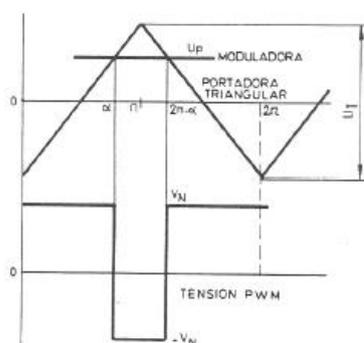


Figura 2.16 Fundamento de operación del PWM. (Alonso Ripoll, 2017)

El control de los IGBTs se realiza por pares: S_1 - S_4 , S_2 - S_5 , S_3 - S_6 . Se puede observar la configuración del inversor trifásico, en el cual sean sustituidos los IGBTs por interruptores en la Figura 2.17a y la lógica de disparo en la Figura 2.17b.

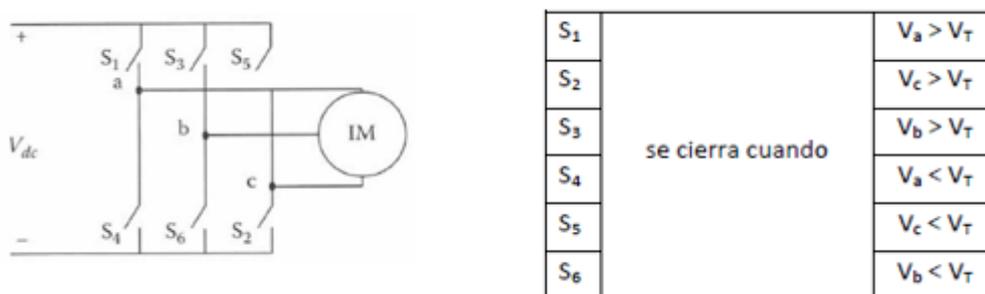


Figura 2.17 Inversor ideal y secuencia de disparo. (Alonso Ripoll, 2017)

2.1.2.3 Rectificador:

Realiza la función contraria al inversor, es decir, transforma la energía alterna procedente del motor cuando este está generando energía, para su almacenamiento en las baterías de nuevo.

2.1.2.4 Convertidor:

El conversor o convertidor transforma la alta tensión de corriente continua, que es aportada por la batería principal, a corriente continua con una tensión más baja para la utilización en los equipos auxiliares. Como por ejemplo para alimentar la batería auxiliar a 12 V como se observa en la Figura 2.18.

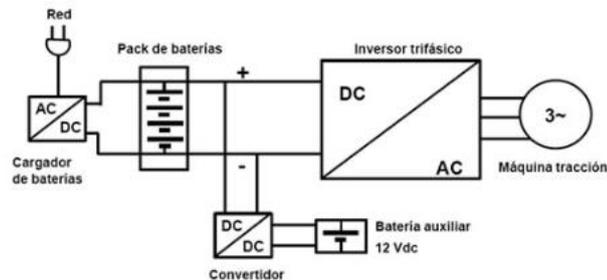


Figura 2.18 Esquema básico de un coche eléctrico. (Dani meganeboy, 2017)

2.1.3 Sistemas auxiliares:

El coche eléctrico dispone de los siguientes sistemas auxiliares adaptados a su propia tecnología como son:

- ✓ Sistema de aire acondicionado, en el cual el compresor es accionado de una manera eléctrica y no mecánica como en los vehículos convencionales.
- ✓ Sistema de calefacción que funciona de manera eléctrica, ya que no se puede aprovechar el calor del motor como en los vehículos convencionales.
- ✓ Utilización de bomba de vacío con accionamiento eléctrico que asiste al servofreno.
- ✓ También se dispone de una bomba de agua para impulsar el refrigerante por las baterías de alta tensión y la electrónica de potencia.
- ✓ Sistema de infoentretenimiento.

Podemos observar algunos de estos sistemas en la Figura 2.19.



Figura 2.19 Sistema de aire acondicionado (Izq.) y calefacción (Der.) del Mitsubishi i-MiEV. (Dani meganeboy, 2017)

2.1.4 Controlador del vehículo:

Este aparato es el gran director de orquesta de todas las partes de nuestro vehículo, se denomina también ECU o unidad de control electrónica, como se puede observar en la Figura 2.20.

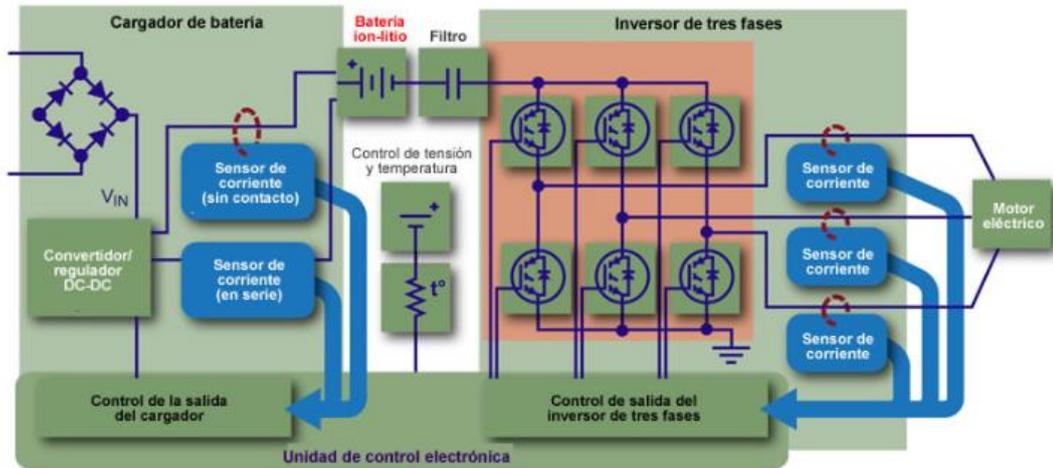


Figura 2.20 Esquema de la unidad de control. (Dani meganeboy, 2017)

Es la encargada de dar las órdenes para que el vehículo pueda funcionar en las condiciones óptimas. Debe de dejar funcionar al motor en los cuatro cuadrantes (Figura 2.21). Aparte de esto, debe de permitir el uso del frenado regenerativo, al igual que el inversor que debe de admitir flujos de potencia en ambos sentidos, para la implementación de este tipo de frenado.

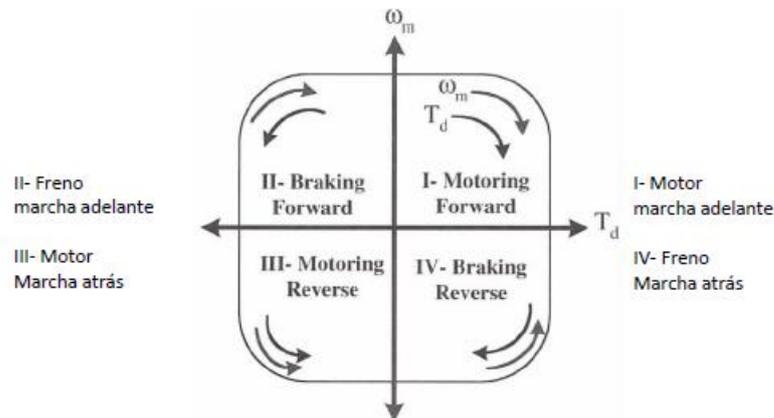


Figura 2.21 Cuadrantes del espacio par-velocidad. (Alonso Ripoll, 2017)

El frenado regenerativo tiene sus limitaciones, como hablaremos en capítulos posteriores. Estas limitaciones son por ejemplo cuando la batería se encuentra cargada o se sobrepasa la potencia del inversor en el frenado, en estos dos casos se tendrá que eliminar el exceso de energía con el uso de resistencias.

El pedal de acelerador es el que fija el par demandado, el cual es una fracción del par máximo que nos puede suministrar nuestro motor. La posición del pedal de freno nos marca el par del frenado regenerativo, y en el caso de ser necesario el del freno mecánico.

Con todo lo anterior el sistema de control realiza una estimación del par desarrollado por medio de un modelo que posee de motor. Con el cálculo de la desviación entre el par demandado y el desarrollado y la velocidad de giro, se fija la tensión de alimentación, al igual que la secuencia de disparo de los IGBTs, la cual dependerá del modo de operación del inversor.

Para construir estos sistemas de control del vehículo eléctrico, se aprendió mucho de la industria y del sector ferroviario. Se tiende a hacer un control de par y/o flujo, como son el control escalar o el control vectorial. Por ejemplo el control vectorial controla la corriente, y mediante un lazo cerrado mide el deslizamiento y en un lazo abierto lo estima.

2.1.5 Frenado regenerativo:

El sistema de frenado regenerativo o KERS (Kinetic Energy Recovery System) tiene como principal objetivo el transformar la energía que se emplea en el frenado del vehículo en energía eléctrica, para su posterior almacenaje en las baterías. Esta transformación es posible gracias a la reversibilidad del motor, ya que puede trabajar tanto como motor como en modo generador.

Como citaremos en capítulos posteriores, aparte de disponer estos vehículos de frenado mecánico, disponen también de frenado regenerativo. Al estar presentes estos dos sistemas de frenado, hace que el conjunto del sistema sea más complicado de gestionar, ya que por ejemplo en el caso en el que las baterías estén cargadas solo podrá actuar el freno mecánico. Por este motivo el sistema de gestión de frenado tendrá que elegir qué sistema y en qué medida debe de actuar, para optimizar la generación de energía y sobre todo la seguridad.

A estos dos sistemas de frenado se les exigen los siguientes puntos:

- ✓ Eficiencia: el frenado se tiene que llevar a cabo en una determinada distancia y tiempo, en el cual no se ejerza una fuerza que esté fuera de rango.
- ✓ Estabilidad: que no se produzcan frenados irregulares que provoquen que el conductor tenga que corregir la trayectoria.
- ✓ Ergonomía: que el accionamiento del freno no sea difícil de accionarlo y que posea un cierto recorrido de manera que se pueda ser progresivo.

Dicho todo esto, se distinguen dos tipos de combinaciones para gestionar estos dos sistemas de frenado, las cuales vamos a describir a continuación.

2.1.5.1 Frenado paralelo:

Es el sistema más simple que hay, puede incluir el sistema de ABS o no. Está formado por un servofreno, un cilindro maestro, disco o tambor y un controlador, tal y como se puede observar en la Figura 2.22. El controlador es el que se encarga de regular la fuerza de frenado que es proporcionada por el motor eléctrico, que influye según la posición del pedal de freno y de la velocidad del vehículo. El freno mecánico se regula solo con la fuerza que ejercemos en el pedal de freno. En caso de que se dispusiese del sistema de ABS este actuaría solo sobre el freno mecánico.

En este sistema de frenado se llevan a cabo dos estrategias a la hora de actuar, que son las siguientes:

- ✓ Relación entre las fuerzas de frenado en el eje delantero y en el eje trasero: en esta estrategia se tiene en cuenta la velocidad del vehículo, por debajo de 15 km/h solamente actúa el frenado mecánico, debido a que la fuerza electromotriz generada no es suficiente como para que entre en juego el sistema regenerativo. Si la velocidad es superior a 15 km/h y la deceleración es inferior a 0.15g solamente actuara el frenado regenerativo. Y en caso de deceleraciones superiores a los 0.15g, actuaran los dos sistemas, y como mínimo la suma de sus fuerzas de frenado será igual al valor que es proporcionado por el reglamento de ECE.
- ✓ Maximizando la energía recuperada: esta estrategia se basa en que el eje delantero que es donde va situado el frenado regenerativo, ya que mecánico lleva en los dos ejes, sea el que realice mayor fuerza de frenado. Con este hecho y siempre cumpliendo el reglamento, queremos que se produzca la mayor generación posible de energía eléctrica para cargar las baterías.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

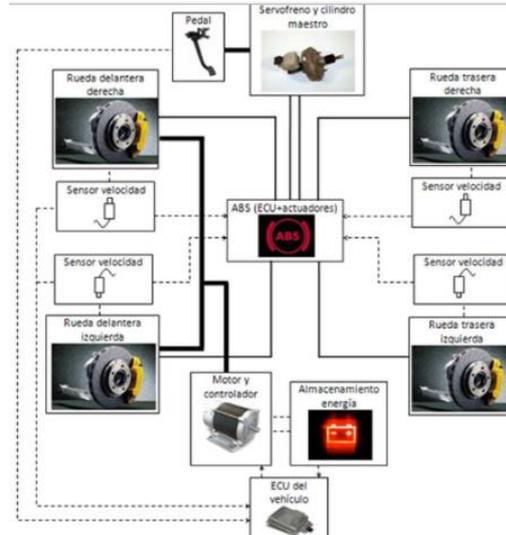


Figura 2.22 Elementos de la estrategia de frenado paralelo. (Dani meganeboy, 2017)

2.1.5.2 Frenado serie:

Este otro tipo de estrategia lleva a cabo un control de la fuerza de frenado en cada rueda, realizado por la unidad de control. Este sistema está formado por un pedal de freno, un cilindro maestro, una unidad de control, sensores de velocidad y frenos eléctricos y mecánicos por rueda, tal y como se puede observar en la Figura 2.23.

Esta estrategia es más difícil de gestionar que la estrategia que vimos anteriormente, debido a que la unidad de control ordena ejercer un determinado valor de fuerza de frenado al freno eléctrico y otra al freno mecánico. La unidad de control actuara de manera que se maximice la producción de energía eléctrica.

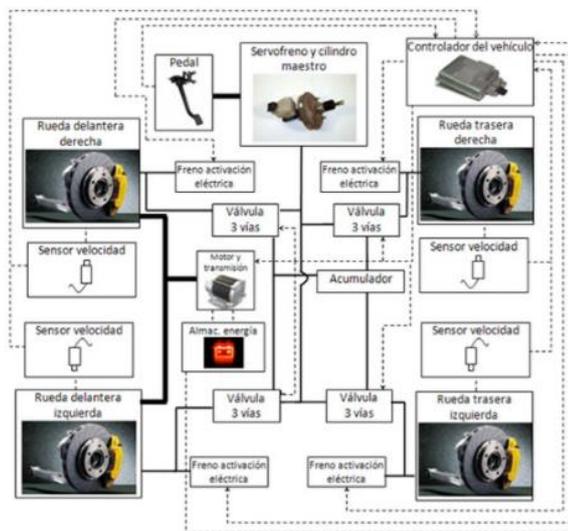


Figura 2.23 Elementos de la estrategia de frenado serie. (Dani meganeboy, 2017)

Se puede observar un esquema de los componentes del sistema de frenado que posee el Renault ZOE, en la Figura 2.24.

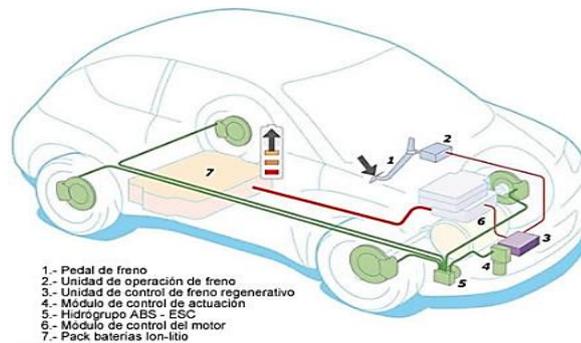


Figura 2.24 Esquema del sistema de frenado del Renault ZOE. (Dani meganeboy, 2017)

2.2 Sistema mecánico del vehículo:

En este apartado vamos a hablar sobre los elementos que componen el sistema mecánico del vehículo como son el freno y el sistema de transmisión, también sea introducido algunas pautas a seguir sobre el mantenimiento que hay que llevar a cabo en este tipo de vehículos.

2.2.1 Sistema de Frenado mecánico:

En este tipos de vehículos es muy conocido el uso del sistema de frenado regenerativo, del cual hemos hablado en el anterior apartado. Aunque se disponga de este tipo de sistema de frenado, también se les dota del freno mecánico, accionado por la presión de un fluido que puede ser hidráulico o neumático.

El esquema de este tipo de sistema de freno mecánico se puede observar en la Figura 2.25.

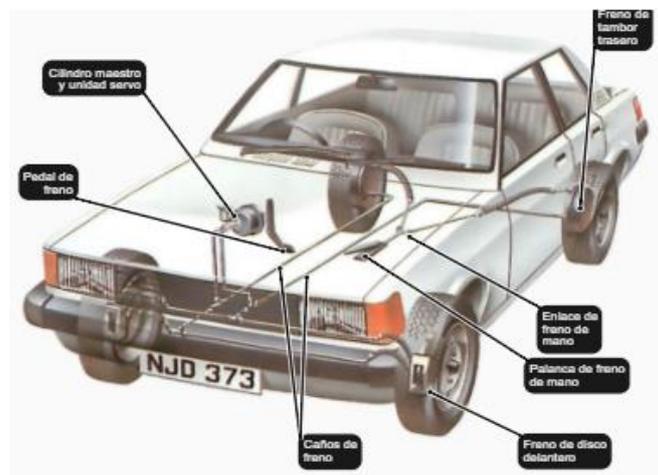


Figura 2.25 Esquema del sistema de frenos. (Sabelotodo, s.f.)

Una explicación sencilla del funcionamiento de estos sistemas de frenado, es que realizando presión en el pedal de freno, que a través del cilindro maestro y el servofreno, se ejercerá una presión en el fluido que circula a través de nuestro sistema de frenado. Esta presión se traslada a las pastillas o zapatas, al presionar estos elementos contra el disco o el tambor, respectivamente, se producirá la fuerza de frenado que detendrá el vehículo.

Introducir este sistema de frenado mecánico estando disponible el frenado regenerativo parece redundante. Pero es en este sistema donde se implementan los sistemas de seguridad como son el sistema de antibloqueo de ruedas (ABS) y el control electrónico de estabilidad (ESP).

2.2.2 Sistema de Transmisión:

En el vehículo de combustión estamos familiarizados con el uso de marchas para obtener mayor par o mayor velocidad, reduciendo la marcha o aumentando la marcha, respectivamente. Un vehículo eléctrico por el contrario posee un alto par con un amplio rango de velocidades de giro, por lo cual la transmisión se simplifica mucho. Esto quiere decir que el vehículo eléctrico no dispone de una caja de cambios como el vehículo con motor de combustión. Por lo cual en este tipo de vehículos no hace falta el empleo de embrague, es como si el vehículo solo dispondría de una única velocidad. Por otro lado para realizar la marcha atrás se debe de realizar con un inversor de corriente, el cual también limitara la velocidad disponible para ir marcha atrás por cuestiones de seguridad, ya que el vehículo eléctrico podría ir a la misma velocidad hacia adelante que hacia atrás.

Podemos destacar las siguientes configuraciones de transmisiones disponibles:

- ✓ Este tipo de transmisión es la más fácil de implementar, ya que solo consiste en sustituir el motor de combustión por uno eléctrico y dejar todo lo demás igual, como se puede observar en la Figura 2.26.

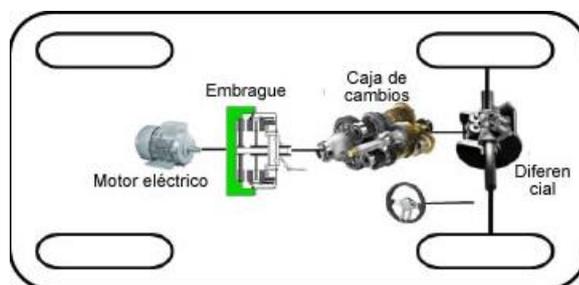


Figura 2.26 Sistema de transmisión con caja de cambios. (Dani meganeboy, 2017)

Este tipo no se utiliza habitualmente, ya que es como si quisiéramos transformar un coche convencional a eléctrico.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

- ✓ Este es el sistema que más fabricantes utilizan, y consta de eliminar el embrague y la caja de cambios. De esta manera solo quedaran el grupo reductor y el diferencial, disminuyendo el peso del vehículo y dotándole de una mejor distribución de espacios. Como se puede observar en la Figura 2.27.

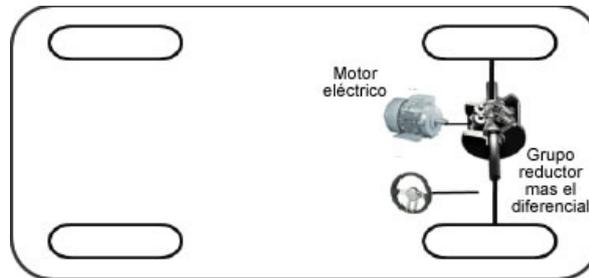


Figura 2.27 Sistema de transmisión con grupo reductor y diferencial. (Dani meganeboy, 2017)

- ✓ En este último tipo no hace faltan ningún elemento de la transmisión, cada rueda lleva un motor. Pueden llevar cada motor un grupo reductor pequeño, como podemos observar en la Figura 2.28. Un modelo más avanzado sería el de la rueda motorizada.

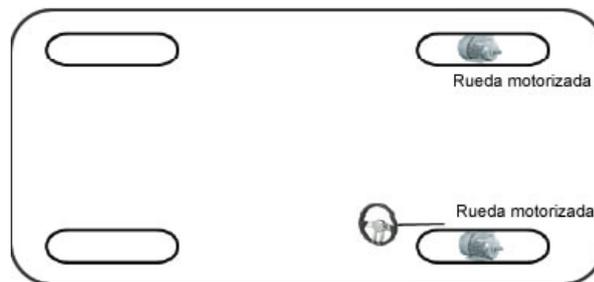


Figura 2.28 Sistema de transmisión con rueda motorizada. (Dani meganeboy, 2017)

La mayoría de los vehículos llevan una transmisión con grupo reductor y diferencial, como son el Renault Zoe, Mitsubishi i-MiEV, BMW i3 y el Tesla Model S (Figura 2.29), estos dos últimos de tracción trasera.

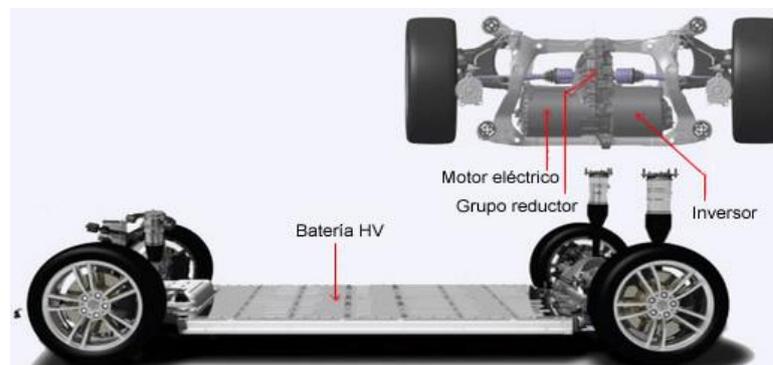


Figura 2.29 Esquema del sistema mecánico y eléctrico del Tesla Model S. (Dani meganeboy, 2017)

Otro referente es Nissan con su Leaf, que en este caso opto por un grupo reductor conectado directamente al motor. Esto se puede observar en la Figura 2.30.



Figura 2.30 Detalle del sistema eléctrico y del grupo reductor del Nissan Leaf. (Dani meganeboy, 2017)

2.2.3 Mantenimiento:

Respecto al mantenimiento de estos tipos de vehículos hay puntos similares a los vehículos de combustión, como pueden ser cambiar los neumáticos cuando la banda este por debajo de los 1,6 mm y cambiar el líquido de frenos cada 40.000-50.000 km, y revisar las pastillas y discos de freno. En estos vehículos al dotarse de frenado regenerativo, las pastillas de freno duraran mucho más.

