



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

Propulsión en vehículos eléctricos

Autor:

Martínez Escudero, Manuel Alejandro

Tutor:

Alonso Ripoll, Francisco Javier

**Departamento de Ingeniería
Eléctrica**

Valladolid, Enero de 2017.

Resumen

Este trabajo del vehículo eléctrico, pone en relevancia su interés actual como alternativa a los vehículos de combustión interna; para avanzar en nuestra sociedad actual hacia un modelo de movilidad eléctrica que utilice esta tecnología especialmente interesante para su uso en las ciudades. Para comprender cómo funciona esta tecnología, explicaremos las diferentes variantes de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica que puede equipar, así como también los distintos tipos de motores eléctricos empleados en la industria del automóvil eléctrico, para finalmente pasar a realizar un estudio de la propulsión en vehículos eléctricos, explicando los diferentes elementos que conforman un tren propulsivo, que características y prestaciones reales ofrece, apoyándonos para ello en dos ejemplos concretos de la industria como son el automóvil eléctrico GM EV1 y el scooter eléctrico Scoot'Elec; a través de los cuales podremos conocer las prestaciones y autonomía que pueden ofrecer realmente los vehículos eléctricos.

Palabras Clave

Vehículos Eléctricos, Baterías, Motores eléctricos, Propulsión, Prestaciones.

Agradecimientos

Desde estas breves líneas quiero agradecer a todos aquellos que me han apoyado durante la realización de este trabajo fin de grado. En especial se lo agradezco a mi madre, mis abuelos y mi familia, por su incondicional apoyo constate no solo durante este trabajo, sino también durante toda la carrera.

A mis compañeros y amigos Pedro y Gonzalo, sin ellos el camino a recorrer durante este tiempo hubiera sido mucho más difícil.

Y a mi compañera de carrera y de vida Cristina, mi mayor apoyo durante todos estos años.

También agradecer a mi tutor Francisco Javier Alonso Ripoll, por darme la oportunidad de realizar este trabajo y por toda la ayuda prestada.

¡Gracias a todos, va por vosotros!

Índice

Resumen	3
Palabras Clave	3
Agradecimientos	5
Índice	7
Lista de figuras	10
Lista de tablas	13
1. Introducción	15
1.1. Justificación y motivación	16
1.2. Objetivos	17
1.3. Estructura	18
2. Estado de la tecnología	19
2.1. Revisión histórica del vehículo eléctrico [3]	19
2.1.1. Los primeros vehículos eléctricos	20
2.1.2. La edad de Oro de los vehículos eléctricos	21
2.1.3. Declive del vehículo eléctrico y actual resurgimiento	22
2.2. Definición y esquema conceptual de un vehículo eléctrico [5]	24
2.3. Razones para usar el vehículo eléctrico	26
2.3.1. Sostenibilidad y eficiencia	26
2.3.2. Reducción de las emisiones de gases contaminantes	28
2.3.3. Reducción de la contaminación acústica [8]	29
2.3.4. Ventajas técnicas del vehículo eléctrico	29
2.4. Clasificación según el grado de electrificación	30
2.4.1. Vehículos híbridos	31
2.4.1.1. Vehículos con GHE baja (micro hybrid) [5]	31
2.4.1.2. Vehículos con GHE media (mild hybrid) [5]	31
2.4.1.3. Vehículos con GHE alta (full hybrid)	32
2.4.1.3.1. Configuración en serie [5]	32
2.4.1.3.2. Configuración en paralelo [5]	33
2.4.1.3.3. Configuración en serie-paralelo [5]	34
2.4.2. Vehículo híbrido enchufable (plug-in hybrid) [13]	34
2.4.3. Vehículo eléctrico puro [13]	35
2.5. Motocicleta eléctrica [3]	36
2.6. Futuro del vehículo eléctrico [3,10]	37