Se aconseja cambiar el filtro de aire del habitáculo sobre los 10.000-15.000 km. Además como novedad en estos tipos de vehículos se recomienda revisar el nivel de líquido de refrigerante de las baterías por primera vez a los 170.000 km y después cada 120.000 km.

2.3 Prestaciones del vehículo eléctrico:

Los vehículos eléctricos poseen curvas características de par y potencia, que se aproximan bastante a las curvas características de la tracción, no como el vehículo de combustión, como podemos observar en la Figura 2.31.

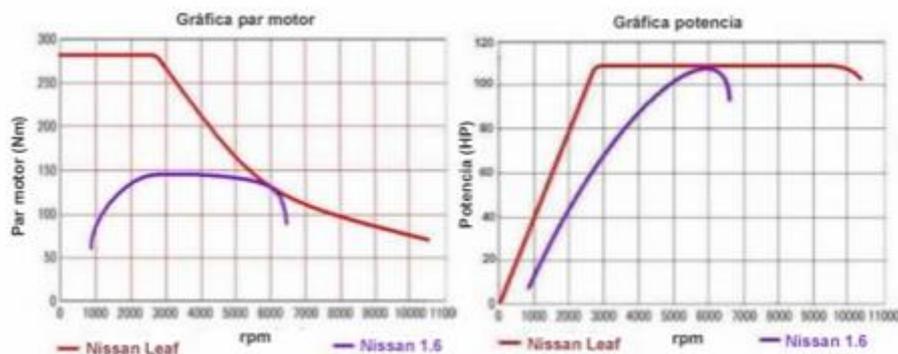


Figura 2.31 Comparación de las gráficas de tracción de un V.C.I y un V.E. (Dani meganeboy, 2017)

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Podemos destacar también otras ventajas del vehículo eléctrico frente al de combustión, como se observa en la Tabla 2.1.

	Vehículo de combustión interna (V.C.I)	Vehículo eléctrico (V.E)
Rendimiento del motor	Menos del 33%	Entre el 80% y el 90%
Radiador(disipador del calor)	Si	No
Característica par-rpm	Plana	Par de arranque elevado
Regulación de par y velocidad	Caja de cambios + embrague(mayor mantenimiento)	Convertidor electrónico (menor mantenimiento)
Consumo en ralentí	Apreciable	Cero
Conversión de energía	Irreversible	Frenado regenerativo
Potencia por peso del motor	0,7 kWh/ kg	5,8 kWh/kg

Tabla 2.1 Comparación de las prestaciones de los V.C.I frente a los V.E. (Alonso Ripoll, 2017)

Vamos a hablar brevemente de las principales prestaciones de los vehículos que se dividen en los siguientes apartados:

- ✓ **Aceleración:** la aceleración es el tiempo que se tarda en llegar a una determinada velocidad. Este parámetro se puede calcular o medirlo experimentalmente probando el vehículo.
En los vehículos de combustión se prueba a máxima potencia, es decir, a la máxima aceleración (Wide Open Throttle, WOT). En el vehículo eléctrico el par máximo lo mantiene constante hasta llegar a la velocidad crítica. Por encima de esta velocidad el par pasa a ser función de la velocidad.

- ✓ **Velocidad máxima:** este es otro dato característico, saber la velocidad máxima de crucero. Se supone que la capacidad de adherencia de los neumáticos es suficiente, por lo que el dato es independiente de las circunstancias.
Al igual que en el caso anterior, se puede calcular teóricamente o experimentalmente. Los vehículos de combustión interna se prueban a máxima potencia y si es eléctrico cuando el motor este desarrollando su máximo par.

- ✓ **Ascenso en pendiente:** es otro dato característico, la capacidad de ascenso o gradeability. Es la máxima pendiente que es capaz de superar un vehículo a velocidad constante.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

En la Figura 2.32a podemos observar la máxima pendiente para cada marcha en función de la velocidad para un vehículo de combustión interna y en la Figura 2.32b lo observamos para un vehículo eléctrico.

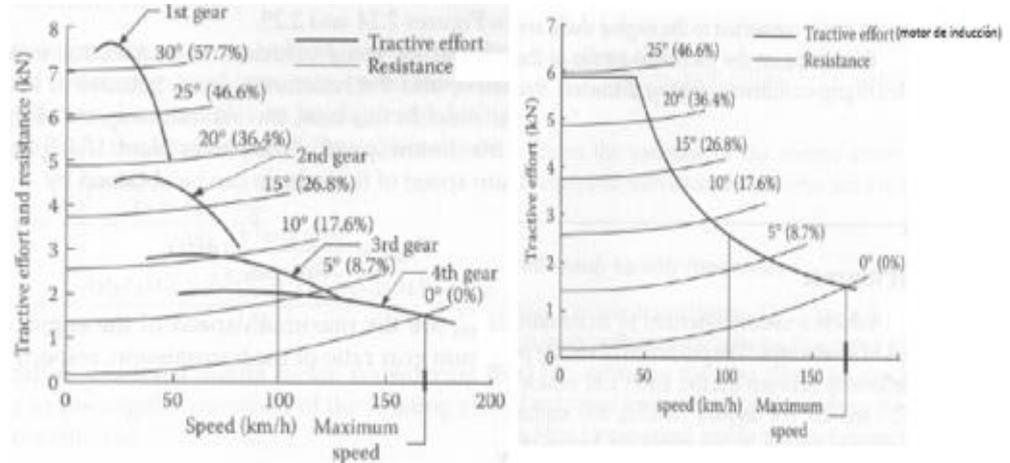


Figura 2.32 Velocidad máxima para distintas pendientes. V.C.I de 4 marchas(a) y V.E (b). (Alonso Ripoll, 2017)

- ✓ Rendimiento: la medida del rendimiento no está normalizada. Pero sabemos que el rendimiento del motor de combustión según el ciclo de combustión que se utilice, suele estar sobre un 40% de máximo, este hecho es debido a las pérdidas de energía en forma de calor. En cambio en un vehículo eléctrico el rendimiento suele estar entre el 80-95%, como podemos observar en la Figura 2.33.

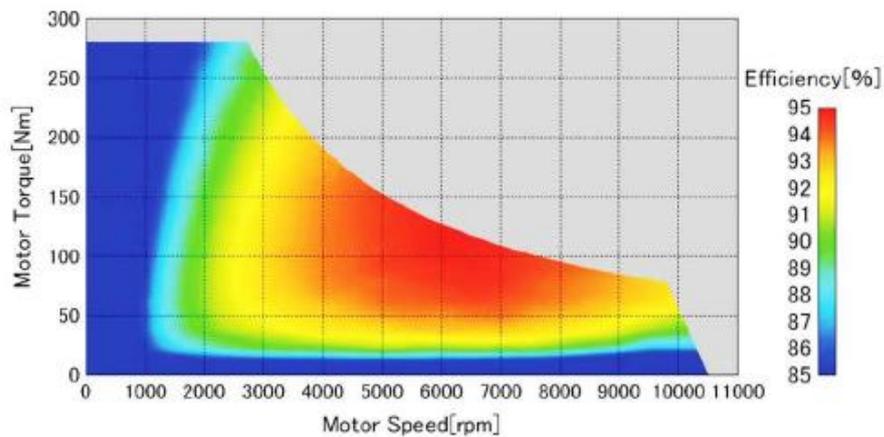


Figura 2.33 Mapa de rendimiento para distintos regímenes de un motor. (Yamaguchi, 2011)

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

- ✓ Autonomía o consumo: este último aspecto nos indica lo que nos va a costar utilizar nuestro vehículo durante los trayectos. En los vehículos de combustión es bastante utilizado la medida de l/km, en cambio en los vehículos eléctricos es la autonomía en km. Podemos destacar el siguiente top diez de coches del mercado con mayor autonomía eléctrica, en la Tabla 2.2.

Marca y modelo	Autonomía
Tesla Model S P100D	613 km
Tesla Model X P100D	542 km
Renault ZOE	400 km
BMW i3	300 km
Hyundai Ioniq Electric	280 km
Nissan Leaf	250 km
Kia Soul EV	212 km
Mercedes-Benz B 250e	200 km
Volkswagen e-Golf	190 km
Renault Kangoo Z.E.	170 km

Tabla 2.2 Autonomía de los vehículos eléctricos actuales. (Elaboración propia)

3 Ciclos de conducción:

Se han observado noticias de algunas revistas del automóvil en las cuales hay distintos valores de autonomía según donde se vayan a comercializar los vehículos. Esto es debido a los ciclos de conducción, que son unas pruebas estandarizadas que se deben de realizar a los vehículos con el fin de averiguar su comportamiento, sobre todo de cara a consumos, emisiones y autonomía. No obstante, la estandarización de estas pruebas no se da a nivel mundial produciéndose la disparidad de resultados debido a la variedad existentes de estos ciclos, dependiendo del lugar donde se vayan a homologar.

Estas pruebas tienen en común que se realizan en naves bajo unas condiciones de temperatura y kilometraje estipulado, así como una velocidad de viento nula. El vehículo rodara sobre unos rodillos que quieren asemejar el rozamiento producido por las ruedas con el pavimento.

A continuación vamos a ir describiendo las particularidades de cada ciclo de conducción, como son el ciclo europeo, japonés y americano.

3.1 Ciclo NEDC:

Este ciclo NEDC (New European Driving Cycle) o ciclo europeo se utiliza en Europa, aunque está en proceso de sustitución como indicaremos más adelante.

Consiste en hacer rodar el vehículo sobre un banco de rodadura que esta calibrado según la masa del vehículo, bajo una escala de 22 niveles. El vehículo deberá poseer un kilometraje comprendido entre los 3.000 a los 15.000 kilómetros y permanecerá en un local con una temperatura entre los 20 a 30°C, de esta forma nos aseguramos que tanto la temperatura del agua, como la del lubricante no difiera en más de 2°C de la temperatura ambiental.

Este ciclo se divide en dos partes como podemos observar en la Figura 3.1. La primera parte se simula un ambiente con un tráfico urbano y un arranque en frío. Estará durante 40 segundos en ralentí, y a continuación se repetirá el ciclo, de forma que se realice cuatro veces en total. Durante esta primera parte nunca se sobrepasaran los 50 km/h, y se recorrerán 4,052 kilómetros durante 195 segundos.

La segunda parte consiste en simular una conducción extraurbana, en la cual se recorrerá unos 6,955 kilómetros durante 400 segundos sin sobrepasar nunca los 120 km/h.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

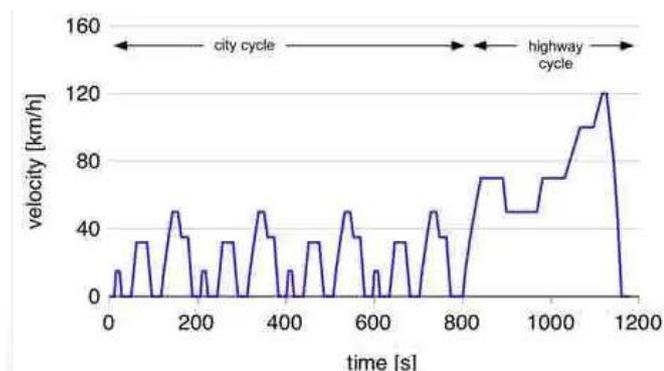


Figura 3.1 Gráfico velocidad-tiempo del ciclo NEDC. (Foro coches, 2015)

3.2 Ciclo Japonés:

El ciclo Japonés o ciclo 10-15 es muy similar al ciclo tratado anteriormente y también se divide en dos partes, aunque añade una fase introductoria para que el motor alcance una temperatura adecuada. Esta fase introductoria es la realización de un ciclo 15, en el cual no se realiza ninguna medida.

Después de esta fase introductoria se da paso a la realización de la primera parte que consiste en realizar el ciclo 10 tres veces en total. Este ciclo 10 intenta simular un entorno urbano congestionado con paradas, tramos de velocidad constante, aceleraciones y deceleraciones. Este ciclo dura 135 segundos con una velocidad máxima y media de 40 km/h y de 17,7 km/h, respectivamente.

La última parte es la realización de un ciclo 15 que es la simulación de una carretera interurbana, en la cual apenas hay momentos en los que el vehículo este en ralentí, salvo al principio. Y se mantendrá una velocidad mínima de 40 km/h y una máxima de 70 km/h, durante un periodo de 251 segundos. Se puede observar el desarrollo del ciclo en la Figura 3.2.

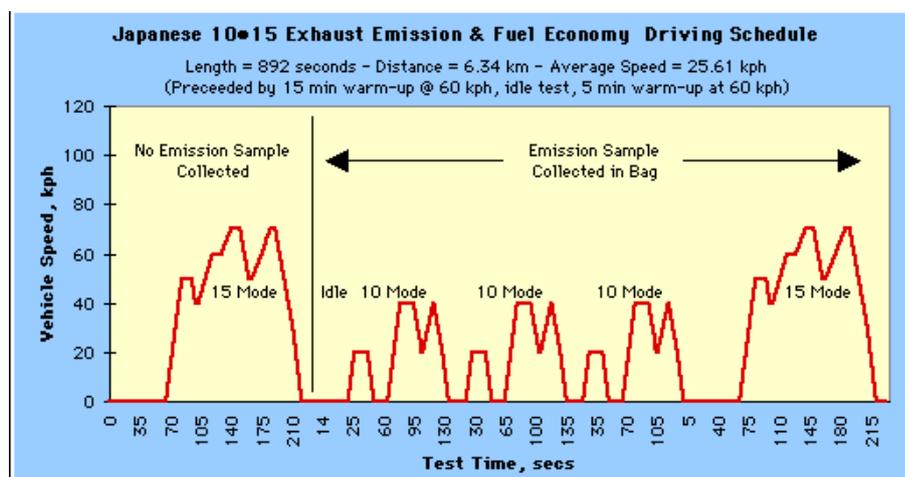


Figura 3.2 Gráfica velocidad-tiempo para el ciclo 10-15. (EPA, 2017)

3.3 Ciclo WLTP:

El ciclo europeo o NEDC era conocido como el ciclo Pinocho, porque este ciclo beneficiaba mucho a los fabricantes de vehículos, ya que arrojaba unos niveles de consumos o autonomía muy buenos, pero inalcanzables en la vida real.

Por este motivo se va a sustituir como habíamos indicado antes por el WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Test Producer). Este ciclo será implementado como sustitución no solo del ciclo europeo, sino también del ciclo Japonés.

Este ciclo está compuesto de 4 secciones, que se divide según la velocidad en baja, media, alta y muy alta, tal y como podemos observar en la Figura 3.3.

Este nuevo ciclo entro en vigor el 1 de Septiembre del 2017 para los nuevos vehículos, y será obligatorio a partir del 1 de Septiembre de 2018 y bajo el marco del RDE, para cualquier vehículo.



Figura 3.3 Grafica velocidad-tiempo para el ciclo WLTP. (Jmcc500, 2017)

Podemos destacar las principales diferencias respecto al ciclo NEDC son las siguientes:

- ✓ Temperatura: este ciclo se realiza a una temperatura de 14°C, que es más real que los 20-30°C del NEDC.
- ✓ Distancia: se realiza un ciclo más largo de 23 kilómetros frente a los 11 kilómetros del NEDC.
- ✓ Tiempo: el tiempo en el cual el vehículo está parado se reduce en el WLTP, aunque el tiempo total es más duradero que el NEDC, 30 minutos frente a 20 minutos de duración del ciclo.
- ✓ Velocidad: la velocidad máxima se aumenta hasta llegar a los 131 km/h, al igual que la velocidad media.
- ✓ Equipamiento: en este nuevo ciclo el equipamiento opcional se tiene en cuenta en el peso y la aerodinámica.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Como punto negativo que comparte con el ciclo NEDC es que el equipo auxiliar del vehículo como son luces, radio, sistema de climatización, entre otros, estará apagado.

3.4 Ciclo Americano:

En Estados Unidos el organismo que lleva a cabo este ciclo es la EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE.UU), este ciclo se denomina FTP-75, fue el sustituto del antiguo FTP-72. Se puede observar en la Figura 3.4.

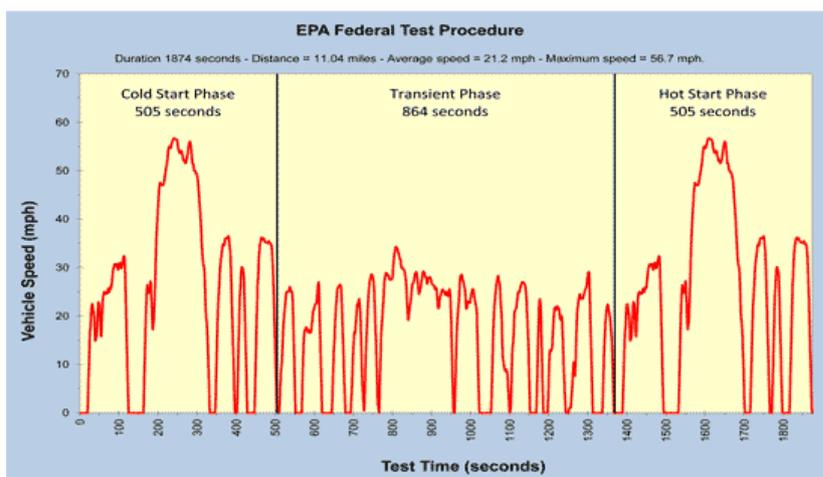


Figura 3.4 Grafica velocidad-tiempo para el ciclo FTP-75. (EPA, 2017)

Este ciclo se lleva a cabo durante 1.883 segundos, en los cuales se recorren 11,04 millas (17,77 km), y en el cual no se supera la velocidad de 55 mph (88 km/h). La velocidad media en este ciclo es de 21,2 mph (34 km/h). Las emisiones son recogidas en unas bolsas de teflón para su análisis.

La fase extraurbana simula el rodaje en carreteras y autopistas, se lleva a cabo durante 776 segundos. En este tiempo hay aceleraciones, desaceleraciones y periodos de velocidad constante sin superar nunca las 60 mph (95 km/h), como podemos observar en la Figura 3.5.

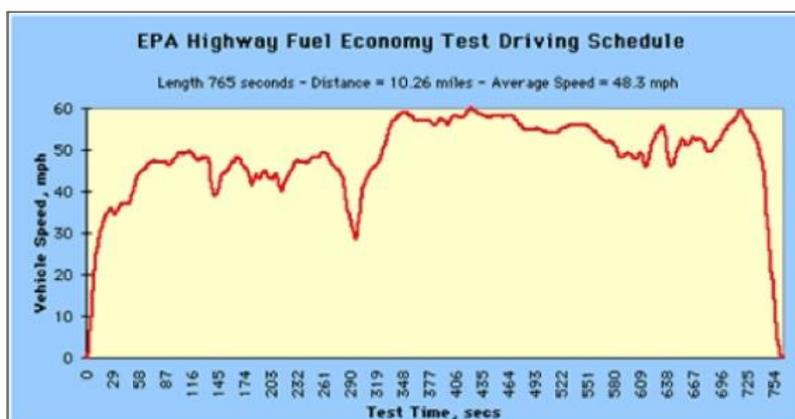


Figura 3.5 Grafica velocidad-tiempo del ciclo de fase extraurbana. (EPA, 2017)

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

A partir del año 2000 se añadieron dos ciclos más para suplir las deficiencias que tienen los ciclos nombrados anteriormente. Estos son los ciclos US06 y el ciclo SC03, se puede observar en la Figura 3.6.

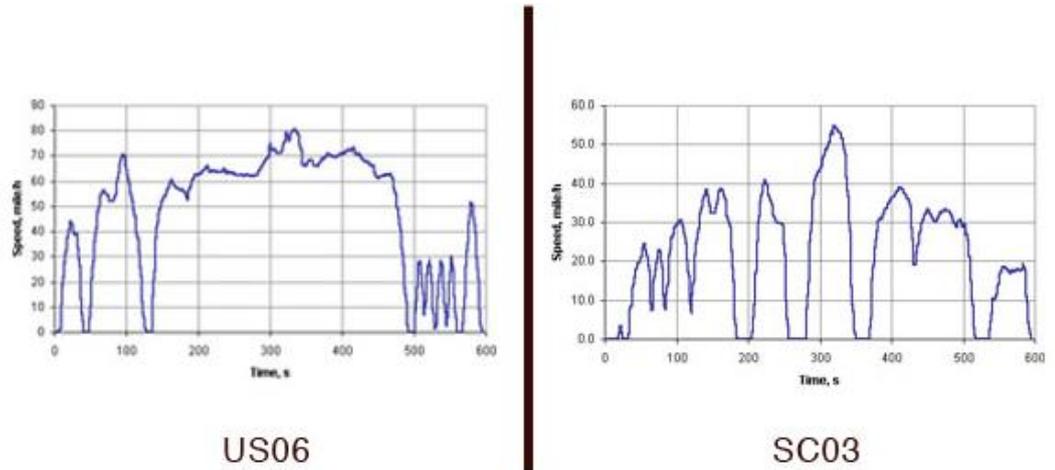


Figura 3.6 Graficas velocidad-tiempo para los ciclos US06 y SC03. (Salva_malprtida, 2012)

El ciclo US06 consiste en realizar una ruta de 8,01 millas (12,8 km) durante un tiempo de 596 segundos, en la cual se simulara una conducción agresiva como complemento al ciclo FTP. En este ciclo se realiza sin superar la velocidad máxima de 80,3 mph (129,2 km/h) y una velocidad promedio de 48,4 mph (77,9 km/h).

El ciclo SC03 se realiza durante una ruta de 3,6 millas (5,8 km) con una duración de 596 segundos, en la cual se tiene en cuenta el efecto del uso del aire acondicionado. En ningún momento del ciclo se superan los 54,8 mph (88,2 km/h) y se mantiene una velocidad promedio de 21,6 mph (34,8 km/h).

4 Baterías de tracción:

4.1 Introducción:

Una batería eléctrica es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química a energía eléctrica mediante reacciones químicas. Consta de una o varias celdas.

El uso del Litio en las baterías nos ha permitido conseguir altas energías específicas, alta eficiencia, la eliminación del efecto memoria, la ausencia de mantenimiento y la mayor facilidad para la eliminación de los residuos de Ion-litio. Estas baterías que están constituidas por litio disponen del doble de densidad energética que las baterías de Níquel-Cadmio, con un tamaño un tercio menor. Pero a pesar de estas ventajas también posee desventajas como son su alto coste de producción, aunque se va reduciendo éste, son frágiles, pueden explotar por el sobrecalentamiento y deben de ser almacenadas con mucho cuidado, tanto por la necesidad de un ambiente frío como que deban poseer algo de carga. Aun después de todo esto, las baterías de Ion-Litio son la mejor elección hoy en día para montar en el vehículo eléctrico.

En este apartado vamos a hablar de unos conceptos, que son interesantes describir previamente:

- ✓ Densidad energética: es la cantidad de energía que es capaz de almacenar una batería en relación con su peso, se mide en vatios-hora por kilogramo (Wh/kg). Es un parámetro importante de cara al vehículo eléctrico, ya que influirá en su autonomía y prestaciones. En las baterías de nueva generación disponibles para el vehículo eléctrico tienen unos valores de este parámetro comprendidos entre 100 a 150 (Wh/kg).
- ✓ Potencia específica: es la potencia que se puede obtener por cada kg de batería, se expresa en vatios por kilogramo (W/kg). Esta potencia viene influenciada por la temperatura y las pérdidas energéticas.
- ✓ Eficiencia de carga/descarga: es la relación entre la energía introducida en la recarga y la que realmente se entrega. Una batería moderna suele tener una eficiencia del 90%, el resto se pierde por el calor de las reacciones químicas.
- ✓ Ciclos de vida: las baterías recargables suelen perder capacidad con las respectivas cargas y descargas. Estos valores son aproximados, ya que varían según el fabricante y las reacciones químicas.
- ✓ Velocidad de recarga: es el tiempo necesario para la recarga de la batería, se suele dar el tiempo de recarga hasta el 80%, debido a que es el más práctico y representativo.

4.2 Tipo de baterías:

4.2.1 Baterías de Plomo-Acido:

Es una batería húmeda, muy usada en los vehículos con motor de combustión. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y dentro del recipiente se dispone de un conjunto de placas de plomo dispuestas de manera alterna, según sea su polaridad positiva o negativa, tal y como se puede ver en la Figura 4.1. Estas placas están recubiertas de dióxido de plomo (PbO_2) las placas positivas y de plomo esponjoso las placas negativas.

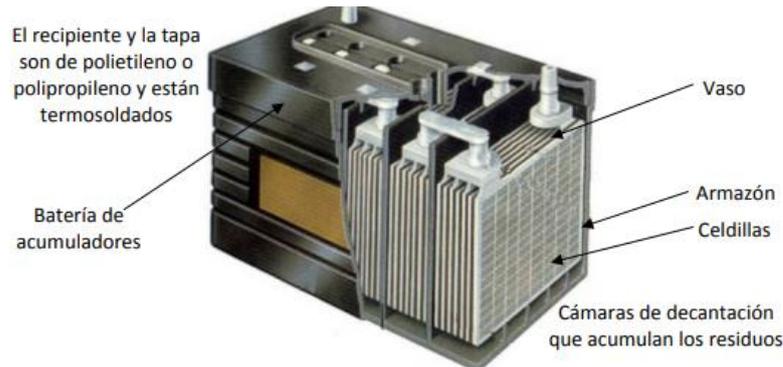
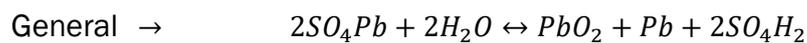
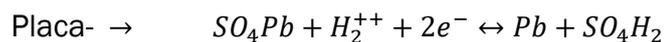
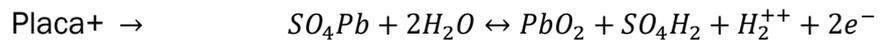


Figura 4.1 Componentes de una batería de Pb-Ácido. (Alonso Ripoll, 2017)

En la batería tiene lugar la siguiente reacción:

Descarga ↔ Carga



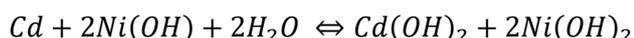
Como ventajas del uso de estas baterías están la alta potencia, el comportamiento seguro y fiable y su bajo precio. Pero por contrapartida tiene como inconvenientes la baja energía específica, el mal comportamiento en frío y su corto periodo de vida útil, además de un considerable peso. Por estos motivos tecnológicos y por motivos de seguridad, ya que en la autodescarga de la batería puede producir hidrógeno que es explosivo y por la toxicidad del plomo, sea obviado su uso en el vehículo eléctrico. Podemos observar algunas características de este tipo de baterías en la Tabla 4.1.

BATERIAS PLOMO-ACIDO	
Ánodo	Plomo esponjoso
Cátodo	Dióxido de plomo(PbO ₂)
Electrolito	Ácido sulfúrico disuelto en agua
Energía específica	33-42 Wh/kg
Densidad energética	60-110 Wh/l
Eficiencia carga/descarga	50-95 %
Velocidad de autodescarga	3-20 %/mes
Durabilidad	500-800 ciclos
Potencia específica	180 W/kg

Tabla 4.1 Característica de las baterías Plomo-Ácido. [Elaboración propia]

4.2.2 Baterías de Níquel-Cadmio:

Estos tipos de baterías están formadas por un cátodo de hidróxido de níquel, un ánodo de cadmio y un electrolito de hidróxido potásico. Actualmente están en desuso debido a la toxicidad que genera el cadmio. En su interior tiene lugar la siguiente reacción:



Este tipo de baterías posee como ventajas que la pérdida de electrolito es más difícil de suceder que en las baterías normales, dispone de una resistencia interna muy baja y una caída de tensión al ciclo de descarga casi nula. Respecto a las desventajas posee una tensión de celda más baja que las demás, no se pueden cargar a una carga constante, esto es debido a sus características de resistencia y tensión que hablamos antes, y por ultimo como dijimos su toxicidad. Se pueden observar las características en la siguiente Tabla 4.2.

BATERIAS NÍQUEL-CADMIO	
Ánodo	Cadmio
Cátodo	Hidróxido de níquel
Electrolito	Hidróxido de potasio
Energía específica	40-70 Wh/kg
Densidad energética	50-150 Wh/l
Eficiencia carga/descarga	70-90 %
Velocidad de autodescarga	10 %/mes
Durabilidad	2.000 ciclos
Potencia específica	150 W/kg

Tabla 4.2 Características de las baterías de Níquel-Cadmio. [Elaboración propia]

4.2.3 Baterías de Níquel-Metal hidruro:

Es un tipo de batería que usa como ánodo hidróxido de níquel, al igual que en la batería que tratamos anteriormente, pero en este caso el cátodo es una aleación de hidruro metálico, la cual almacenará hidrógeno. Se puede observar el proceso de descarga en la Figura 4.2.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

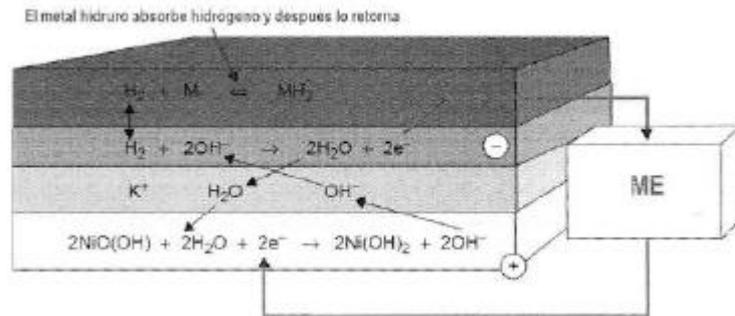


Figura 4.2 Reacciones durante la descarga de una batería de Níquel-MeH. (López Martínez, 2015)

Tiene como ventaja respecto a la anterior que no utiliza cadmio, que es un material que es caro y contaminante. Además posee un menor efecto memoria y una mayor capacidad a igualdad de tamaño y peso. Pero a pesar de todo esto tiene como desventajas la menor eficiencia, bajo rendimiento a temperaturas bajas y una mayor tasa de autodescarga. Pese a ser una batería con muy buenas características de longevidad, por lo tratado anteriormente no se utiliza en vehículos puramente eléctricos. Podemos observar algunas características en la Tabla 4.3.

BATERIAS NÍQUEL-METAL HIDRURO	
Ánodo	Oxihidroxido de níquel(NiOOH)
Cátodo	Aleación de hidruro metálico
Electrolito	-----
Energía específica	60-120 Wh/kg
Densidad energética	140-300 Wh/l
Eficiencia carga/descarga	66 %
Velocidad de autodescarga	-----
Durabilidad	500-2.000 ciclos
Potencia específica	250-1.000 W/kg

Tabla 4.3 Características de las baterías de Níquel-MeH. [Elaboración propia]

4.2.4 Baterías de Litio:

Vamos a hablar en este apartado sobre los distintos tipos de baterías que hay de Ion-Litio que están disponibles en el mercado actualmente.

4.2.4.1 Baterías LCO (LiCoO_2):

Estos tipos de baterías son las que se han utilizado siempre en cámaras digitales, ordenadores portátiles y teléfonos móviles, entre otros dispositivos. Están formadas por un electrolito de litio y electrodos de litio, cobalto y oxido. El ánodo suele ser un material poroso derivado del carbón, principalmente el grafito.

El LiCoO_2 posee una estructura bidimensional, está formada por capas de óxido de cobalto en las cuales están incluidos los iones de Litio, tal y como se puede observar en la Figura 4.3.

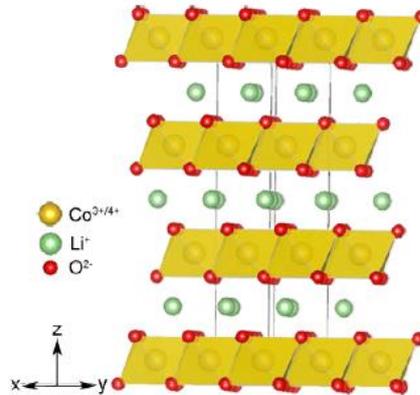
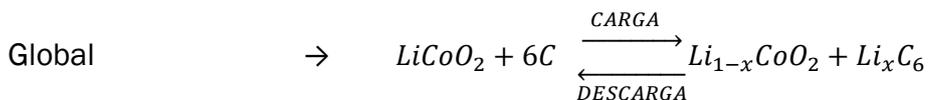
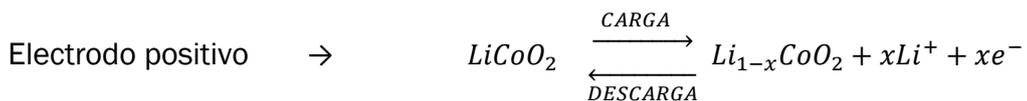
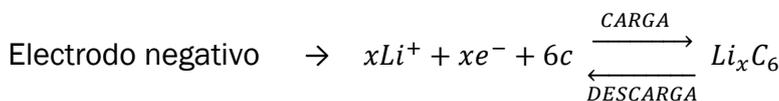


Figura 4.3 Estructura química de LCO. (Brant, 2014)

El proceso químico que tiene lugar en el interior de la batería durante la carga consiste en que el electrodo negativo es reducido electroquímicamente, por lo cual los iones de litio se introducen en el interior de la estructura del grafito.

Durante la descarga ocurre el proceso inverso, es decir, los iones de litio abandonan el grafito para volver al electrodo positivo, esto se puede observar en las siguientes reacciones:



Hay que tener la precaución de no cargar en exceso estas baterías, ya que se pueden dañar (problema de dendrita), lo que causaría una pérdida de la capacidad y menor duración del ciclo de vida. Hay que tener en cuenta que el riesgo de explosión es mayor por la presencia del cobalto.

4.2.4.2 Baterías LMO (LiMn_2O_4):

Esta batería comparte con la que hemos visto anteriormente, el uso del grafito como ánodo. Posee mejores características frente a seguridad y estabilidad térmica que las baterías LCO, por lo que las hacen idóneas para la implementación en vehículos tanto eléctricos como híbridos.

Esta batería presenta una estructura formada por óxido de manganeso y litio en forma de espinela, como se puede observar en la Figura 4.4. Esta estructura posee una resistencia eléctrica baja, lo que favorece la circulación de corriente.

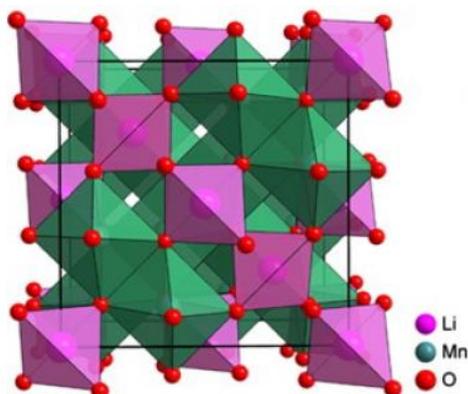
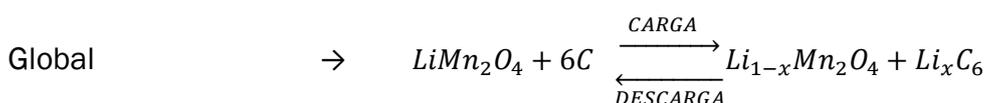
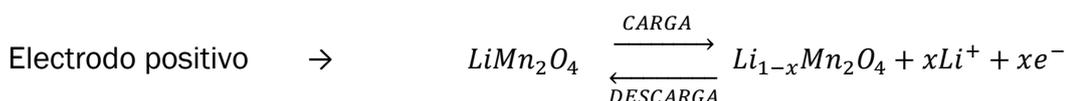
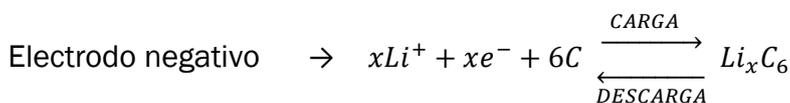


Figura 4.4 Estructura química de las baterías LMO. (Brant, 2014)

En esta batería el proceso químico que tiene lugar durante la carga, es que los iones de litio abandonan el cátodo para pasar al ánodo de grafito a través del electrolito. En la descarga sucede el proceso inverso, los iones pasan del ánodo al cátodo, y una vez en este se combinan con el LiMn_2O_4 . Este proceso se puede observar en la siguiente reacción.



4.2.4.3 Baterías LFP (LiFePO_4):

Son parecidas a las baterías LCO, pero estas no utilizan cobalto, lo que las dota de una mayor estabilidad y seguridad de uso que las primeras. Debido a su estructura posee una resistencia electroquímica baja, lo que se traduce en que permite unos ciclos de vida más largo, aunque se la introduzcan altas corrientes de carga y descarga. Podemos ver su estructura química en la Figura 4.5.

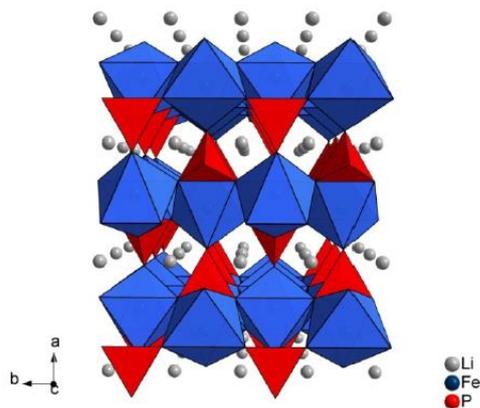


Figura 4.5 Estructura química de las baterías LFP. (Molenda & Molenda, 2011)

Las ventajas que posee respecto a las anteriores baterías que hemos visto, es que posee una mayor vida útil con la posibilidad de introducir valores altos de intensidad, esto es debido a que posee un ánodo de $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ en vez del grafito de las baterías LCO y LMO. Como inconvenientes a destacar es que posee una baja tensión de celda, una mayor tasa de autodescarga y un precio más elevado.

4.2.4.4 Baterías LPO (Litio-Polímero):

Al principio cuando se empezaron a utilizar no tenían aplicaciones útiles debido a su baja conductividad eléctrica a temperatura ambiente, pero con el paso del tiempo se fueron consiguiendo mejorar todos estos inconvenientes.

Las actuales baterías de este tipo son las que poseen mejores valores de energía y potencia del conjunto de baterías de litio. Además son más eficientes, más ligeras, no poseen efecto memoria y más seguras, una gran ventaja en caso de sufrir un accidente con el vehículo. Ya que el litio se intercala con el electrodo de carbón, y al estar en forma iónica es menos reactivo que el litio metal. Como desventajas podemos resaltar su alto coste y su bajo ciclo de vida, lo que las hace poco usuales.

4.2.5 Futuro de las baterías:

En este apartado vamos a hablar sobre la investigación que se está llevando a cabo en el ámbito de las baterías y su futuro.

4.2.5.1 Baterías de Litio-Azufre:

Estas baterías fueron desarrolladas por la universidad de Cambridge, aunque están en pruebas, según los estudios podrán llegar a poseer una energía específica superior a 350 Wh/kg y una densidad de energía 10 veces superior. Como inconveniente es que esta batería está formada por grafeno, que es un material que se está estudiando y de momento es caro.

Cuando una batería de este tipo se descarga, el cátodo absorbe el litio que posee el ánodo. Esta iteración hace que las moléculas de azufre se transformen en unas cadenas, que son llamadas poli-sulfuros. Tras numerosos ciclos de carga-descarga, la reacción comienza a degradar el cátodo por el desprendimiento de las cadenas. Estas cadenas entran en el electrolito de la batería y se unen a los dos electrodos. Cuando este fenómeno sucede, la batería comienza a degradarse por la pérdida de material activo. Cabe destacar que posee una buena tolerancia a sobrecargas y ausencia del efecto memoria. Podemos observar en la Figura 4.6 su estructura.

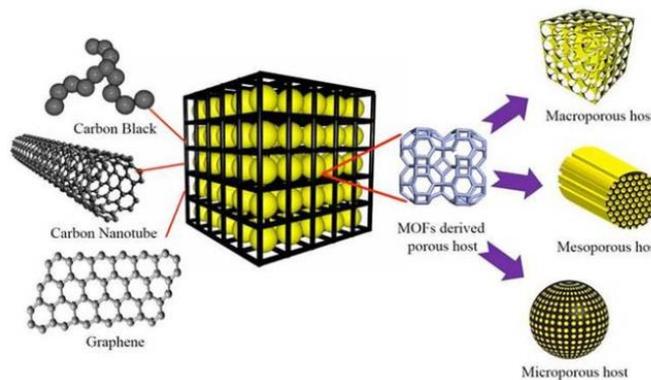


Figura 4.6 Estructura de una batería de Litio-Azufre. (Sanchez Criado, s.f.)

4.2.5.2 Baterías de Litio-Metal:

Estas baterías están siendo utilizadas actualmente en dispositivos móviles, debido a que son más pequeñas con los mismos valores de energía específica, y en este campo se tiende a la miniaturización de componentes.

Respecto a su uso en vehículos de momento no está implantado, pero tiene buenas características debido a su reducción de peso. Hay una propuesta de Licerion de Sion Power de una batería para automóvil de 400 Wh/kg. Como inconveniente al igual que la anterior es que dependemos del grafeno.

4.2.5.3 Baterías de estado sólido:

Todas las marcas están investigando sobre ellas, y se estima que en el 2.020 podrán llegar a dispositivos electrónicos y 5 años después en los vehículos eléctricos, aunque según Toyota sacara un vehículo con estas baterías en 2.022.

Consiste en un electrolito cristalizado y en sodio metal, esto hace que sea una batería más barata y con mayor capacidad. Se puede ver sus diferencias con las baterías de Ion-Litio en la Figura 4.7.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

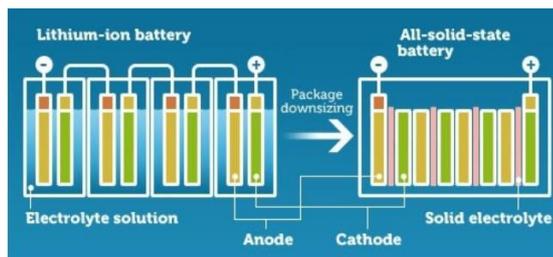


Figura 4.7 Comparación entre las baterías de Litio-ion y las baterías de estado sólido. (Fernández, 2017)

Se espera que puedan llegar a unos valores de energía específica de 650 Wh/kg y de densidad específica de 1.200 Wh/l. Algunas ventajas a mayores que poseen son que se recarga rápido, mayor ciclo de vida, no se calientan mucho, casi nulo riesgo de incendio y buenas características respecto a la pérdida de carga a temperaturas ambientales bajas.

4.2.6 Conclusiones:

Como se ha observado en estos apartados las baterías descritas suelen ser de litio, manganeso o cobalto como hace LG Chem para Renault, Chevrolet y Volkswagen, entre otros. Otra variación es sustituir el manganeso por aluminio como hace Panasonic para Tesla. Podemos ver una comparación de estos tipos de batería en la Tabla 4.4.

TIPO	Litio-Cobalto $\text{LiCoO}_2(\text{LCO})$	Litio-Manganeso $\text{LiMn}_2\text{O}_4(\text{LMO})$	Litio-Fosfato $\text{LiFePO}_4(\text{LFP})$	Litio-polímero
VOLTAJE	3,60 V	3,80 V	3,30 V	3,70 V
LIMITE DE CARGA	4,20 V	4,20 V	3,60 V	4,3 V
CICLOS DE VIDA	500-1.000	500-1.000	1.000-2.000	>1.000
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	Medio	Medio	Bueno	30-40°C
ENERGÍA ESPECIFICA	150-190 Wh/kg	100-135 Wh/kg	90-120 Wh/kg	130-200 Wh/kg
TEMPERATURA MÁXIMA	150°C (302°F)	250°C (482°F)	270°C (518°F)	—
FECHA DE FABRICACIÓN	1994	1996	1999	1995
FABRICANTES	Sony, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem, Samsung, Hitachi, Toshiba	Hitachi, Samsung, Sanyo, GS, Yuasa, LG Chem, Toshiba, Moli Energy, NEC	A123, Valence, GS, Yuasa, BYD, JCI/Saft, Lishen	VBPowe, J&a, PRO-POWER, VARTA, ITATOOLS
OTRA INFORMACIÓN	Alta energías específica y Baja potencia	Alta potencia, Buena energía específica.	Alta descarga	—

Tabla 4.4 Comparación de las baterías de Litio. [Elaboración propia]

4.3 Cuidado y envejecimiento de las baterías:

4.3.1 Cuidado de baterías:

Respecto al cuidado de las baterías se aconseja que se realicen siempre que sea posible recargas lentas y no sobrepasando el 80% de la capacidad durante la recarga. Solo se cargara la batería más allá del 80%, cuando vayamos a ir de viaje, ante alguna emergencia o el vehículo vaya a estar parado demasiado tiempo, debido a la autodescarga. Dejar la batería llena es tan problemático como dejarla vacía, por eso se tiene que intentar que el nivel de esta no baje recomendablemente del 20% y que como máximo no baje más del 15% de la capacidad de la batería.

Como se ha dicho antes se desaconseja el uso de la recarga rápida, ya que su uso abusivo podría provocar que la vida útil de la batería se reduzca hasta un 1% anual.

A la hora de aparcar un coche eléctrico también se hacen las siguientes recomendaciones. Si vas a estacionar en días en los cuales el clima es adverso, tanto por altas como por bajas temperaturas, se recomienda dejar el coche conectado para que de esta forma pueda funcionar el sistema de refrigeración constantemente y proteja la batería. Por ejemplo, en un día de verano se recomienda dejar el coche en un lugar sombrío o garaje, y que entre en funcionamiento el climatizador para el habitáculo y el sistema de refrigeración para la batería.

En el caso de que se vayan a realizar estacionamientos largos, es aconsejable dejar el vehículo conectado para que se mantenga la batería en su punto óptimo. En el caso de que no se disponga de este sistema se aconsejan los siguientes puntos:

- ✓ Aparcar en lugares frescos, en los que hay una temperatura más o menos estable.
- ✓ Si está disponible utilizar la recarga lenta, ya que de esta forma se dejara la batería entorno al 60%.
- ✓ Antes de arrancar el coche se tendrá que poner a cargar, si el nivel de batería se ha reducido un 20 % de su capacidad.
- ✓ Si el coche estuvo parado más de tres meses, se deberá cargar el vehículo entre 2 a 3 veces al 80%, así de esta forma conseguiremos equilibrar las cargas.