3. Sistemas de almacenamiento de la energía	39
3.1. Baterías	39
3.1.1. Principio de funcionamiento [14]	39
3.1.2. Parámetros de las baterías	41
3.1.3. Tipos de baterías [14]	42
3.1.3.1. Plomo-ácido	43
3.1.3.2. Níquel-cadmio	44
3.1.3.3. Níquel-metal-hidruro	45
3.1.3.4. Litio-ión	47
3.1.3.5. Litio polímero	48
3.1.3.6. Sodio-azufre	48
3.1.3.7. Sodio-metal cloruro	49
3.1.3.8. Aluminio-aire	50
3.1.3.9. Zinc-aire	51
3.1.4. Criterios de selección de las baterías [3]	52
3.1.5. Modelado y simulación de baterías [15]	53
3.2. Ultracondensadores [16]	57
3.3. Pila de combustible [4]	58
4. Motores eléctricos de tracción	61
4.1. Introducción [4,14]	61
4.2. Características ideales de la tracción en vehículos [3,4,16]	64
4.3. Clasificación [4]	68
4.4. Motores de flujo radial	69
4.4.1. Motor de corriente continua	70
4.4.1.1. Principio de funcionamiento [15]	70
4.4.1.2. Característica par-velocidad [15]	72
4.4.1.3. Configuraciones [14,15]	72
4.4.1.4. Control del motor de corriente continua [14,15]	73
4.4.2. Motor de reluctancia conmutada	74
4.4.2.1. Aspectos constructivos [4,14]	76
4.4.2.2. Principio de funcionamiento [15]	76
4.4.2.3. Modos de operación [16]	78
4.4.2.4. Accionamiento de un vehículo eléctrico basado en el motor de reluctancia conmutada [14,16]	80
4.4.3. Motores de imanes permanentes	81
4.4.3.1. Configuraciones [14]	82
4.4.3.2. Motor síncrono de imanes permanentes [19]	83
4.4.3.3. Motor de continua sin escobillas o brushless [15,16]	85
4.4.3.4. Propiedades de los materiales de imanes permanentes [15,16]	87
4.4.3.4.1. Alnicos	88
4.4.3.4.2. Ferritas	88
4.4.3.4.3. Tierras raras	88
4.4.4. Motor de inducción	89

4.4.4.1. Aspectos constructivos [14,15]	90
4.4.4.2. Motores de inducción en vehículos eléctricos [18,20]	91
4.4.4.3. Principio de funcionamiento [4,14]	91
4.4.4.4. Circuito monofásico equivalente [4]	92
4.4.4.5. Modos de operación [1,16]	96
4.4.4.6. Accionamiento de un vehículo eléctrico basado en el motor de inducción	99
4.4.4.6.1. Misión del inversor [1,16,21]	99
4.4.4.6.2. Tecnología del inversor [4]	100
4.4.4.6.3. Modo de operación six-step [1]	102
4.4.4.6.4. Modo de operación PWM senoidal [1]	104
4.4.4.6.5. Sistema de control [21]	106
4.4.4.6.6. Soluciones comerciales de módulos de control [4,22]	108
4.5. Motores de flujo axial [4]	109
4.5.1. Motores de flujo axial de imanes permanentes	109
4.5.1.1. Topologías y geometrías	111
4.6. Motores de flujo transversal [4]	113
4.6.1. Motor de flujo transversal de imanes permanentes	114
4.7. Criterios de selección de los motores [14,15]	115
5. Fundamentos de propulsión en vehículos eléctricos	119
5.1. Configuraciones del tren de potencia [14,16]	119
5.2. Fuerza de tracción [15]	124
5.2.1. Resistencia a la rodadura.	124
5.2.2. Resistencia aerodinámica	125
5.2.3. Fuerza de ascenso en pendiente	125
5.2.4. Fuerza de aceleración	125
5.2.5. Fuerza de tracción total	127
5.3. Prestaciones del vehículo eléctrico [15]	127
5.4. Ciclos de conducción y autonomía [15]	133
6. Conclusiones	147
7. Trabajos Futuros	149
Bibliografía	151
Anejos	155