4.3.2 Envejecimiento de baterías:

Respecto al envejecimiento de baterías no hay datos fiables de tasas de degradación, lo que sobre todo hay son estudios llevados a cabo por las empresas y las experiencias de sus clientes.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Hay un estudio llevado a cabo por un grupo de usuarios de Tesla en Bélgica y Holanda, en el cual se analizó el comportamiento de 286 Tesla Model S en todo el mundo, con el objetivo de analizar la degradación de sus batería. Se observa en la Figura 4.8 que a los 80.000 kilómetros, de media sea perdido un 7% de capacidad. Se puede observar que hay una gran disparidad de resultados, esto es debido al tipo de conducción y a la forma de recarga de estas baterías. También se observa que con el paso del tiempo, parece que la degradación es menor y se estabiliza sobre un 2%.

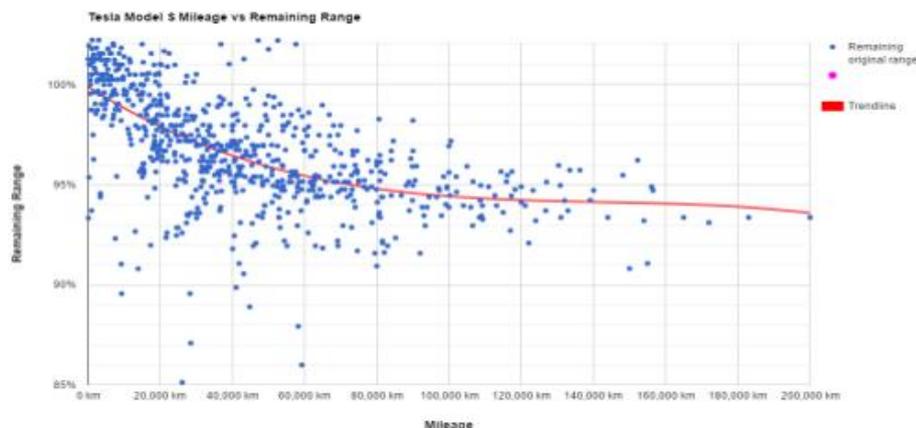


Figura 4.8 Degradación experimental de la batería de Tesla frente a los kilómetros. (Noya, 2016)

Según Elon Musk, director de Tesla, en un estudio llevado a cabo en el laboratorio sobre una celda ha arrojado que a los 805.000 kilómetros mantiene el 80 % de su capacidad inicial. Por lo que se puede ver la degradación de las celdas 18650 es muy lenta, perdiendo solo un 1 o 2 % de su capacidad. Se puede observar los resultados de este estudio en la Figura 4.9.



Figura 4.9 Degradación en laboratorio de la batería de Tesla según el número de ciclos realizados. (HYE, 2018)

Por ultimo podemos destacar la experiencia de un taxista finlandés, el cual después de 400.000 kilómetros, la capacidad de la batería solo se ha visto reducida un 7%. También destaca que al principio tuvo problemas con el motor y el pack de baterías, pero una vez que Tesla llevo a cabo el cambio de estos, no hubo más problemas.

4.4 Sustitución de baterías:

Como evolucionara el precio de las baterías es una gran incógnita para todo el mundo, debido a esto los fabricantes dan distintas opciones de cara a la adquisición o alquiler de estos productos. Por ejemplo podemos destacar los siguientes:

- ✓ Nissan: te da la posibilidad de comprar una batería totalmente nueva por unos 5.500\$ (5.193€), este precio ya tiene incluido impuestos y el descuento de 1.000\$(944€), por quedarse con la batería antigua.
- ✓ Tesla: te ofrece también la posibilidad de comprar un pack de baterías de 85 kWh que son las que lleva el Tesla Model S por unos 9.200€, y los packs de 60 y 45 kWh por 7.600€ y 6.080€, respectivamente. Estos precios son a ocho años vista, es decir, tú pagas el paquete ahora y si dentro de 8 años te falla la batería. Te diriges a Tesla y te la cambian, volviéndote a dar la garantía del pack de 4 años o 80.000 kilómetros.
- ✓ Renault: esta última propuesta contemplada posee dos opciones, la compra o el alquiler de la batería. Si se alquila tienes la ventaja de que no pagas el coste íntegro de la batería, por lo cual es más competitivo y posees una garantía casi ilimitada. Todos estos aspectos se pueden ver más detalladamente en las Tablas 4.5 y 4.6.

Batería	Alquiler	Compra
Precio	Compra del ZOE + alquiler de batería	Compra del ZOE+7.500€ impuestos incluidos(aprox.)
Propiedad batería	Renault	Cliente
Garantía batería	<ul style="list-style-type: none"> • Duración y kilometraje: ILIMITADOS. • Sustitución de la batería con una capacidad < 75% 	<ul style="list-style-type: none"> • 8 años/160.000 km • Sustitución de la batería con capacidad < 66%
Asistencia gratuita en caso de avería	Duración de kilometraje ilimitado: <ul style="list-style-type: none"> • Cualquier tipo de avería (incluida la descarga total de la batería en circulación). 	Según garantía del vehículo.
Avería de la batería	<ul style="list-style-type: none"> • Sustitución “estándar” por una nueva batería. • Préstamo de un vehículo de cortesía. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reparación. • Préstamo de un vehículo de cortesía.
Reciclaje	<ul style="list-style-type: none"> • Tanto si es comprador como alquilado, Renault se encarga del reciclaje de la batería. • Para el cliente es un beneficio del 100 % en comodidad. • Para el medio ambiente, esto es una garantía de protección. 	

Tabla 4.5 Opciones para el alquiler/compra de baterías del ZOE. (Viñuela, 2017)

	ZOE 22 kWh	ZOE 40 kWh
Z.E. FLEX	59 €/mes - 7.500 km/año + 10 €/mes por cada 2.500 km/ año adicionales	59 €/mes - 7.500 km/año + 10 €/mes por cada 2.500 km/ año adicionales
Z.E. RELAX		119 €/ mes kilometraje ilimitado*

Tabla 4.6 Condiciones y precio mensual del alquiler de las baterías del ZOE. (Viñuela, 2017)

En el caso en el que al vehículo haya que cambiarles las baterías, en el caso del Renault Zoe, tendrá que estar de tres a cuatro días en el taller.

4.5 Sistemas de refrigeración de baterías:

El rendimiento de las baterías de los vehículos eléctricos depende de la temperatura a la que estén expuestas, sufren el efecto Goldilocks. Este efecto demuestra que las baterías no funcionan bien a altas temperaturas, debido a que se acorta su vida útil. Por ejemplo, una batería de Plomo-Ácido trabajando a 40°C su vida útil se ve mermada un 40%, respecto a una que trabaje a 25°C. Pero este efecto también demuestra que no trabajan bien tampoco a bajas temperaturas, porque se reduce su capacidad. Una celda que entregue el 100% de su capacidad a 25°C, por lo general a -18°C entregara un 60% de está.

Hay tres formas que son las más usadas para la refrigeración de baterías, que son:

- ✓ Por convención de aire, activa o pasiva: no es el más utilizado debido a que no es capaz de extraer el suficiente calor que generan las baterías.
- ✓ Refrigeración de aceite dieléctrico.
- ✓ Refrigeración a través de agua.

De estos dos últimos sistemas, el más eficaz es por agua, debido a que consigue extraer mucho más calor de las baterías que el aceite.

Otro sistema eficaz de extraer el calor de las baterías, sería a través de unas lengüetas que irían en la parte inferior del pack de baterías. Este sistema es usado por BMW en su modelo i3 y Chevrolet en su Volt. Aunque en estos dos vehículos las lengüetas se sitúan en la parte superior y lateral del pack de baterías, lo que resulta no ser tan óptimo. Además este sistema es complicado, debido a la necesidad de aislar muy bien el pack, para que no se produzcan cortocircuitos.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Otro sistema es el que usa Tesla para el Model S y Model X. Este sistema consiste en un tubo que serpentea alrededor del pack de baterías, el cual va relleno de glicol en agua. Un inconveniente de este sistema es que elimina el calor de las celdas, pero no de las pestañas. Esto quiere decir que como sometamos a una conducción exigente a las baterías, estas se podrán sobrecalentar. Este sistema esta patentado por Tesla y se puede ver su forma en la Figura 4.10.

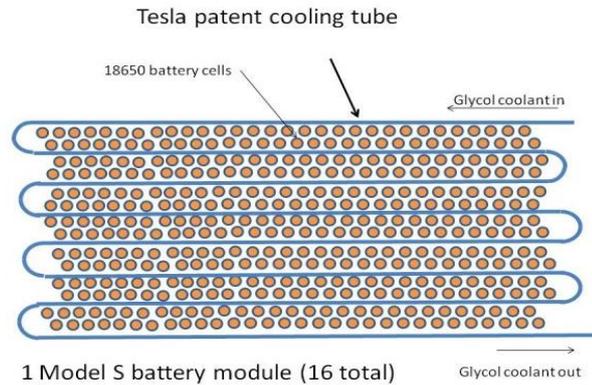


Figura 4.10 Sistema de refrigeración de Tesla. (Fernandez, 2016)

Como conclusión para cerrar este apartado, el sistema más óptimo sería hacer pasar el refrigerante por la batería y enfriarlo en un intercambiador, como el de los vehículos a combustión. A veces se puede optar por un enfriamiento secundario, esto es importante, ya que no es igual conducir en Rusia que en España.

5 Modelo de baterías de Ion-Litio:

Con la llegada al mercado del automóvil de los vehículos híbridos y la vuelta al desarrollo del vehículo eléctrico, es necesario conocer la energía y la carga que poseen las baterías, para poder realizar una estrategia de control adecuada para su funcionamiento. También es interesante controlar el estado de salud o SOH de la batería, de cara a poder mejorar los procesos de carga de las baterías.

Por eso en este capítulo vamos a hablar de los distintos modelos matemáticos que se utilizan para conocer con una cierta exactitud el comportamiento de las baterías y poder averiguar cómo será su comportamiento a largo plazo.

5.1 Definición y tipos de modelos:

Un modelo de una batería es un modelo matemático que define mediante una forma analítica el comportamiento de un sistema real, en nuestro caso unas baterías, mediante la introducción de unos parámetros de entrada.

Todo modelo poseerá un cierto grado de exactitud qué será lo que le haga parecerse al modelo real. Esta exactitud está condicionada por la fidelidad con la que se construye el modelo y la de los datos que introducimos para su cálculo.

Dependiendo del sistema real que queramos modelar, poseeremos modelos sencillos o complejos. Esto depende de la cantidad de variables que introduzcamos en nuestro modelo y la exactitud que vaya a poseer nuestro modelo frente al sistema real.

En nuestro caso que queremos simular baterías de Ion-Litio, el sistema es complejo y no es lineal. La exactitud del modelo con el sistema real dependerá del modelo elegido para implementar el comportamiento de la batería. Ahora sí, al aumentar el número de variables a introducir en nuestro modelo aumentaremos la exactitud, pero será más complejo de implementar y de obtener los valores deseados.

Con todo esto dicho, hay una amplia cantidad de modelos distintos. Aun así se han clasificado en dos grupos según al modelo de base que utilicen.

- ✓ Modelos electroquímicos: se basan en las características constructivas y las reacciones electroquímicas que se producen en el interior de la celda. Son modelos que reproducen de una manera muy veraz el comportamiento de las celdas.

El problema que para estos modelos se necesitan el uso de ecuaciones diferenciales no lineales, lo que quiere decir que utilizan una elevada carga computacional, y por lo tanto elevados periodos de simulación.

- ✓ Modelos de circuito equivalente: se basan en la teoría de circuitos y el uso de elementos como resistencias, condensadores, bobinas y fuentes de tensión e intensidad para simular el comportamiento de las celdas. Estos modelos al estar basados en circuitos eléctricos asemejan muy bien el comportamiento que tiene lugar en las celdas, con un buen compromiso entre exactitud y facilidad de utilización. Además, las fórmulas que son utilizadas son fáciles de implementar y no poseen una elevada carga computacional. Todo esto les hace muy usados para simular el comportamiento de las baterías.

5.2 Modelos electroquímicos:

Los modelos electroquímicos utilizan el método matemático para describir el proceso de reacciones químicas que se lleva a cabo en el interior de una celda, mediante el uso de la teoría electroquímica.

En este apartado vamos a hablar de los modelos más simples de implementar, ya que los modelos más complejos intentan modelar el proceso de difusión que se lleva a cabo en los distintos materiales y son variables químicas, y supone una gran carga computacional.

El modelo más fácil de implementar es el modelo de Peukert, que nos dice que la carga disponible en una batería disminuye con el aumento de la intensidad de descarga como se puede observar en la Figura 5.1, y que queda definida por la siguiente ecuación (Alonso Ripoll, 2017):

$$C_p = I^k \cdot T \quad (5.1)$$

Si se conocen los tiempos de descarga, se puede calcular las corrientes constantes de descarga como (Alonso Ripoll, 2017):

$$I = \frac{C}{T} \quad (5.2)$$

Y la capacidad de Peukert seria (Alonso Ripoll, 2017):

$$C_p = I_1^k \cdot T_1 = I_2^k \cdot T_2 \rightarrow \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^k = \frac{T_2}{T_1} \quad (5.3)$$

Y su constante:

$$k = \frac{\log T_2 - \log T_1}{\log I_1 - \log I_2} \quad (5.4)$$

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

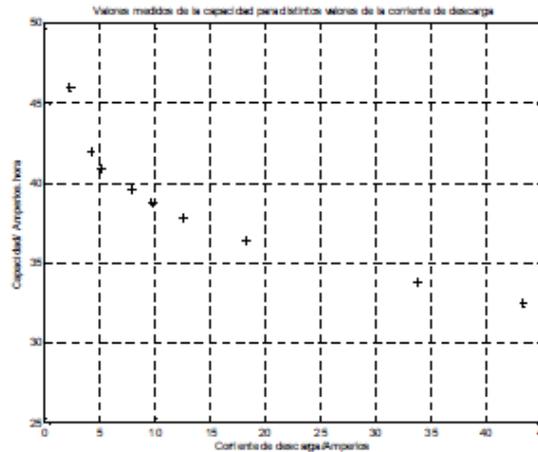


Figura 5.1 Capacidad de una batería de Pb-Ácido frente a intensidad de descarga. (Alonso Ripoll, 2017)

El modelo de Shepherd apareció en 1965 y mediante la tensión y las corrientes existentes, modela el proceso químico que sucede en el interior. Con este modelo y el anterior se utilizan en conjunto para conocer la tensión y el SOC en la batería de los vehículos híbridos. Este modelo queda definido con la siguiente ecuación (Jiang, 2015):

$$E_t = E_0 - R_i \cdot I - K_i \cdot \left(\frac{1}{1-DOD} \right) \quad (5.5)$$

Donde E_t es la tensión que tenemos en los bornes de la batería, E_0 es la tensión del circuito abierto cuando la celda está cargada, R_i es la resistencia interna, K_i es la resistencia de polarización e I la corriente de descarga.

El modelo de Shepherd es capaz de encontrar el punto en el cual la tensión cae rápidamente, siempre que se utilicen corrientes pequeñas. Conocer este punto es útil para mantener la zona de trabajo alejada de él.

El problema de este modelo que en algunos casos se complica su realización. Por este motivo, Unnewehr y Nasar han simplificado el modelo de Shepherd en tres ecuaciones, una de tensión de trabajo, otra de tensión de circuito abierto y la última de la resistencia equivalente, que son las siguientes (Jiang, 2015):

$$E_t = E_0 - R_i \cdot I - K_i \cdot DOD \quad (5.6)$$

$$E_{oc} = E_0 - K_i \cdot DOD \quad (5.7)$$

$$R = R_o - K_R \cdot DOD \quad (5.8)$$

En este modelo, E_{oc} es la tensión de circuito abierto, R_o es la resistencia interna medida a plena carga, K_R es una constante que se haya de manera experimental y R es la resistencia equivalente para un determinado nivel de carga.

A partir del anterior modelo, Nerst simplifico el modelo a dos ecuaciones, con las que obtiene mayor exactitud, pero como dijimos anteriormente a costa de introducir más parámetros. Estas ecuaciones son las siguientes (Jiang, 2015):

$$E_t = E_i - R_i \cdot I + K_i \cdot \ln(DOD) \quad (5.9)$$

$$E_t = E_o - R_i \cdot I + K_i \cdot \ln(DOD) + K_j \cdot \ln(1 - DOD) \quad (5.10)$$

Por cerrar este apartado vamos a hablar del modelo propuesto por Plett de la universidad de Colorado, que es como una síntesis de los métodos anteriormente vistos. El defecto que tiene este modelo es que hay que conocer previamente el estado de carga (SOC) y determinar experimentalmente un mayor número de parámetros. La fórmula que obtiene es la siguiente (Jiang, 2015):

$$U_L = K_o - R \cdot I_L - \frac{K_1}{SOC} - K_2 \cdot SOC - K_3 \cdot \ln(SOC) - K_4 \cdot \ln(1 - SOC) \quad (5.11)$$

Donde U_L es la tensión bajo carga, I_L es la intensidad bajo la carga, R la resistencia equivalente de la batería, y K_1, K_2, K_3 y K_4 son los coeficientes del modelo.

Modelos electroquímicos de las baterías de Ion-Litio	
Shepherd	$E_t = E_o - R_i \cdot I - K_i \cdot \left(\frac{1}{1 - DOD} \right)$
Unnewehr y Nasar	$E_t = E_o - R_i \cdot I - K_i \cdot DOD$
Nerst	$E_t = E_o - R_i \cdot I + K_i \cdot \ln(DOD) + K_j \cdot \ln(1 - DOD)$
Plett	$U_L = K_o - R \cdot I_L - \frac{K_1}{SOC} - K_2 \cdot SOC - K_3 \cdot \ln(SOC) - K_4 \cdot \ln(1 - SOC)$

Tabla 5.1 Resumen de los modelos electroquímicos. (He H. , Xiong, Guo, & Li, 2012)

5.3 Modelos de circuito equivalente:

En este apartado vamos a utilizar componentes como son las resistencias para simular la resistencia de paso de la corriente a través de los bornes de la batería, placas y resto de elementos internos, condensadores para simular la capacidad de la batería, fuentes de tensión tanto dependientes como independientes para simular la tensión de la batería, así como fuentes de intensidad e inductancias.

De este tipo de modelos hay una gran variedad, aquí se han recopilado los más importantes, ordenados de menor a mayor complejidad.

5.3.1 Modelo con una resistencia interna:

Es el modelo más simple de todos, poseemos una fuente de tensión ideal (U_{OC}) que simula la batería y una resistencia (R_0) en serie que simula la caída de tensión interna de la batería al aplicar una carga. Podemos observar el esquema en la Figura 5.2 y se rige por la siguiente ecuación (He, Xiong, & Fan, 2011):

$$U_L = U_{OC} - R_0 \cdot I_L \quad (5.12)$$

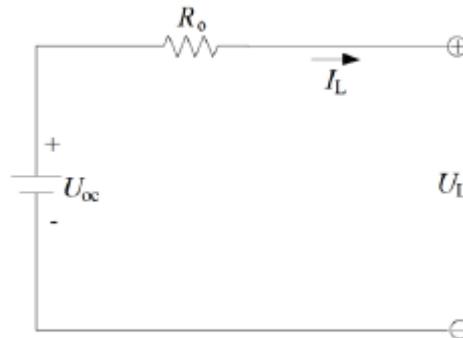


Figura 5.2 Esquema del modelo de resistencia interna. (He, Xiong, & Fan, 2011)

Este modelo es muy fácil de implementar, consiguiendo valores bastante exactos para descargas a corriente constante, siempre y cuando se encuentre en la zona intermedia de la curva de descarga de la batería o zona óhmica.

El sentido de la corriente I_L según sea su signo nos indicara en qué estado se encuentra la batería, es decir, si el signo es positivo la batería está descargándose y si es negativo la batería se encuentra en el proceso de carga.

El valor de la resistencia interna R_0 depende del tipo de batería, temperatura, estado de carga, aunque este último solo influye en niveles de carga bajos. En la Figura 5.3 podemos ver la variación de la resistencia interna en función del SOC.

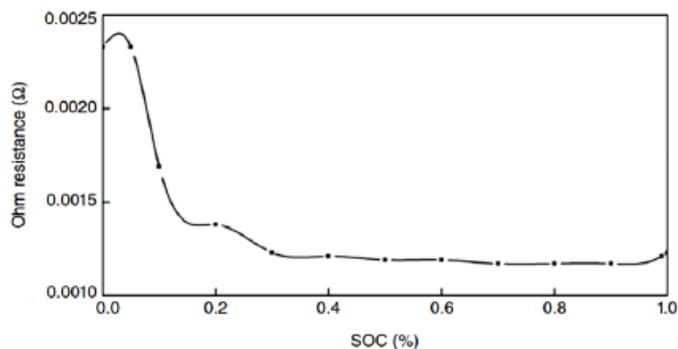


Figura 5.3 Variación de la resistencia interna de la batería en función del SOC. (Jiang, 2015)

5.3.2 Modelo con un grupo RC en paralelo:

Este modelo fue propuesto por el fabricante de baterías SAFT, que ha implementado en su software propio ADVISOR, con unos buenos resultados. El modelo posee tres resistencias (R_t , R_e , R_c) y dos condensadores (C_c y C_b), como se observa en la Figura 5.4, para simular el comportamiento de la batería.

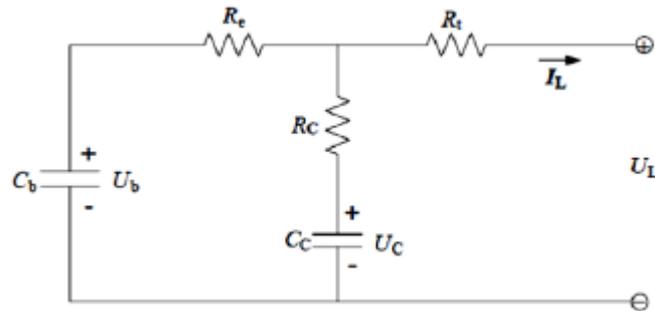


Figura 5.4 Esquema del modelo RC realizado por SAFT. (He, Xiong, & Fan, 2011)

En este circuito R_e es la resistencia interna de la batería, R_t resistencia de los terminales de conexión y R_c la resistencia asociada al condensador C_c . El condensador C_b tiene un valor alto de capacidad, para representar el almacenamiento de la energía química de la batería y C_c tiene una capacidad pequeña para simular los transitorios de la batería. Las ecuaciones de este modelo son las siguientes (He, Xiong, & Fan, 2011):

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b \cdot (R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c \cdot (R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c \cdot (R_e + R_c)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b \cdot (R_e + R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c \cdot (R_e + R_c)} \end{bmatrix} \cdot [I_L] \quad (5.13)$$

$$[U_L] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{R_e + R_c} & \frac{R_e}{R_e + R_c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_t & -R_e \cdot \frac{R_c}{R_e + R_c} \end{bmatrix} \cdot [I_L] \quad (5.14)$$

5.3.3 Modelo equivalente de Thevenin:

Este modelo es como el modelo de resistencia interna, pero añadimos una red RC, de esta manera se simulará el comportamiento dinámico de la batería. Se puede observar en la Figura 5.5.

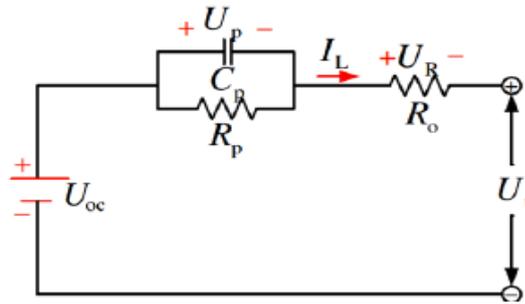


Figura 5.5 Esquema del modelo de Thevenin. (He H. , Xiong, Guo, & Li, 2012)

En la rama RC que introducimos, el condensador C_p simula los transitorios que tienen lugar durante los procesos de carga y descarga, mientras que la R_p representa los fenómenos que tienen lugar por la polarización de la batería. Las ecuaciones de este modelo son las siguientes (He, Xiong, & Fan, 2011):

$$U_p = -\frac{U_p}{R_p \cdot C_p} + \frac{I_L}{C_p} \quad (5.15)$$

$$U_L = U_{oc} - U_p - I_L \cdot R_o \quad (5.16)$$

5.3.4 Modelo PNGV:

Este modelo está dentro de un programa que es denominado Partnership for a New Generation of Vehicles, en el que trabajan los fabricantes de automóviles General Motors, Ford y Daimler.

Este modelo se basa en el equivalente de Thevenin, añade una serie de condensadores para reproducir las variaciones de tensión que se producen durante el proceso de carga. Podemos observar el circuito en la Figura 5.6.

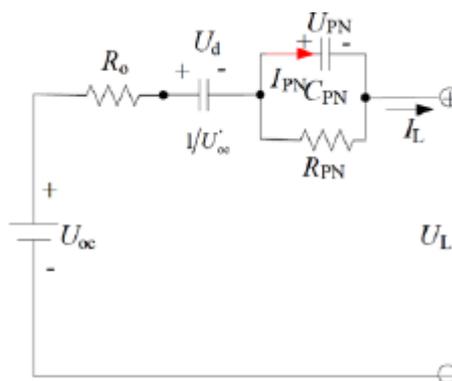


Figura 5.6 Esquema del modelo PNGV. (He, Xiong, & Fan, 2011)

Este modelo es de los más utilizados en la industria de la automoción americana, debido a que posee una definición física clara y concisa, buena aplicabilidad, además de permitir simular una multitud de ciclos de carga/descarga obteniendo unos resultados buenos.

Las ecuaciones de este modelo son las siguientes (He, Xiong, & Fan, 2011):

$$U_d = U'_{oc} \cdot I_L \quad (5.17)$$

$$U_{PN} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} \cdot C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \quad (5.18)$$

$$U_L = U_{oc} - U_d - U_{PN} - I_L \cdot R_0 \quad (5.19)$$

5.3.5 Modelo de polarización total:

Este modelo se basa en el estudio de las curvas características de las baterías de iones de litio, sobre todo en las que se puede apreciar los fenómenos de polarización. Se basa en el modelo de Thevenin, pero añade dos ramas RC, para dotar al modelo de una mayor exactitud, con el fin de poder distinguir la polarización referente a la concentración química de la polarización electroquímica de la carga y la descarga. Podemos observar el modelo en la Figura 5.7.

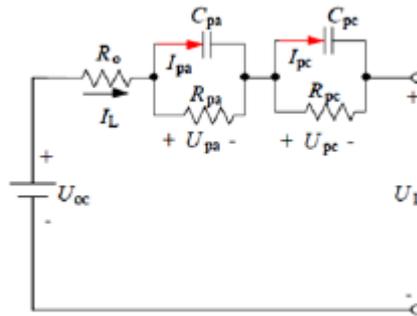


Figura 5.7 Esquema del modelo de polarización dual. (He, Xiong, & Fan, 2011)

En este modelo la resistencia de polarización son dos, R_{pa} que nos representa la polarización química y la R_{pc} para representar la polarización de la concentración. Luego de las capacidades C_{pa} y C_{pc} se utilizan para caracterizar la respuesta transitoria en la carga o descarga de la batería y describir la polarización química y la polarización de la concentración por separado. El comportamiento eléctrico del circuito queda expresado mediante las siguientes ecuaciones (He, Xiong, & Fan, 2011):

$$U_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa} \cdot C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \quad (5.20)$$

$$U_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc} \cdot C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \quad (5.21)$$

$$U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L \cdot R_0 \quad (5.22)$$

5.4 Modelos propuestos por otros autores:

El modelado e investigación sobre las baterías de litio está en auge sobre todo en las universidades y los centros de investigación más importantes del mundo. Lo más habitual es que presenten informes de sus resultados y sus simulaciones, para poderlo exponer y defender sus modelos. En este apartado vamos a hablar de algunos modelos propuestos por los autores.

5.4.1 Modelo propuesto por Chem:

Para simular el comportamiento de las baterías de litio, (Chem & Rincon-Mora, 2006) propone un circuito en el cual no utiliza componentes lineales, como son fuentes de tensión e intensidad controladas por tensión o corriente, respectivamente. El uso de estos elementos es para poder modelar la respuesta transitoria de la batería y el comportamiento no lineal.

Podemos ver el modelo en la Figura 5.8, y observar que se divide en dos circuitos distintos. El circuito de la izquierda modela la carga almacenada durante los procesos de carga y descarga y la capacidad de almacenamiento de energía en la batería. En cambio, en circuito de la derecha simula la resistencia interna de la batería y el comportamiento transitorio de esta frente distintas cargas.

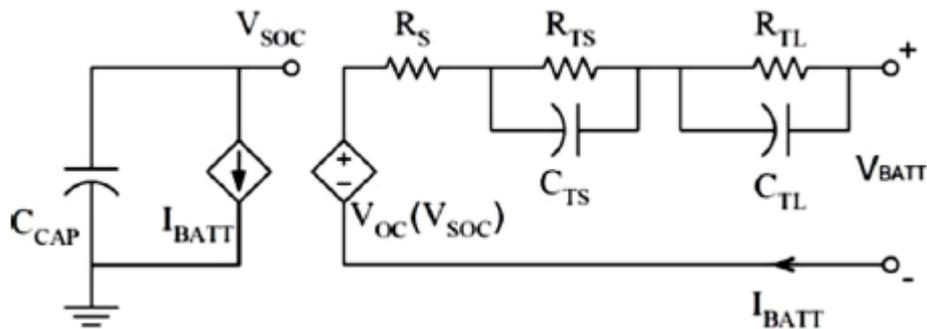


Figura 5.8 Esquema propuesto por (Chem & Rincon-Mora, 2006)

Para obtener la aproximación de la relación no lineal de V_{oc} (SOC) realiza una serie de ciclos mientras esta monitorizando la corriente y el voltaje. La descarga la realizamos a intensidad constante y así el cálculo del SOC es más fácil. Para la medida de tensión se deja reposar la batería y se la mide en cada uno de los puntos, en estos mismos puntos se aprovechará la descarga a intensidad constante para calcular el valor de R_s .

Respecto a la red RC se supone que el periodo de descarga es suficientemente largo como para que los términos exponenciales de la red RC sean despreciables. El valor asignado a C_{CAP} es función de la batería en faradios y teniendo en cuenta que este valor varía según el valor del SOC.

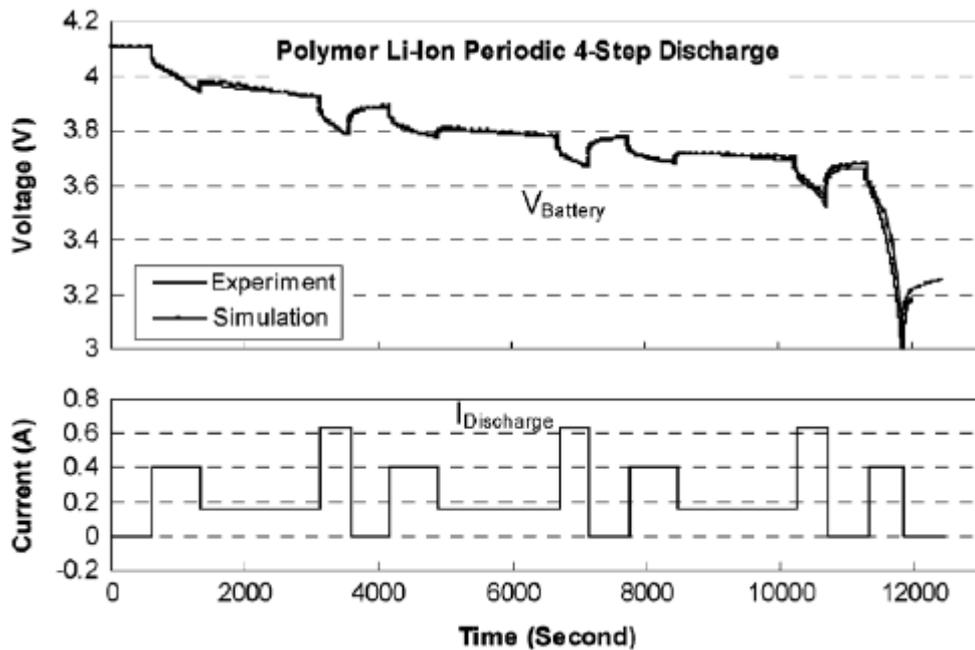


Figura 5.9 Grafica de descarga con datos experimentales y simulados. (Chem & Rincon-Mora, 2006)

Chem realizó muchas comprobaciones utilizando distintos perfiles de corrientes de descarga. Por ejemplo, en la Figura 5.9 podemos observar los resultados obtenidos y en la Tabla 5.2, el error obtenido en el modelo.

Load Profiles	Max. Error Voltaje (mV)	Runtime Error (%)
Continuous Discharge	15	0,395%
Pulse Charge	30	0,133%
4-Step Discharge	20	0,338%

Tabla 5.2 Resultados de la aplicación del modelo de (Chem & Rincon-Mora, 2006)

Podemos concluir que el modelo de Chem es un modelo robusto, ya que nos es posible utilizarlo para un amplio tipo de baterías y fabricantes, así como distintos valores de descarga. Su implementación si es para aplicaciones en las cuales no se necesita demasiada exactitud, puede ser costosa.

5.4.2 Modelo propuesto por Tremblay:

(Tremblay, 2009) propone un modelo que sirve para cualquier modelo de batería, además de que resulta fácil de implementar en MATLAB/ Simulink. Se basa en el modelo electroquímico de Shepherd para poder incluir los fenómenos químicos de la polarización y en el modelo de resistencia eléctrica. Podemos observarlo en la Figura 5.10.

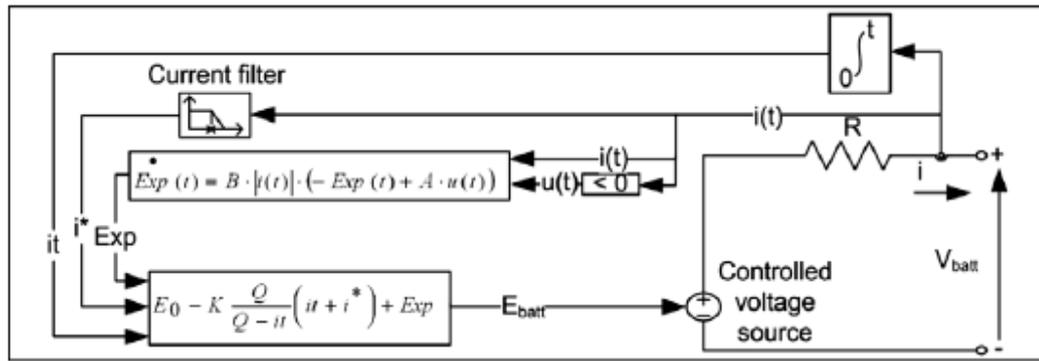


Figura 5.10 Implementación del modelo de Tremblay en Simulink. (Tremblay, 2009)

Para realizar el modelo se basó en las fórmulas de las baterías de Ni-MeH, pero la demostración es aplicable para el resto de baterías. Tremblay comenta el efecto de histéresis que sufren las baterías de Pb-Ácido, Ni-MeH y Ni-Cd, aunque en las baterías de litio este fenómeno se obvia.

También indica que las baterías de Pb-Ácido comparten con las de litio la caída de tensión cuando el estado de carga de las baterías es bajo. Así como durante el estado de carga se aproxima a su máximo se produce un aumento del voltaje rápidamente. Este fenómeno se modela mediante la resistencia de polarización, ya que mientras la batería está en el proceso de carga la resistencia de polarización es nula, mientras que cuando la batería se aproxima al valor de carga completa, esta resistencia aumenta rápidamente.

Las fórmulas que utiliza Tremblay son las siguientes para la carga y la descarga, respectivamente:

$$V_{batt}(t) = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{Q}{i \cdot t - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i \cdot t} \cdot i \cdot t + A^{-B \cdot i \cdot t} \quad (5.23)$$

$$V_{batt}(t) = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - i \cdot t} \cdot (i \cdot t + i^*) + A^{-B \cdot i \cdot t} \quad (5.24)$$

Donde V_{batt} es la tensión en bornes de la batería, E_0 la tensión nominal de la batería, K la constante de polarización, Q la capacidad de la batería, A constante exponencial de amplitud, B constante de tiempo inversa, R resistencia interna, i corriente de la batería e i^* es la corriente filtrada.

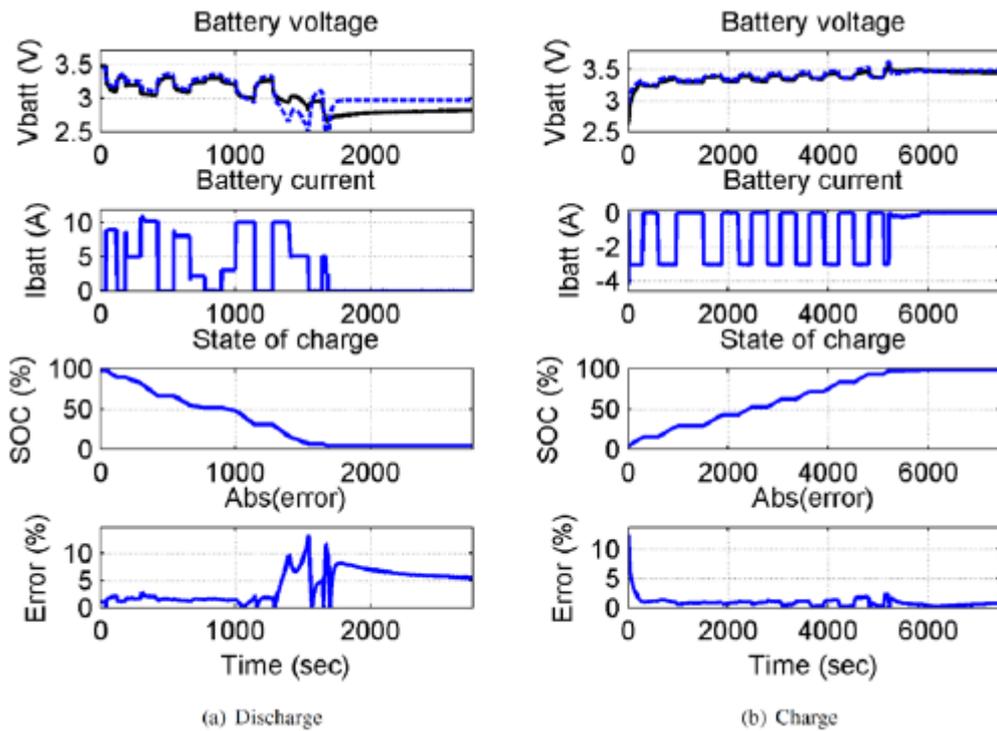


Figura 5.11 Descarga (a) y Carga (b) de una batería de Litio de 2.3 Ah y 3.3V. (Tremblay, 2009)

El error obtenido por el autor es del 5% y las zonas con menor tasas de error para las baterías de litio entre un 10 a un 20%.

5.4.3 Modelo propuesto por Dubarry:

(Dubarry & Liaw, 2007) presenta un modelo que sirve para todos los tipos de baterías, se basa en el modelo de doble impedancia. Utiliza la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica para obtener los valores de los parámetros. Podemos ver el circuito que utiliza en la Figura 5.12.

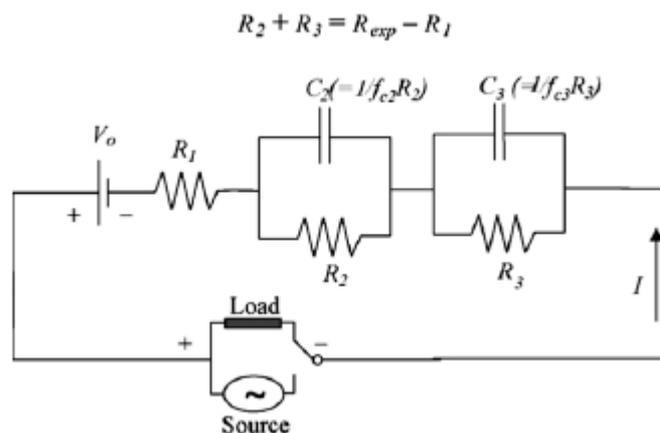


Figura 5.12 Modelo propuesto por (Dubarry & Liaw, 2007).

En este circuito V_0 es la tensión de ciclo abierto de la batería que es función del SOC, R_1 la resistencia interna de la batería y R_2 y R_3 componentes asociados al funcionamiento de la batería.

Para el cálculo de los parámetros utiliza diversos métodos. Para el cálculo de V_0 , consiste en descargar la batería a un ratio de C/25, mientras utiliza el método de la espectroscopia para el cálculo de R_1 , R_2 y R_3 . Al mismo tiempo define la R_{exp} como la diferencia entre la tensión de la carga y la de la descarga dividida la corriente de prueba, que suelen realizarse a C/5 y C/3. Podemos observar los resultados de los ensayos obtenidos en la Figura 5.13.

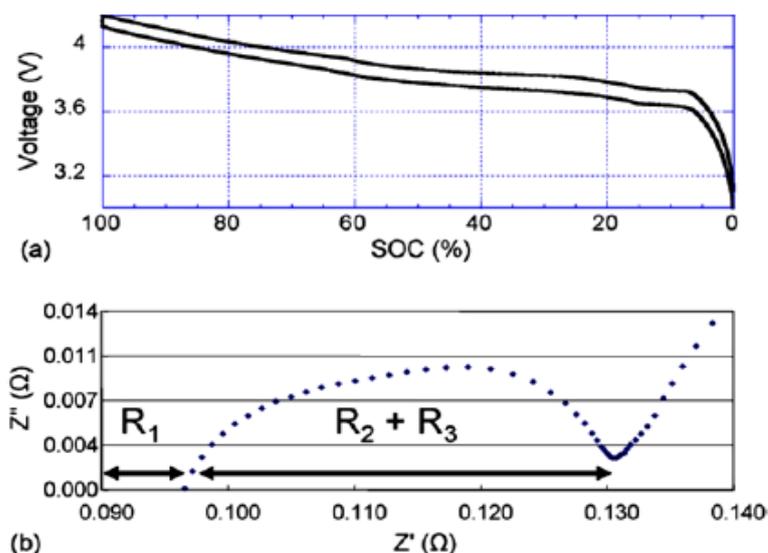


Figura 5.13 Ensayos de caracterización del modelo. (Dubarry & Liaw, 2007)

Los resultados obtenidos por Dubarry los podemos observar en la Figura 5.14 en la cual hace la descarga a C/2 y 1C. En esta Figura las curvas (a) y (d) representan la evolución de la tensión obtenida durante C/2 y 1C, respectivamente. Las curvas (b) y (e) son la simulación a partir de los parámetros obtenidos a una corriente de descarga de C/3. Y por último, las curvas (c) y (f) son los resultados con los parámetros de descarga de la batería a C/5.

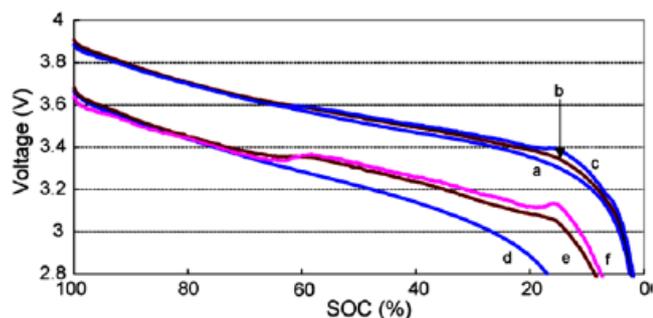


Figura 5.14 Resultados obtenidos en el modelo. (Dubarry & Liaw, 2007)

Este modelo por los resultados observados se muestra que para valores de estado de carga mayores al 60%, este modelo no reproduce de una manera exacta el comportamiento para corrientes de descarga grandes. En cambio para corrientes de descarga pequeñas, el modelo se ajusta mejor, aunque en las últimas etapas no se garantiza precisión.

5.5 Criterios para la elección de modelo:

En este capítulo hemos realizado una recopilación de los distintos modelos que hay disponibles para las baterías de Ion-Litio. Se ha hablado de las principales características de los modelos y sus particularidades. Los resultados son parecidos de un modelo a otro pero con peculiaridades según el modelo.

Depende del proyecto pues se utilizaran unos modelos u otros, nosotros para elegir uno nos hemos basado en los siguientes criterios:

- ✓ Campo de aplicación: es necesario que se adapte el modelo al campo de aplicación en el cual vamos a realizar nuestra simulación. En el caso del campo de la automoción es bastante usados los modelos electroquímicos simples y de circuitos eléctricos equivalentes, como hemos visto.
- ✓ Grado de exactitud: este es un importante factor a definir, ya que cuanto mayor precisión le exijamos a nuestro modelo va a poseer una mayor complejidad, mayor tiempo y capacidad de cálculo necesarias para ejecutarlo.
- ✓ Grado de complejidad: está relacionado con lo dicho anteriormente, tenemos que observar el esfuerzo que nos lleva implementar un modelo frente a otro y lo que nos cueste obtener los parámetros necesarios para su implementación. Muchas veces no compensa el sobreesfuerzo de un modelo más complejo para obtener un mínimo beneficio frente a otro.
- ✓ Obtención de los parámetros del modelo: tenemos que observar las operaciones necesarias para obtener estos parámetros, ya que hay veces que es necesario cálculos matemáticos complicados o ensayos para determinarlos. Este criterio ira en función de nuestras limitaciones.
- ✓ Tiempo de cálculo: aunque este criterio con las actuales potencias de cálculo de los ordenadores es el menos relevante, hay que tenerlo en cuenta para cuantificar el tiempo necesario para desarrollar el modelo.

6 Resultados obtenidos:

En este capítulo vamos a programar el modelo de Chem en Matlab (versión 2012) y la adaptación de este modelo para el vehículo objeto de estudio, que en este caso es el Tesla Model S 85 kWh de 2013 y se realizarán algunas comprobaciones del buen funcionamiento de nuestro programa.

6.1 Programación del modelo de Chem en Matlab:

Como hablamos en capítulos anteriores el modelo de Chem se basa en el circuito de la Figura 6.1. Para modelar este modelo, Chem utiliza las baterías TCL PL-383562 de 850 mAh, que es una batería de polímero de litio.