Lista de figuras

FIG 2.1 Vehículo Eléctrico de Morrison. [3]	20
FIG 2.2 El Jamais Contente. [3]	20
FIG 2.3 Lohner-Porsche con cuatro motores en cada rueda. [3]	21
FIG 2.4 Lohner-Porsche híbrido. [3]	21
FIG 2.5 Modelo de Detroit Electric dotado de dos motores uno en cada eje. [3]	22
FIG 2.6 EL EV1 de General Motors. [3]	23
FIG 2.7 Vehículos de diferentes tecnologías vendidos en Estados Unidos durante el siglo XX. [4]	24
FIG 2.8 Esquema conceptual de la configuración de un vehículo eléctrico. [5]	25
FIG 2.9 Comparación de ahorro energético entre vehículo diésel y eléctrico. [7]	27
FIG 2.10 Rendimientos de la fuente a la rueda del vehículo eléctrico suponiendo un mix de energías renovables. [4]	28
FIG 2.11 Clasificación de los vehículos eléctricos híbridos en función del GHE. [5]	31
FIG 2.12 Gráfica funcionamiento vehículo híbrido. [12]	32
FIG 2.13 Configuración híbrida serie. [5]	33
FIG 2.14 Configuración híbrida paralelo. [5]	33
FIG 2.15 Configuración híbrida serie-paralelo. [5]	34
FIG 2.16 Estructura del vehículo híbrido eléctrico enchufable. [13]	35
FIG 2.17 Estructura del vehículo eléctrico puro. [13]	35
FIG 2.18 Evolución esperada de vehículos en circulación por tipo de combustible 2000–2050. [10]	37
FIG 2.19 Proporción de vehículos eléctricos e híbridos enchufables 2000–2050. [10]	38
FIG 2.20 Evolución esperada de venta de vehículos eléctricos e híbridos enchufables 2010–2020. [10]	38
FIG 3.1 Esquema de una celda de batería. [14]	40
FIG 3.2 Reacción durante el proceso de descarga de una batería de Pb-ácido. [14]	43
FIG 3.3 Reacción durante el proceso de carga de una batería de Pb-ácido. [14]	44
FIG 3.4 Reacciones durante la descarga en una batería de Ni-Cd. [14]	45
FIG 3.5 Reacciones durante la descarga en una batería de Ni-MeH. [14]	46
FIG 3.6 Esquema de una celda de Li-ión. [14]	47
FIG 3.7 Esquema de una celda de una batería de sodio-metal cloruro. [14]	49
FIG 3.8 Reacciones durante la descarga en una batería de sodio-metal cloruro. [14]	50
FIG 3.9 Densidades de energía de las diferentes tecnologías de baterías. [4]	52
FIG 3.10 Circuito equivalente de una batería conectada la carga. [15]	53
FIG 3.11 Descarga de una batería de plomo-ácido a corriente constante implementado en el programa DescargaBatPbA.m. [elaboración propia]	55
FIG 3.12 Descarga a corriente constante de una batería de Níquel-Cadmio implementado en el programa NiCd.m. [elaboración propia]	56
FIG 3.13 Descarga a potencia constante de una batería de plomo-ácido implementado en el programa PbAcido.m. [elaboración propia]	57
FIG 3.14 Principio básico de un condensador eléctrico de doble cara. [16]	58
FIG 3.15 Célula de combustible PEM. [17]	58
FIG 4.1 Esquema tipos de motores en automoción. [14]	63
FIG 4.2 Perfil ideal de la relación par/potencia – velocidad en un vehículo. [16]	65
FIG 4.3 Potencia, par y consumo para un vehículo de combustión interna. [16]	66
FIG 4.4 Potencia, par y rendimiento para un vehículo de combustión interna. [4]	66

FIG 4.5 Marcha adecuada para velocidad de giro del motor en función de la velocidad del vehículo en motores de combustión interna. [4]	67
FIG 4.6 Perfil de relación par velocidad de un motor de combustión interna. [3]	67
FIG 4.7 Curvas características de un motor eléctrico para $x = 2, 4$ y 6 . [16]	68
FIG 4.8 Clasificación de los motores eléctricos de acuerdo a la dirección del flujo magnético. [4]	69
FIG 4.9 Forma típica de un motor de flujo radial. [4]	69
FIG 4.10 Principio de funcionamiento básico de un motor de corriente continua. [15]	71
FIG 4.11 a) Corte transversal de un motor de corriente continua de 4 polos (las líneas de puntos muestran el flujo magnético). b) Convenio utilizado para indicar la dirección del flujo de la corriente en los hilos. [15]	71
FIG 4.12 Característica par – velocidad de un motor de corriente continua. [15]	72
FIG 4.13 Diferentes configuraciones del motor de corriente continua. Izqda.: shunt, centro: serie, drcha: excitación independiente. [15]	72
FIG 4.14 Influencia de la variación de la tensión de la armadura sobre la característica par - velocidad de un motor de corriente continua. [15]	74
FIG 4.15 Influencia de la variación del campo magnético sobre la característica par - velocidad de un motor de corriente continua. [15]	74
FIG 4.16 Esquema del principio de funcionamiento básico de un motor de reluctancia conmutada. [15]	77
FIG 4.17 Esquema de funcionamiento de un motor de reluctancia conmutada con topología (6/4). [15]	77
FIG 4.18 Funcionamiento a baja velocidad (por debajo de la velocidad base) de un motor de reluctancia conmutada. [16]	78
FIG 4.19 Funcionamiento a alta velocidad (por encima de la velocidad base) de un motor de reluctancia conmutada. [16]	79
FIG 4.20 Curvas características de un motor de reluctancia conmutada. [16]	79
FIG 4.21 Esquema de un sistema de propulsión con motor de reluctancia conmutada. [14]	80
FIG 4.22 Esquema de conexión de un motor de reluctancia conmutada a su fuente de energía. [16]	80
FIG 4.23 Formas de onda de un motor síncrono de imanes permanentes (flujo sinusoidal). [14]	82
FIG 4.24 Formas de onda en un motor de continua sin escobillas (flujo trapezoidal). [14]	82
FIG 4.25 Corte transversal de un motor síncrono de imanes permanentes; (a) con disposición periférica de los imanes; (b) con disposición enterrada de los imanes. [1]	84
FIG 4.26 Motor síncrono de imanes permanentes de un Chevrolet Spark EV. [18]	85
FIG 4.27 Esquema funcionamiento básico de un motor brushless. [15]	86
FIG 4.28 Diagrama que muestra una disposición de tres devanados en el estator de un motor brushless. [15]	86
FIG 4.29 Sistema de control de un motor brushless. [16]	87
FIG 4.30 Curvas de desmagnetización para diferentes materiales. [16]	88
FIG 4.31 Corte transversal de un motor de inducción (izquierda) y rotor de jaula de ardilla (derecha). [15]	90
FIG 4.32 Motor de inducción de General Motors. [18]	91
FIG 4.33 Motor de inducción Tesla Model S. [20]	91
FIG 4.34 Circuito equivalente de la máquina de inducción. [4]	93
FIG 4.35 Característica de potencia del motor de inducción obtenido con la aplicación asincron.m. [elaboración propia]	94
FIG 4.36 Característica de par del motor de inducción obtenida con la aplicación asincron.m. [elaboración propia]	95
FIG 4.37 Característica rendimiento del motor de inducción obtenida con la aplicación asincron.m. [elaboración propia]	96