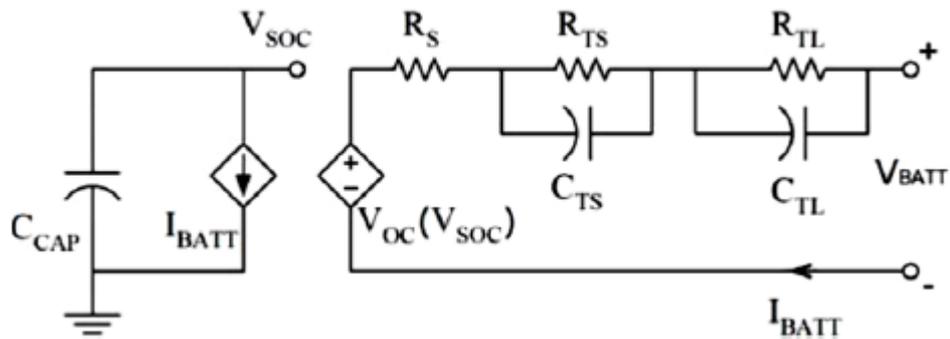


Figura 6.1 Esquema propuesto por (Chem & Rincon-Mora, 2006).

Como se puede observar en la Figura 6.1 hay distintos parámetros de entrada a este modelo como son: R_S , R_{TS} , R_{TL} , C_{TS} , C_{TL} , C_{cap} y V_{SOC} . Estos dos últimos parámetros suelen ser fáciles de averiguar, pero para conocer el resto se necesitan unos ensayos más complicados. En este caso Chem nos proporciona unas gráficas con estos valores a temperatura ambiente y para distintos valores de intensidad de descarga, como se puede observar en la Figura 6.2, además de las ecuaciones de parametrización en función del SOC que son las siguientes (Chem & Rincon-Mora, 2006):

$$V_{OC}(SOC) = -1,031 \cdot e^{-35 \cdot SOC} + 3,685 + 0,2156 \cdot SOC - 0,1178 \cdot SOC^2 + 0,3201 \cdot SOC^3 \quad (6.1)$$

$$R_S(SOC) = 0,1562 \cdot e^{-24,37 \cdot SOC} + 0,07446 \quad (6.2)$$

$$R_{TS}(SOC) = 0,3208 \cdot e^{-29,14 \cdot SOC} + 0,04669 \quad (6.3)$$

$$C_{TS}(SOC) = -752,9 \cdot e^{-13,51 \cdot SOC} + 703,600 \quad (6.4)$$

$$R_{TL}(SOC) = 6,603 \cdot e^{-155,2 \cdot SOC} + 0,04984 \quad (6.5)$$

$$C_{TL}(SOC) = -6056 \cdot e^{-27,12 \cdot SOC} + 4475,00 \quad (6.6)$$

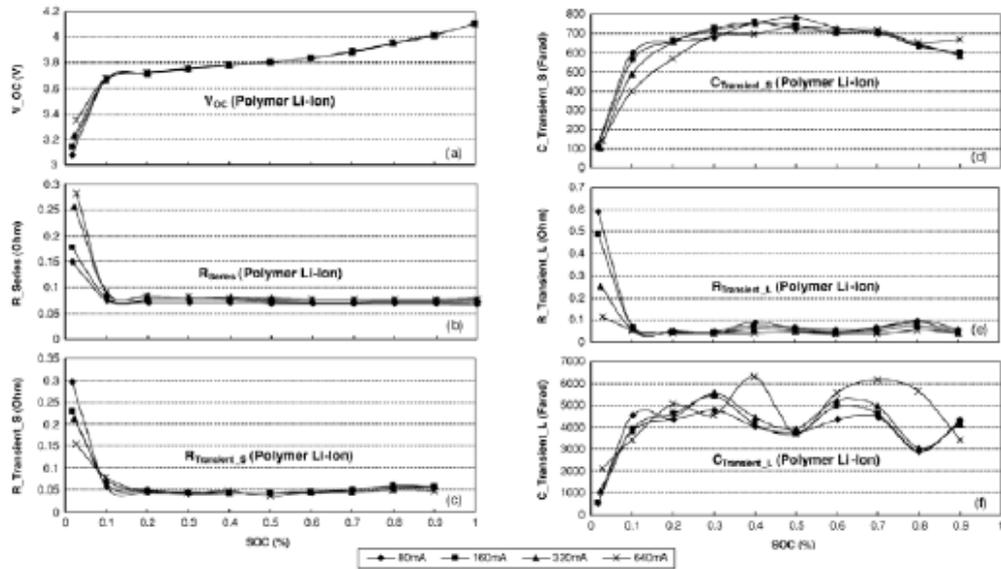


Figura 6.2 Parámetros de TCP PL-383562 a temperatura ambiente. (Chem & Rincon-Mora, 2006)

6.1.1 Asociación de los elementos serie y paralelo:

El modelo de Chem es un modelo monocelda y nosotros necesitamos un modelo multicelda para poder aprovechar todas sus aplicaciones. Para ello debemos de justificar previamente la asociación serie y paralelo de las celdas. Vamos a partir de dos baterías de distinta capacidad con unos valores a plena carga de $V_{OC, PC1ref}$ y $V_{OC, PC2ref}$, para la batería 1 y 2, respectivamente. De esta manera para un determinado valor del SOC, su relación vendrá dada por:

$$\frac{V_{OC1}(SOC)}{V_{OC, PC1ref}} = \frac{V_{OC2}(SOC)}{V_{OC, PC2}} \quad (6.7)$$

Al igual que la relación anterior podemos sacar relaciones con las resistencias en serie R_S , R_{TL} y R_{TS} con el valor de la carga nominal Q_{bat} , ya que esta Q_{bat} es directamente proporcional a la superficie de la placa de la celda. Las resistencias son inversamente proporcionales a la superficie de la placa, por lo que nos queda lo siguiente:

$$R_{S1}(SOC) \cdot Q_{bat1} = R_{S2}(SOC) \cdot Q_{bat2} \quad (6.8)$$

$$R_{TL1}(SOC) \cdot Q_{bat1} = R_{TL2}(SOC) \cdot Q_{bat2} \quad (6.9)$$

$$R_{TS1}(SOC) \cdot Q_{bat1} = R_{TS2}(SOC) \cdot Q_{bat2} \quad (6.10)$$

Respecto a los elementos capacitivos C_{TL} y C_{TS} de la celda, son directamente proporcionales a la superficie de la celda, por lo que nos quedan las siguientes relaciones:

$$\frac{C_{TL1}(SOC)}{Q_{bat1}} = \frac{C_{TL2}(SOC)}{Q_{bat}} \quad (6.11)$$

$$\frac{C_{TS1}(SOC)}{Q_{bat1}} = \frac{C_{TS2}(SOC)}{Q_{bat}} \quad (6.12)$$

Con todo esto dicho en el caso de las asociaciones en serie, por las leyes de la electrotecnia sabemos que la intensidad que circula por cada celda es la misma, por lo que esta asociación queda descrita por las siguientes formulas:

$$V_{OCserie} = \sum V_{OCi}(SOC_i) \quad (6.13)$$

$$R_{serie} = \sum R_{Si}(SOC_i) + \sum R_{TLi}(SOC_i) + \sum R_{TSi}(SOC_i) \quad (6.14)$$

$$\frac{1}{C_{serie}} = \sum \frac{1}{C_{TLi}(SOC_i)} + \sum \frac{1}{C_{TSi}(SOC_i)} \quad (6.15)$$

En el caso de asociaciones en paralelo según las leyes de la electrotecnia, la corriente que circule por cada celda dependerá de los valores de los componentes, pero la tensión poseerá el mismo valor. Con lo dicho anteriormente nos quedarían las siguientes formulas:

$$V_{OC1} = V_{OC2} = V_{OCi} \quad (6.16)$$

$$\frac{1}{R_{paralelo}} = \sum \frac{1}{R_{Si}(SOC_i)} + \sum \frac{1}{R_{TLi}(SOC_i)} + \sum \frac{1}{R_{TSi}(SOC_i)} \quad (6.17)$$

$$C_{paralelo} = \sum C_{TLi}(SOC_i) + \sum C_{TSi}(SOC_i) \quad (6.18)$$

6.1.2 Introducción de las componentes del modelo:

En este apartado vamos a hablar de cómo hemos introducido todos los componentes para el cálculo de la batería en el modelo de Chem.

El primer paso va a ser calcular el estado de carga o SOC, que como vimos en apartados anteriores es el que nos va a hacer posible el cálculo de las demás componentes. Se calcula con la siguiente ecuación (Chem & Rincon-Mora, 2006):

$$SOC(t) = SOC_0 - \int_0^t \frac{I \cdot 100}{C_{cap} \cdot 3600} dt \quad (6.19)$$

En la que el valor de SOC_0 es estado de la batería inicial, I es la intensidad de descarga de la batería y C_{cap} es la capacidad que posee la batería. El valor de SOC varia de 0 a 1, siendo este último el estado de plena carga.

Después de esto hay que calcular la caída de tensión de los distintos elementos de nuestro circuito que quedan definidos por las siguientes ecuaciones (Chem & Rincon-Mora, 2006):

$$V_{TS} = \int_0^t \frac{I}{C_{TS}} - \frac{V_{TS}}{R_{TS} \cdot C_{TS}} dt \quad (6.20)$$

$$V_{TL} = \int_0^t \frac{I}{C_{TL}} - \frac{V_{TL}}{R_{TL} \cdot C_{TL}} dt \quad (6.21)$$

$$V_{RS} = R_s \cdot I \quad (6.22)$$

$$V_{bat} = V_{oc} - V_{TS} - V_{TL} - V_{RS} \quad (6.23)$$

De esta forma podemos calcular el voltaje que posee la batería, y ver su evolución en función de la intensidad demanda y el tiempo.

6.1.3 De monocelda a multicelda:

Como hemos hablado en apartados anteriores, el modelo de Chem es un modelo que es monocelda. Esta característica nos limita muchos campos de aplicación, por eso vamos a utilizar la simplificación de (Kim, Park, Chang, & Choi, 2012) para pasar a un modelo multicelda.

Según Kim esta simplificación se hace mediante la asociación de componentes mediante equivalentes eléctricos. La aplicación de esta simplificación es que de cara a varias celdas conectadas en serie, es equivalente a una única celda con todas sus componentes conectadas en serie. Del mismo modo para el paralelo, varias celdas conectadas en paralelos se transforman en una celda con todos los componentes en paralelo. Se puede ver en la Figura 6.3.

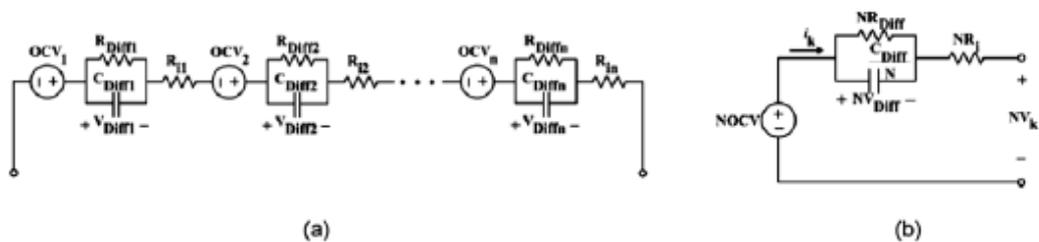


Figura 6.3 Configuración serie(a) y circuito equivalente (b), propuesto por (Kim, Park, Chang, & Choi, 2012)

La aplicación de esta simplificación al modelo es muy sencilla, consiste en multiplicar los números de celdas en serie por los valores de las componentes conectadas en serie y por la tensión de la batería. Y respecto a las componentes en paralelo, se divide la intensidad que circula por el borne de la batería entre el número de elementos conectados en paralelo.

6.1.4 Verificación del modelo:

Una vez que sea programado todo lo explicado en los anteriores capítulos, vamos a realizar una comprobación de la descarga de la batería a carga constante. En este caso la descarga se realizara a una intensidad de 1C que son 0,85 A y a una intensidad de 0,5C que es una intensidad de 0,42 A, ya que es una batería de 850 mAh. Podemos ver los resultados obtenidos en la Figura 6.4.

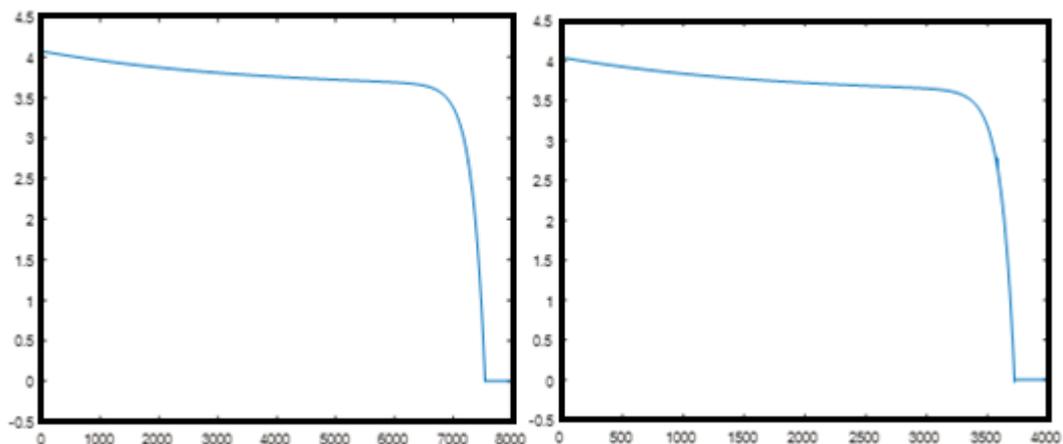


Figura 6.4 Graficas tensión-tiempo para una descarga de 0,42 A (Izq.) y de 0,85 A (Der.).(Elaboración propia)

Esta descarga sea realizado considerando una celda que dispone de un elemento en serie y otro en paralelo, y se ha realizado mediante el programa de DescargaLiOn.m. Como se observa la validación es correcta, además coincide con las pruebas llevadas a cabo por Chem.

6.2 Aplicación del modelo a nuestro vehículo objeto de estudio:

Nuestro coche de estudio es el Tesla Model S 85 kWh, es un vehículo de 2013 y según la EPA arrojaba una autonomía de 426 km, Figura 6.5. Actualmente este vehículo ya no se comercializa, Tesla solo ofrece las versiones para este modelo de 75 kWh y 100 kWh. Esta última versión pose una variante denominada P100D con unos motores de alto rendimiento, que arroja una autonomía de 613 km bajo el ciclo NEDC.



Figura 6.5 Tesla Model S 85 kWh. (km77, s.f.)

La batería de nuestro vehículo está situada en el suelo del mismo y está formado por miles de baterías de iones de litio. En el caso de nuestro vehículo está formado por 7.104 celdas que están repartidas en 16 módulos que se conectan en serie. El conjunto pesa 325 kilogramos y si tenemos en cuenta el peso de las carcasas, electrónica y refrigeración, la energía específica que arroja es de 156 Wh/kg.

Esta batería está compuesta por las celdas recargables de Panasonic 18650, las cuales posee una capacidad nominal de 3,1 Ah. Cada batería pesa 46,5 gramos y tiene 18,2 mm de diámetro y 65,1 mm de largo con una tensión nominal de 3,6 V, se puede observar más características en la ficha de características que se acompaña en los anexos. Se puede observar en la Figura 6.6, la comparación de esta batería con una batería AA.



Figura 6.6 Comparación batería de tesla con las baterías AA. (Wikipedia, 2018)

6.2.1 Cálculo del Consumo del Tesla Model S:

Vamos a calcular el consumo del vehículo para distintos ciclos de conducción con el objetivo de poder comparar los resultados que nos proporciona cada uno. Para el cálculo del consumo vamos a utilizar las ecuaciones básicas de la automoción, que son las siguientes (Tinaut, 2016):

$$P = \frac{v}{\eta_t} \cdot \left(F_f + F_w + F_g + m \frac{dv}{dt} \right) \quad (6.24)$$

Donde P es la potencia necesaria para mover el vehículo, η_t es el rendimiento de las transmisiones, F_f es la fuerza aerodinámica resistente, F_e es la fuerza a la rodadura, F_g la fuerza gravitatoria y la m es la masa del vehículo.

El cálculo de los parámetros anteriormente definidos se lleva a cabo a través de las siguientes formulas:

$$F_f = m \cdot g \cdot f_r \quad (6.25)$$

Donde g es la gravedad y f_r es el coeficiente de resistencia a la rodadura, que queda definido por la siguiente formula:

$$f_r = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v(\frac{km}{h})}{160} \right) \quad (6.26)$$

La fuerza gravitatoria es:

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (6.27)$$

Siendo α el ángulo de inclinación de la pendiente.

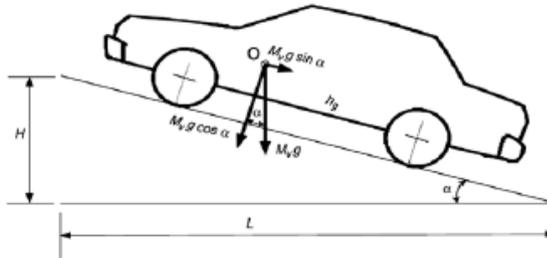


Figura 6.7 Fuerzas a las que está sometido un vehículo. (Alonso Ripoll, 2017)

Y por último la fuerza aerodinámica resistente:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_x \cdot (v + v_w)^2 \quad (6.28)$$

Siendo ρ la densidad del aire, C_x el coeficiente aerodinámico del vehículo, v_w es la velocidad del viento y A_f es el área frontal del vehículo que hemos calculado por la siguiente aproximación:

$$A_f = 1,6 + 0,00056 \cdot (m - 765) \quad (6.29)$$

Por último la potencia que se le demanda a la batería será:

$$P_e = \frac{P}{\eta_m \cdot \eta_c \cdot \eta_{fr}} \quad (6.30)$$

Siendo η_m el rendimiento del motor eléctrico, η_c rendimiento de los convertidores y η_{fr} es el rendimiento del frenado regenerativo.

Respecto a la masa del vehículo y el coeficiente aerodinámico, se adjunta en anexos, la ficha técnica del vehículo objeto de estudio. Respecto a las condiciones de realización del ensayo se supone coeficiente de rodadura base 0,01, viento nulo y que no asciende ninguna pendiente. Respecto a los valores de los rendimientos de transmisiones, del motor, del convertidor y del sistema de frenado regenerativo, se han supuesto los siguientes valores que suelen ser bastante usuales:

$$\checkmark \quad \eta_t = 95 \% \quad \eta_m = 92 \% \quad \eta_c = 95 \% \quad \eta_{fr} = 85 \%$$

Se puede observar en la Figura 6.8. la potencia demanda en un ciclo de simulación para la realización del ciclo europeo o NEDC. El programa que realiza esta tarea es Calculo_Consumo.m.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

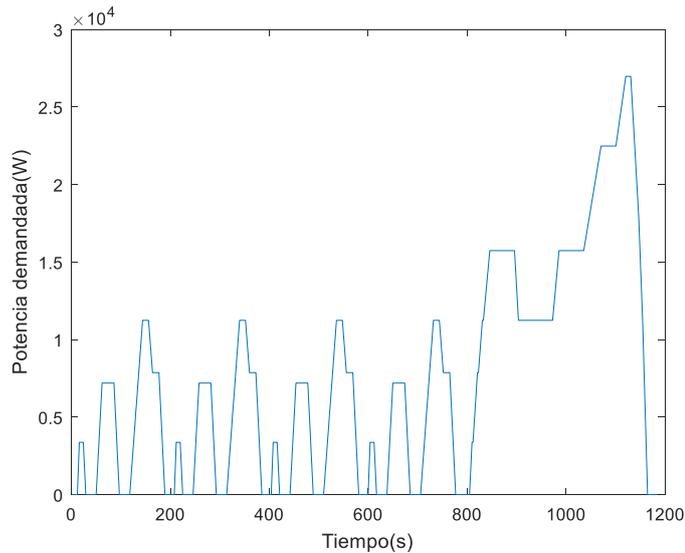


Figura 6.8 Grafica Potencia-tiempo para el ciclo NEDC. (Elaboración propia).

6.2.2 Adaptación del modelo:

Debido a que la batería usada para el modelado del modelo de Chem no es el mismo que la que utiliza nuestro vehículo, vamos a tener que adaptar el modelo para nuestras baterías.

La tensión de la batería TCL PL-383562 está comprendida entre 4,10 V y 2,65 V, mientras que las características de nuestra batería esta comprendidos entre 4,20 V y 3,60 V. Al no haber tanta discrepancia entre ellas podemos sacar un factor que las relacione, que será de la siguiente forma:

$$F_{Tension} = \frac{V_{maxceldatesla}}{V_{TCPL}} = \frac{4,20}{4,10} = 1,0244 \quad (6.31)$$

Este coeficiente multiplicara al valor obtenido del voltaje de la batería para poderlo adaptar a nuestras baterías. Pero no solo vamos a tener que adaptar este valor, sino que vamos a tener que adaptar los componentes del circuito como son las resistencias y capacitancias.

Chem te proporciona los valores de cada resistencia que podemos observar en la Tabla 6.1. Nosotros estos valores no les hemos conseguido obtener, por lo cual sea supuesto un valor del sumatorio de las resistencias de $0,15 \Omega$, que es un valor intermedio usual en este tipo de baterías.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

	TCL PL-383562
R_s	0,07 Ω
R_{TL}	0,05 Ω
R_{TS}	0,05 Ω
$\sum R_s + R_{TL} + R_{TS}$	0,17 Ω

Tabla 6.1 Valores de las componentes de la TCP PL-383562. (Chem & Rincon-Mora, 2006)

Al igual que para el valor que relaciona la tensión de las baterías, vamos a obtener un coeficiente para las resistencias, que en este caso va a ser el mismo para las capacitancias así de este modo vamos a adaptar las curvas de parametrización.

$$F_{CTotal} = F_{RTotal} = \frac{R_{TdeTesla}}{R_{TCL-Pl}} = \frac{0,15}{0,17} = 0.8824 \quad (6.32)$$

Este coeficiente de relación se multiplicara por los coeficientes de resistencia y capacitancia calculados dentro del programa DescargaLiOn.m.

6.3 Resultados:

En este apartado vamos a hablar sobre los resultados obtenidos en las simulaciones de los distintos ciclos de conducción:

6.3.1 Autonomía:

Con la simulación del programa de Autonomia.m hemos calculado la autonomía que obtenemos de nuestro vehículo objeto de estudio, para los distintos ciclos de conducción. Podemos observar la autonomía obtenida en cada ciclo en la Tabla 6.2.

	CICLOS DE CONDUCCIÓN		
AUTONOMÍA	Ciclo NEDC	Ciclo 10-15	Ciclo HFET
	275,175 km	266,28 km	280,84 km

Tabla 6.2 Comparación de los resultados de autonomía obtenidos. (Elaboración propia).

Podemos observar que la autonomía va en función del ciclo de conducción al que sometamos a nuestro vehículo. Se han sacado también las gráficas de la tensión de la batería, intensidad de la batería y el SOC, en función del tiempo para los ciclos que se han comentado antes. Hemos considerado que el programa pare cuando el SOC sea menor del 20%, ya que es recomendable que no baje del 20% para que no se reduzca la vida útil de la batería.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

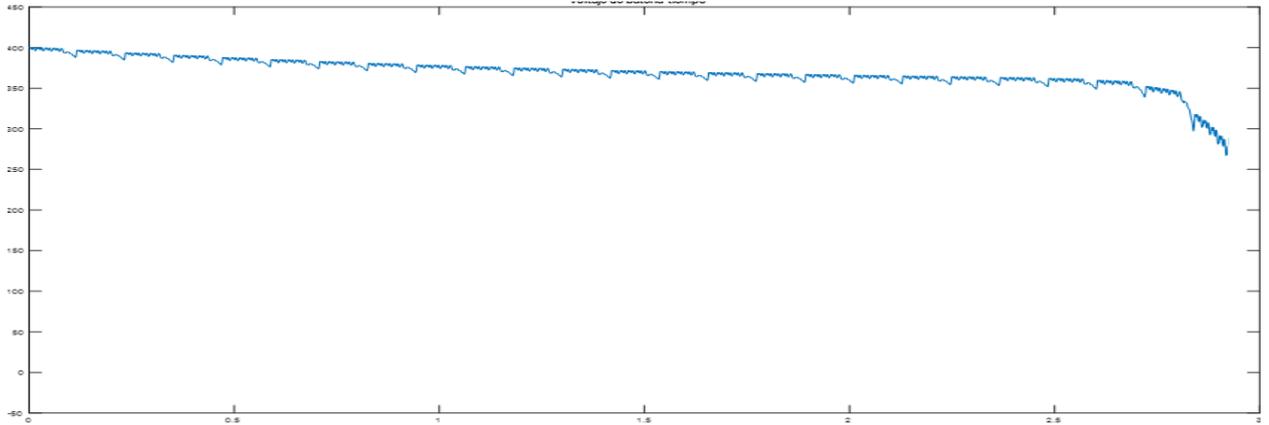


Figura 6.9 Gráfica voltaje-tiempo para el ciclo NEDC. (Elaboración propia).

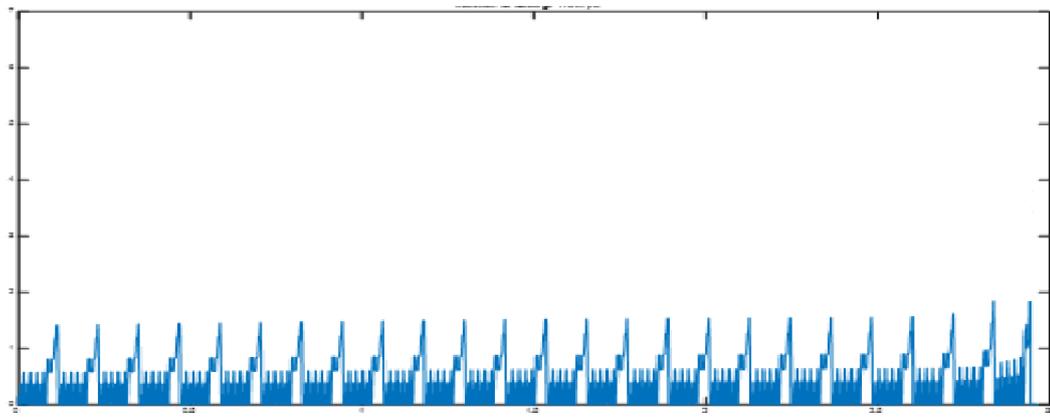


Figura 6.10 Gráfica intensidad-tiempo para el ciclo NEDC. (Elaboración propia).

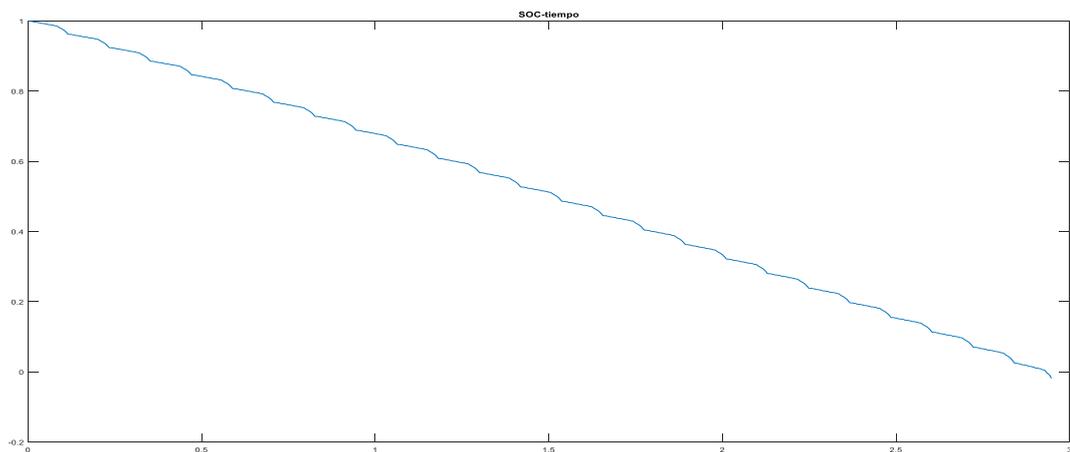


Figura 6.11 Gráfica SOC-tiempo para el ciclo NEDC. (Elaboración propia).

Estas tres figuras son del ciclo NEDC, las tres siguientes corresponden al ciclo HFET o ciclo americano extraurbano.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

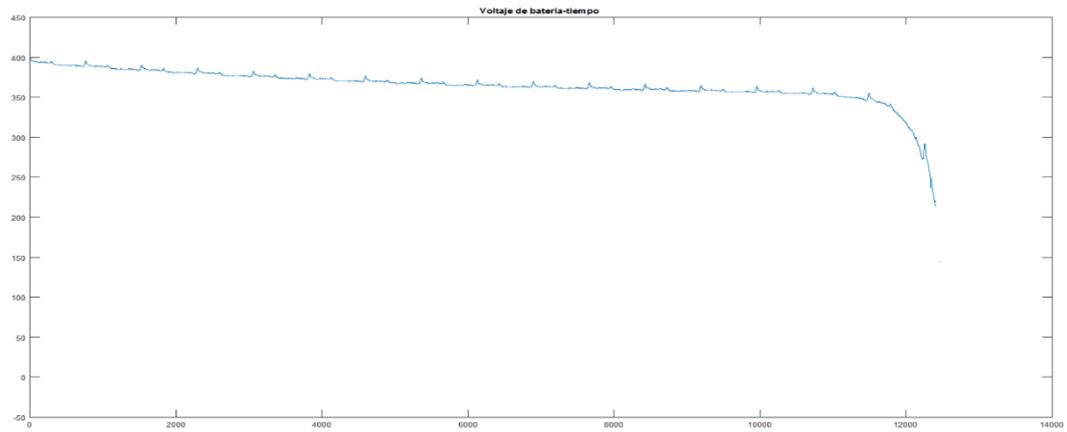


Figura 6.12 Gráfica voltaje-tensión para el ciclo HFET. (Elaboración propia).

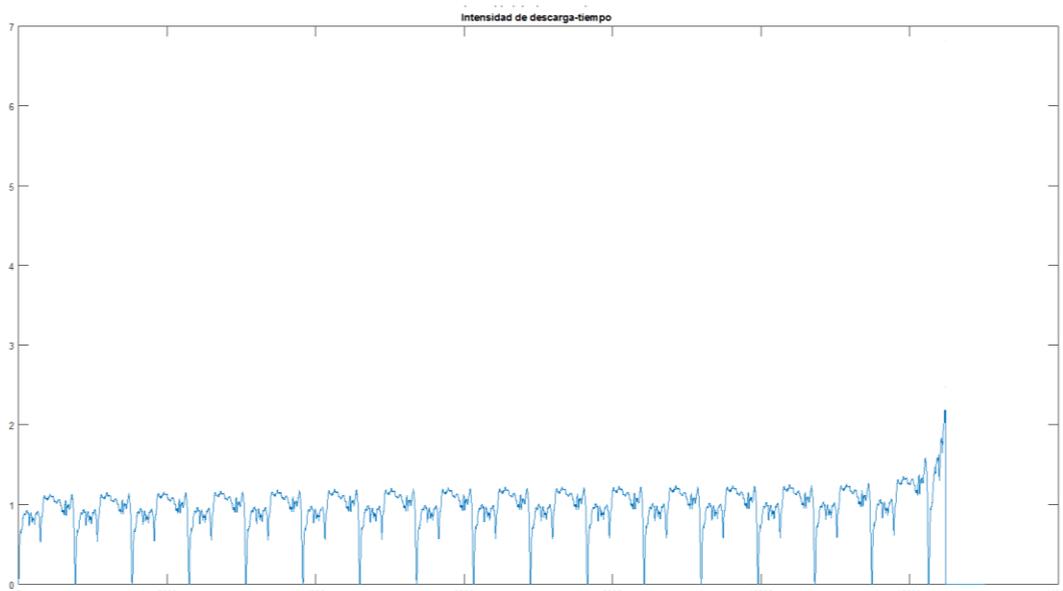


Figura 6.13 Gráfica intensidad-tiempo para el ciclo HFET. (Elaboración propia).

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

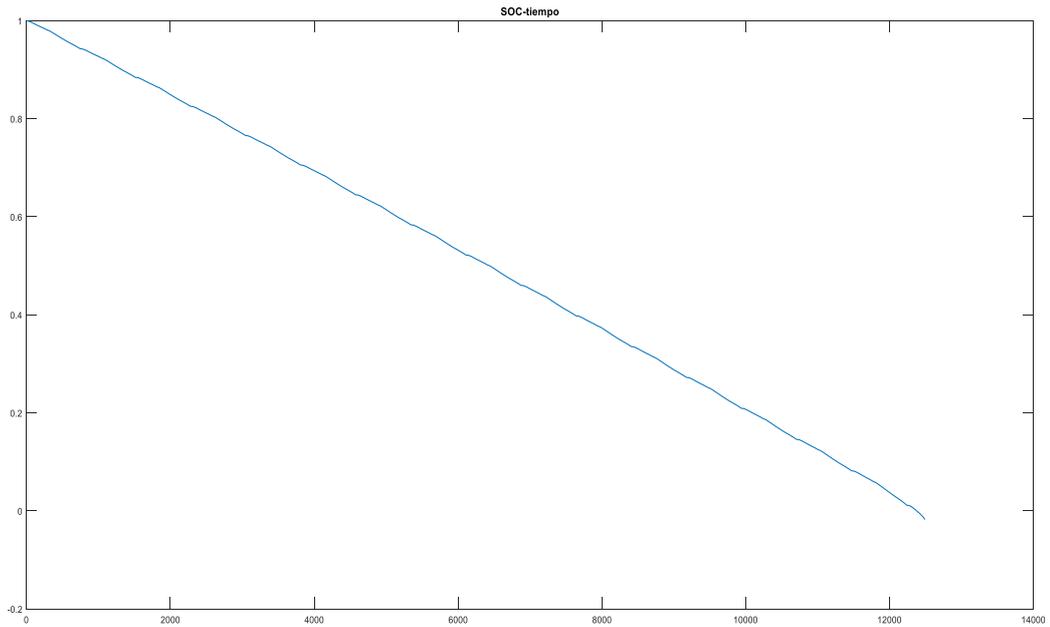


Figura 6.14 Gráfica SOC-tiempo para el ciclo HFET. (Elaboración propia).

A continuación mostramos los resultados para el último ciclo que hemos simulado, el ciclo 10-15 o Japonés.

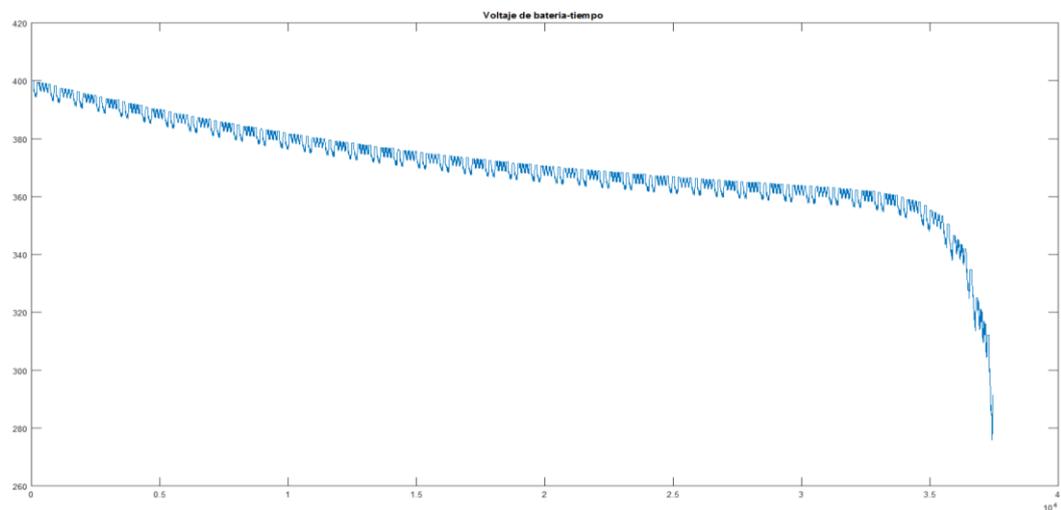


Figura 6.15 Gráfica voltaje-tiempo para el ciclo 10-15. (Elaboración propia).

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

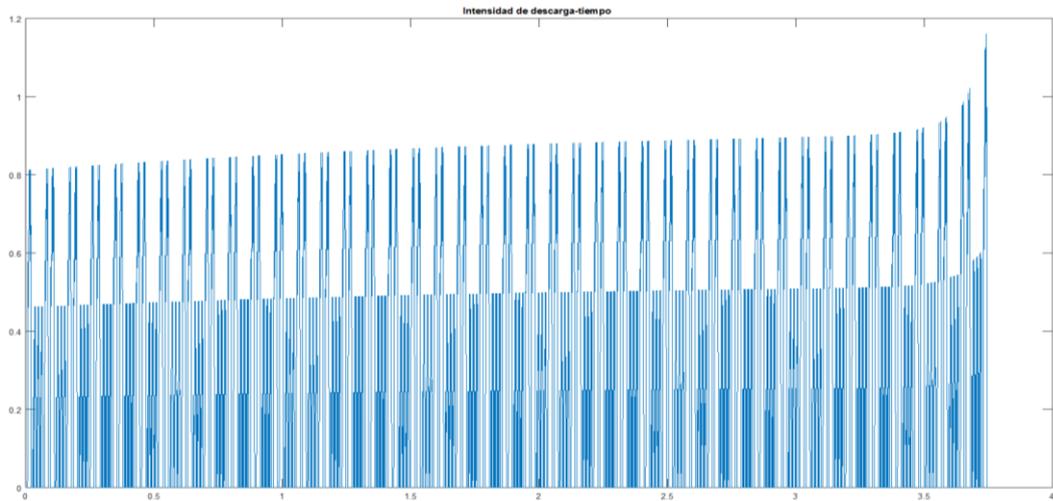


Figura 6.16 Gráfica intensidad-tiempo para el ciclo 10-15. (Elaboración propia).

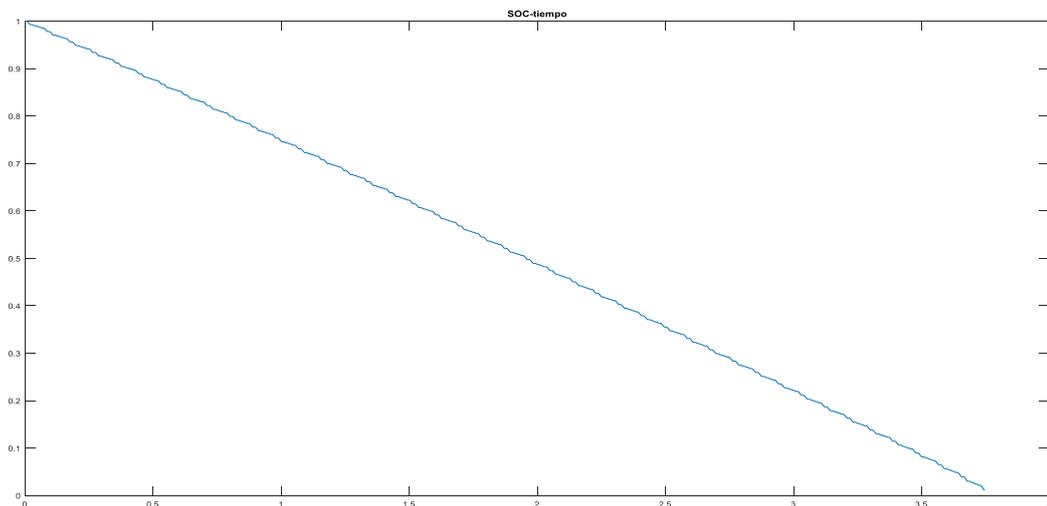


Figura 6.17 Gráfica SOC-tiempo para el ciclo 10-15. (Elaboración propia).

Como en las Figuras anteriores no se aprecia ningún detalle específico, debido a la cantidad de simulaciones que realiza el programa. Se han sacado las gráficas del voltaje de la batería, la intensidad descargada y el SOC, para el primer ciclo de simulación del ciclo 10-15.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

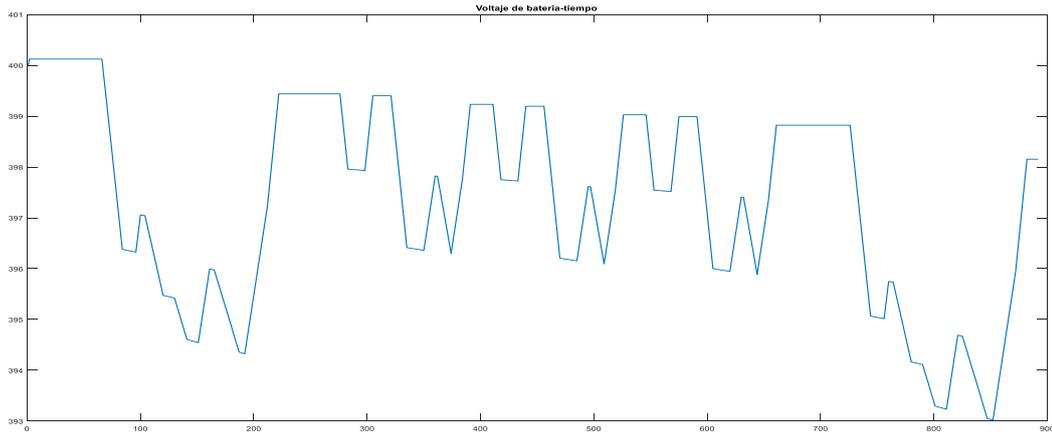


Figura 6.18 Gráfica voltaje-tiempo para un ciclo 10-15. (Elaboración propia).

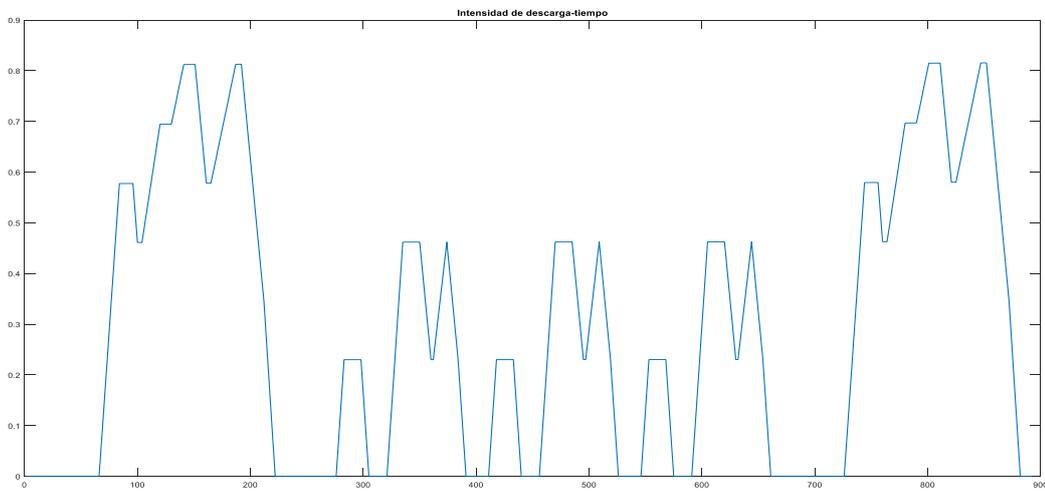


Figura 6.19 Gráfica Intensidad-tiempo para un ciclo 10-15. (Elaboración propia).

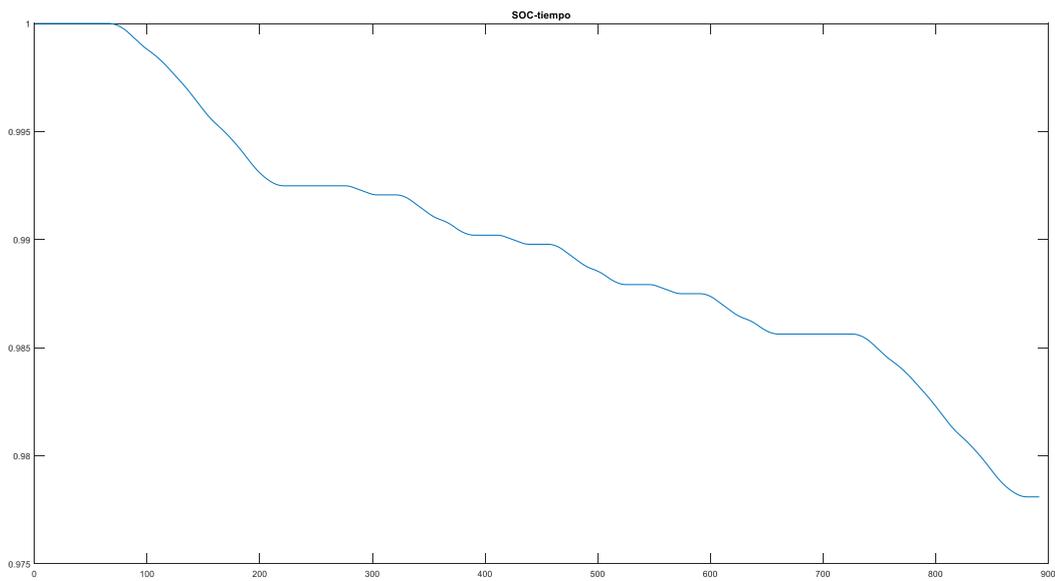


Figura 6.20 Gráfica SOC-tiempo para un ciclo 10-15. (Elaboración propia).

Como se observa las gráficas se adaptan bien al modelo de descarga de Chem, y nos permiten ver la evolución del voltaje y el estado de la batería para distintos ciclos de conducción. La autonomía es verdad que no nos acercamos del todo a la proporcionada por el fabricante, pero como una primera aproximación se considera bastante acertado.

6.3.2 Influencia del frenado regenerativo:

Como se ha explicado en capítulos anteriores estos vehículos están dotados de frenado regenerativo, el cual en función de la velocidad del vehículo podrá actuar proporcionando una cierta energía que será conducida a la batería para la carga de está.

Nosotros hemos supuesto un rendimiento de este frenado del 85%, que lo hemos obtenido de la aproximación para los tres ciclos, de la Figura 6.21.

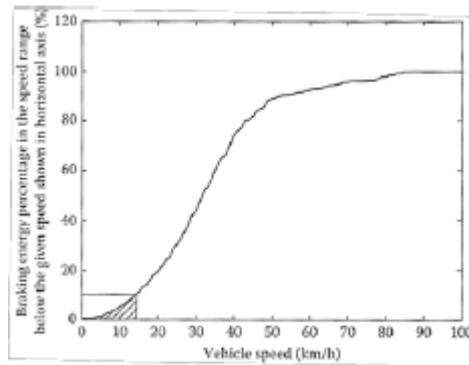


Figura 6.21 Energía regenerada durante el frenado. (Alonso Ripoll, 2017)

A continuación hemos realizado simulaciones con el ciclo HFET para observar como varia la autonomía en función del rendimiento del frenado regenerativo, como observamos en la Figura 6.22.

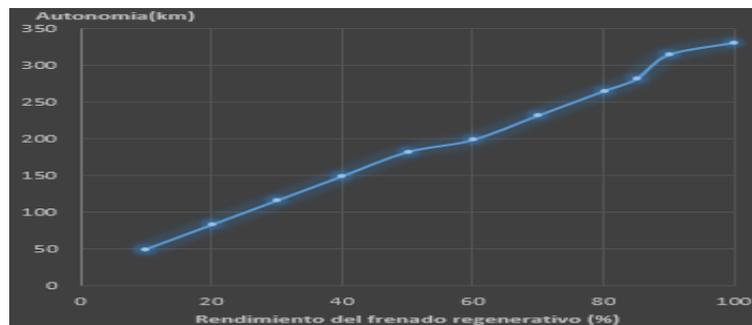


Figura 6.22 Gráfica Autonomía-rendimiento del frenado regenerativo. (Elaboración propia).

Como se puede observar la influencia de este rendimiento en la autonomía puede verse afectada hasta en 281 kilómetros de diferencia, por eso a estos vehículos se les dota de este sistema de frenado a mayores.

De esta forma queda demostrado también que una conducción por ciudad va a tener mayor generación y por lo tanto mayor autonomía que en régimen extraurbano. Este hecho es contrario a los vehículos de combustión, que gastan más en entorno urbano que en extraurbano.

6.3.3 Influencia de la pérdida de capacidad:

En este apartado vamos a dar una noción sobre el envejecimiento que se produce en las baterías. Se ha considerado una pérdida de capacidad constante, y vamos a observar que es lo que sucede con la autonomía en la Figura 6.23.

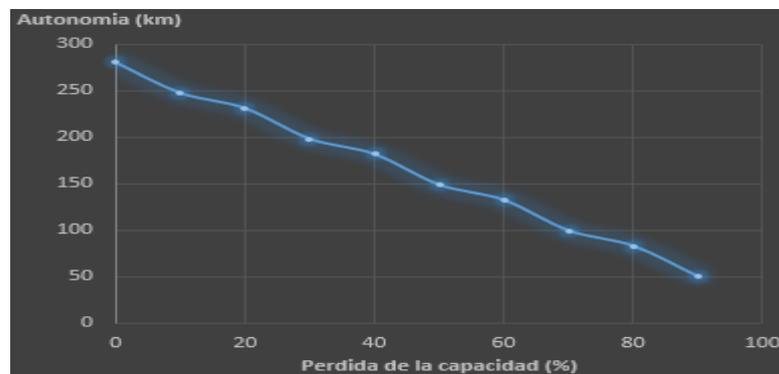


Figura 6.23 Gráfica Autonomía-Pérdida de capacidad. (Elaboración propia).

Como podemos observar en la Figura 6.23. la autonomía se ve bastante mermada con la pérdida de la capacidad. Esta pérdida de capacidad es una causa del envejecimiento, pero no la única, ya que tendríamos que tener en cuenta otros aspectos como son la pérdida de potencia disponible o el aumento de la resistencia interna de la batería. Esto quiere decir que los valores de autonomía si consideramos todos estos parámetros serían más bajos de los que se observan en la Figura 6.23. También sabemos que este envejecimiento va a ser función de la forma de conducir, hábitos de carga y temperatura ambiente.

Para cuando se debe de realizar el cambio de batería no hay estipulados unos kilómetros como estamos acostumbrados en el vehículo de combustión para realizar su mantenimiento. Lo que sí que hacen por ejemplo el grupo Renault es considerar que una batería esta al final de su vida útil cuando esta pierda un 25% de la capacidad total, es decir, que la capacidad total se vea mermada hasta el 75 %.

6.3.4 Influencia de la temperatura y tamaño de rueda:

Como hemos hablado la autonomía es función de la temperatura ambiente, ya que la temperatura óptima para el funcionamiento de la batería es de 25°C, y será el sistema de refrigeración el encargado de mantener esta temperatura, que será más o menos costosa de conseguir según la temperatura ambiente. También el uso del aire acondicionado o la calefacción afectan a la autonomía y a la vida útil de la batería, así como el tamaño de la llanta, debido al mayor peso que se debe de poner en movimiento. En la Figura 6.24. podemos observar la variación de la autonomía cuando el vehículo circula a 120 km/h en función de la temperatura ambiente, la llanta y el uso del aire acondicionado/calefacción, estos datos se han realizado para el Tesla Model S P100D, gracias al simulador de Tesla.

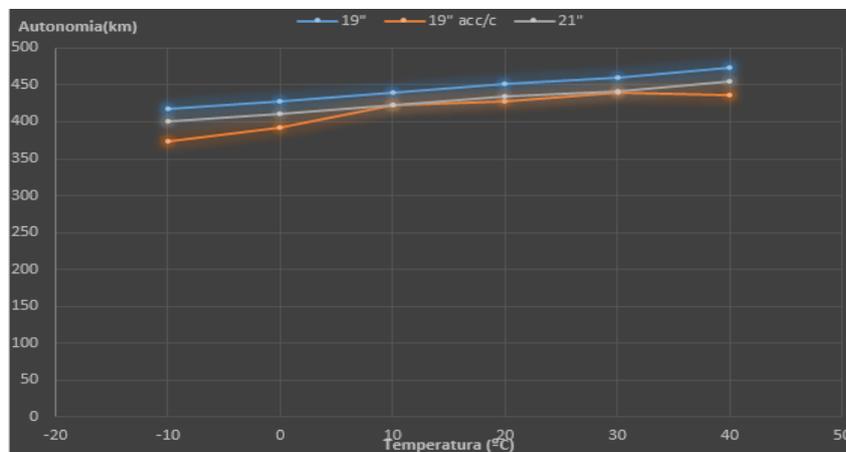


Figura 6.24 Gráfica autonomía-temperatura, en función del tamaño de rueda y uso del sistema de climatización.(elaboración propia).

Como podemos observar la mayor autonomía la proporciona el modelo con la llanta de 19\", y aunque hay momentos en el que el modelo con llanta de 19\" y uso del aire acondicionado o calefacción coincide con el modelo de la llanta de 21\", este vehículo con una mayor rueda posee menor autonomía. Por este motivo Tesla te ofrece llantas de distintos tamaños, además de llantas aerodinámicas como la llanta izquierda de la Figura 6.25, que presume de aumentar un 10% la autonomía del Tesla Model 3.



Figura 6.25 Tipos de llantas para el Tesla Model 3. (Rodríguez, 2017)

7 Conclusiones y trabajos futuros:

7.1 Conclusiones:

Las conclusiones que podemos extraer de nuestro trabajo a partir de los objetivos que fueron prefijados, son las siguientes:

- ✓ Se ha elaborado una base sobre los componentes por los que están formados los vehículos eléctricos y se han mostrado sus prestaciones comparándolas con el vehículo de combustión interna, sobre todo en el tema de baterías, ya que es uno de los componentes del vehículo eléctrico más importante. Sobre este asunto hemos podido observar que la tecnología líder actualmente, son las baterías de litio, frente a las antiguas baterías de plomo-ácido y Niquel-Metalhidruro.
- ✓ Se exponen los distintos ciclos de conducción que hay, sus características, su función y sus ventajas e inconvenientes entre ellos. Además se ha hablado del nuevo ciclo de homologación europeo, el cual a partir de septiembre de este año va a mostrarnos de una forma más veraz el consumo y las emisiones de los vehículos que actualmente están en el mercado.
- ✓ Hemos hablado de los distintos modelos para la simulación de las baterías que existen y se ha conseguido simular un vehículo eléctrico utilizando para un modelo de los citados por medio de la herramienta de programación Matlab con objeto de obtener sus parámetros de funcionamiento. Los resultados obtenidos constituyen una buena aproximación a los valores indicados por el fabricante.
- ✓ Por último, se debe destacar la gran dificultad que se ha encontrado a lo largo de este TFG para poder recopilar la información necesaria, debido a que es un sector industrial actualmente en investigación y desarrollo y, consecuentemente, muy opaco.

7.2 Trabajo futuros:

En este apartado vamos a hablar sobre los posibles trabajos futuros que se podrían desarrollar:

- ✓ Simular un vehículo bajo el ciclo NEDC y compararlo con el nuevo ciclo de homologación WLTP, cuando se tengan datos fiables de los valores en cada punto de la velocidad, y ver sus semejanzas y diferencias.
- ✓ Realización de las simulaciones para distintos modelos desarrollados en el TFG, y comparar los resultados entre ellos, para observar cual se adapta mejor para un determinado tipo de batería, capacidad e intensidad descargada. Incluso se podría realizar experimentos en laboratorio para observar la evolución de estas, además serviría de complemento a las materias impartidas en el grado.
- ✓ Se podría optimizar el código de cálculo, para que de esa manera sea más rápido de ejecutar, y si es posible englobar varios modelos distintos.
- ✓ Y por último utilizar otros vehículos de los que se disponga datos para ver la autonomía y prestaciones que ofrecen, y compararlo con las simulaciones de los modelos de baterías.

Bibliografía

- Alonso Ripoll, J. (2017). *Apuntes de la asignatura de transporte de tracción eléctrica*. Valladolid: Grado de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Valladolid.
- Baeza, M. (3 de Mayo de 2016). "Cómo extraer la máxima autonomía de un coche eléctrico". (Consultada: 10/05/2018). Obtenido de EL MOTOR: Cómo extraer la máxima autonomía de un coche eléctrico
- Brant, W. (2014). "Crystallography365".(Consultada: 03/04/2018). Obtenido de <https://www.iycr2014.org/learn/crystallography365/authors/william-brant>
- Chem, M., & Rincon-Mora, G. (2006). "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance." . IEEE Transactions on Energy Conversion.
- Corriente eléctrica. (27 de Septiembre de 2016). "Así funciona un freno que genera energía".(Consultada 20/05/2018). Obtenido de Corriente eléctrica : <https://corrienteelectronica.renault.es/asi-funciona-freno-capaz-generar-energia/>
- Dani meganeboy. (2017). "Coche Eléctrico ". (Consultada 21/03/2018). Obtenido de Aficionados a la mecánica: <http://www.aficionadosalamecanica.com/coche-electrico.htm>
- Dubarry, M., & Liaw, B. (2007). "Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries". Journal of Power Sources.
- electromovilidad. (s.f.). "Tipos de motores eléctricos".(Consultada: 29/04/2018). Obtenido de electromovilidad: <http://electromovilidad.net/tipos-de-motores-electricos/>
- EPA. (19 de Enero de 2017). "Dynamometer Drive Schedules".(Consultada 15/03/2018). Obtenido de Vehicle and Fuel Emissions Testing.United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>
- Fernandez, S. (31 de Enero de 2016). "Sistema de refrigeración de la batería del Chevrolet Bolt".(Consulta: 05/04/2018). Obtenido de Foro coches eléctricos: <http://forococheselectricos.com/2016/01/sistema-de-refrigeracion-de-la-bateria-del-chevrolet-bolt.html>
- Fernández, S. (10 de Julio de 2017). "Baterías en estado sólido.¿que son y que ventajas tienen frente a las de litio"(Consultada 05/04/2018)). Obtenido de xatakamovil: <https://www.xatakamovil.com/desarrollo/baterias-en-estado-solido-que-son-y-que-ventajas-tienen-frente-a-las-de-litio>

- Foro coches. (25 de Septiembre de 2015). "*VAG manipula las emisiones contaminantes de sus TDI - Vol 2*".(Consultada: 15/03/2018). Obtenido de <https://m.forocoches.com/foro/showthread.php?t=4542530&page=22>
- Fraile Mora, J. (2015). "*Máquinas eléctricas*". 7ª Edicion. Madrid: IBERGARCETA PUBLICACIONES.
- Gazzarri, J. (25 de Marzo de 2015). "*Modelado y Simulacion de Baterias Recargables con MATLAB y Simulink*". (Consultada 04/05/2018). Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/videos/modeling-and-simulation-of-rechargeable-batteries-with-matlab-and-simulink-spanish-100501.html>
- He, H., Xiong, R., & Fan, J. (2011). "*Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach*". Energies.
- He, H., Xiong, R., Guo, H., & Li, S. (2012). "*Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electrical vehicles*". UK: Energy Convers. Manag.
- HYE. (11 de Febrero de 2018). "*Todo lo que querías saber sobre las baterías de los coches eléctricos de Tesla*".(Consultada: 20/03/2018). Obtenido de Hibridos y eléctricos: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/mercado/todo-querias-saber-baterias-coches-electricos-tesla/20180209151346017420.html>
- Iglesias, R., Lago, A., Noguerras, A., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C., & Moure, M. (2014). "*Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda*". Vigo: Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Vigo.
- Jiang, J. (2015). "*Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*". Singapore: Wiley Publications.
- Jmcc500. (23 de Marzo de 2017). "*WLTC Class 2 Drive Cycle*".(Consultada: 15/03/2018). Obtenido de Wikipedia: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WLTC_Class_2.jpg
- Kim, T., Park, J., Chang, S., & Choi, S. (2012). "*The current move of lithium ion batteries towards the next phase*". Advanced Energy Materials.
- km77, R. (s.f.). "*Tesla Model S 85 kWh. Precio y características*".(Consultada 06/06/2018). Obtenido de km77.: <https://www.km77.com/coches/tesla/model-s/2013/estandar/estandar/model-s-85-kwh/datos/equipamiento>
- Larmanie, J., & Lowry, J. (2003). "*Electric Vehicle Technology*". Chichester,England: Jhon Wiley & Sons Ltd.

- López Martínez, J. (2015). "*Vehículos híbridos y eléctricos diseño del tren propulsor*". Madrid: Dextra.
- Molenda, J., & Molenda, M. (2011). "*Composite Cathode Material for Li-Ion Batteries Based on LiFePO4 System*". Intech Regular Publication.
- Noya, C. (02 de Noviembre de 2016). "*Nuevos datos muestran la baja degradacion de la bateria de Tesla.93% de capacidad después de 200.000 kilómetros.(Consultada: 25/03/2018)*". Obtenido de Foro coches eléctricos: <http://forococheselectricos.com/2016/11/nuevos-datos-muestras-la-baja-degradacion-de-la-bateria-de-tesla.html>
- Panasonic. (s.f.). "*Panasonic NCR 18650B Lithium Ion*". (Consultada: 26/04/2018). Obtenido de Panasonic: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf>
- Pérez, L., & Domínguez, J. (31 de Agosto de 2016). "*¿En qué consiste el ciclo de homologación de consumos?*".(Consultada 21/03/2018). Obtenido de 20 minutos: <https://amp.20minutos.es/noticia/2823311/0/tesla-model-s-ciclos-homologacion-nedc-epa/>
- Rodriguez Arribas, J., & Lafoz Pastor, M. (s.f.). "*La tecnología de los motores eléctricos en vehículos*". (Consultada 26/04/2018). Obtenido de Industriales ETSII | UPM: <http://asepa.es/pdf/ETSII.pdf>
- Rodriguez Cea, Á. I. (2017). "*Modelo para las baterias de Ion litio de un vehículo eléctrico*".Trabajo fin de máster . Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Rodriguez, B. (15 de Agosto de 2017). "*Las llantas del Tesla Model 3 pueden transformarse retirando sus tapas*".(Consultada 10/06/2018). Obtenido de Foro coches electricos : <https://forococheselectricos.com/2017/08/las-llantas-de-serie-del-tesla-model-3-pueden-transformarse-retirando-sus-tapas.html>
- Sabelotodo. (s.f.). "*Sistema de frenos del automóvil*". (Consultada: 20/03/2018). Obtenido de Sabelotodo: <http://www.sabelotodo.org/automovil/frenos.html>
- Salva_malprtida. (9 de Abril de 2012). "*NEDC, 10-15, EPA ¿Cómo se homologa el consumo?*". (Consulada: 16/03/2018). Obtenido de Feelmotor: <http://feelmotor.com/nedc-10-15-epa-como-se-homologa-el-consumo/>
- Sanchez Criado, C. (s.f.). "*Baterias de Litio-Azufre, diez veces mas densidad*".(Consultada 05/04/2018). Obtenido de Movilidad Eléctrica: <https://movilidadelectrica.com/bateria-de-litio-azufre/>
- TESLA. (2018). "*Tesla model S*".(Consultada 05/05/2018). Obtenido de TESLA: https://www.tesla.com/es_ES/models

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

- Tinaut, F. (2016). *"Apuntes sobre Sistemas de Propulsion Alternativos"*. Valladolid: Master en Ingenieria de Automocion.Universidad de Valladolid.
- Tremblay, O. (2009). *"Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV"*. World Electric Vehicle Journal V.
- Viñuela, S. (24 de Febrero de 2017). *"Bateria para coches electricos: precio"*. (Consultada: 28/03/2018). Obtenido de Autobild: <https://www.autobild.es/noticias/baterias-para-coche-electrico-precios-313261>
- Wikipedia. (2018 de Mayo de 2018). *"Tesla Model S"*.(Consultada 08/06/2018). Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S
- Yamaguchi, J. (2011). *"Bringing the Leaf to life"*. SAE Vehicle Electrification Journal.
- Zaragoza, I. (28 de Febrero de 2017). *"A vueltas con las polémicas pegatinas de la DGT"*. (Consultada: 19/06/2018). Obtenido de Heraldo: <https://www.heraldo.es/noticias/aragon/2017/02/28/a-vueltas-con-las-polemicas-pegatinas-dgt-1161589-300.html>

Anexos:

En este anexo vamos a adjuntar la ficha técnica de nuestro Tesla Model S 85 kWh.

MOTOR, PRESTACIONES Y CONSUMO	
Tipo de vehículo	Berlina eléctricas
Tipo de motor eléctrico	Trifásico, motor de inducción de cuatro polos de corriente alterna con rotor de cobre.
Tipo de Corriente	AC
Potencia máxima CV	378 CV
Velocidad máxima	225 km/h
Aceleración de 0 a 100	5,6 s
Autonomía en ciudad	502 km
Autonomía EPA	426 km
Autonomía 80 km	480 km

TRANSMISIÓN	
Tracción	Trasera
Tipo de Embrague	Automático
Numero de velocidades	Una sola marcha con una relación de 9,73:1

Batería	
Tipo de batería	Iones de litio Panasonic 18650
Capacidad	85 kWh
Extraíble	No
Tipo de cargador	Cargador incorporado de 10 kW, compatible con 265 V, 45-65 Hz, 1-40. Compatible con los adaptadores J1772
Numero de celdas	7.104 celdas en 16 módulos en serie
Tipo de carga/ Tiempo 100 %	Lenta: 230 V a 3,3 kW -> 12 h Ultra-rápida: 90 a 120 kW -> 20 minutos = 200 km
Tipo de carga/ Tiempo 80 %	Semi-rápida: 10 kW -> 1h = 500 km
Vida/ Ciclos de carga hasta 80 %	8 años, sin límite de km

Dimensiones, peso y capacidad.	
Coefficiente de resistencia a la rodadura	0.24 r
Largo	4976 mm
Ancho	1963 mm
Altura	1435 mm
Distancia entre ejes	2959 mm
Carga min/max autorizada	2108 kg
Numero de puertas	5
Número de plazas	5+2 opcionales para niños

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Chasis	
Suspensión delantera	De doble horquilla, eje virtual de dirección y muelle.
Suspensión trasera	Independiente multi-link con muelles.
Frenos delanteros	Frenos antibloqueo ABS con discos ventilados y freno de estacionamiento electrónico. 355 mm x 32 mm.
Frenos traseros	Frenos antibloqueo ABS con discos ventilados y freno de estacionamiento electrónico. 365 mm x 28 mm
Neumáticos	19" Goodyear Eagle RSA2, 245/45R19
Llantas	Llantas de aluminio de 19 pulgadas
Dirección	Electrónica de cremallera de relación variable y sensible a la velocidad.

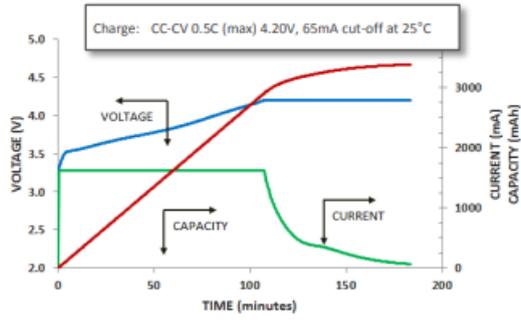
También se adjunta la ficha de características de las baterías de nuestro vehículo.

Panasonic
Lithium Ion
NCR18650B

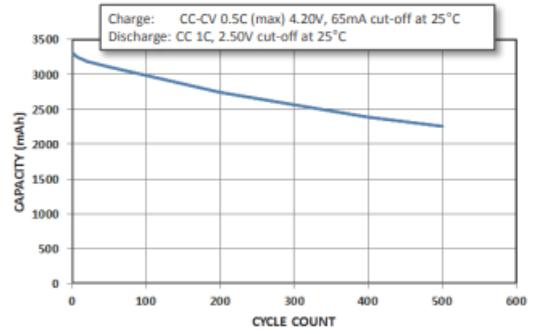
Features & Benefits	Specifications	Dimensions														
<ul style="list-style-type: none"> High energy density Long stable power and long run time Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc. <p style="font-size: 0.8em; margin-top: 10px;">* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">Rated capacity⁽¹⁾</td> <td>Min. 3200mAh</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">Capacity⁽²⁾</td> <td>Min. 3250mAh Typ. 3350mAh</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">Nominal voltage</td> <td>3.6V</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">Charging</td> <td>CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">Weight (max.)</td> <td>48.5 g</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">Temperature</td> <td>Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">Energy density⁽³⁾</td> <td>Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg</td> </tr> </table> <p style="font-size: 0.7em; margin-top: 5px;">⁽¹⁾ At 20°C ⁽²⁾ At 25°C ⁽³⁾ Energy density based on bare cell dimensions</p>	Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 3200mAh	Capacity ⁽²⁾	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh	Nominal voltage	3.6V	Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs	Weight (max.)	48.5 g	Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C	Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg	<p style="font-size: 0.8em; color: red; margin-top: 5px;">For Reference Only</p>
Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 3200mAh															
Capacity ⁽²⁾	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh															
Nominal voltage	3.6V															
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs															
Weight (max.)	48.5 g															
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C															
Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg															

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

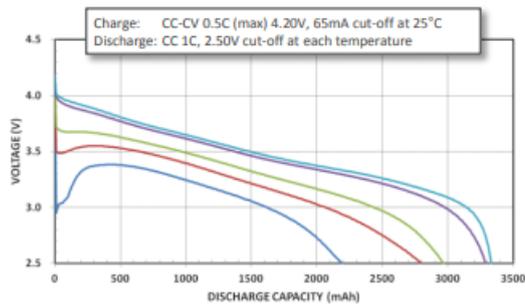
Charge Characteristics



Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)



Discharge Characteristics (by rate of discharge)