FIG 4.38 Curva par-velocidad de un motor de inducción. [16]	97
FIG 4.39 Curvas par-velocidad variando la tensión y manteniendo constante la frecuencia para un motor de inducción. [1]	98
FIG 4.40 Curvas par-velocidad variando la frecuencia y manteniendo constante la tensión para un motor de inducción. [1]	98
FIG 4.41 Funcionamiento sobre la envolvente de las curvas par-velocidad para un motor de inducción. [1]	99
FIG 4.42 Característica par-velocidad de un motor de inducción bajo control V/f. [21]	100
FIG 4.43 Requerimientos de potencia y tensión en aplicaciones de tracción. El diámetro de los círculos indica el ancho de banda. [4]	101
FIG 4.44 Inversor trifásico con IGBT para el accionamiento de un motor de inducción. [4]	101
FIG 4.45 inversor ideal. [1]	102
FIG 4.46 Secuencia de operación de los IGBT de un inversor según el modo de operación six-step. [1]	103
FIG 4.47 Señales de disparo y tensiones de salida en un modo de operación six-step. [1]	103
FIG 4.48 Señales empleadas en el modo de operación PWM senoidal. [1]	105
FIG 4.49 Modo de operación de los IGBT en un modo de control PWM senoidal. [1]	105
FIG 4.50 Cuadrantes del espacio par-velocidad de un motor de inducción. [21]	107
FIG 4.51 Diagrama de bloques del sistema de control de un vehículo eléctrico basado en un control directo del par. [21]	108
FIG 4.52 Arquitectura empleada por Semikron en sus sistemas SKAI para aplicaciones de automoción. [22]	109
FIG 4.53 Forma típica de un motor de flujo axial. [4]	109
FIG 4.54 Motor eléctrico integrado en la rueda de la compañía Protean electric. [23]	110
FIG 4.55 Formas constructivas de los motores de flujo axial de imanes permanentes. [4]	112
FIG 4.56 Forma típica de un motor de flujo transversal. [4]	113
FIG 4.57 Componentes de un motor de flujo transversal. [4]	114
FIG 4.58 Mapa de eficiencia para un motor de imanes permanentes de 30KW. [15]	116
FIG 4.59 Mapa de eficiencia medido en dos cuadrantes para un motor típico de inducción en aplicaciones de tracción. [4]	116
FIG 4.60 Mapa de potencias específicas de diferentes motores en distintas potencias. Escala logarítmica. [15]	117
FIG 5.1 Tren de potencia conceptual para un automóvil. [16]	120
FIG 5.2 Posibles configuraciones del tren de potencia en un vehículo eléctrico. ME: motor eléctrico; E: embrague; CC: caja de cambios; R: reductora; D: diferencial. [14]	121
FIG 5.3 Tren de potencia General Motors EV1. [24]	122
FIG 5.4 Tren de potencia de Audi A6 hybrid. [25]	123
FIG 5.5 Tren de potencia Mercedes-Benz SLS AMG E-CELL. [26]	123
FIG 5.6 Fuerzas que actúan sobre un vehículo ascendiendo por una pendiente. [15]	124
FIG 5.7 Representación de la transmisión del vehículo eléctrico. [15]	126
FIG 5.8 Gráfica Velocidad/Tiempo del Scoot'Elec de Peugeot implementado en ScootA.m. [elaboración propia]	130
FIG 5.9 Gráfica Distancia/Tiempo del Scoot'Elec de Peugeot implementado en ScootA.m. [elaboración propia]	130
FIG 5.10 Gráfica Velocidad/Tiempo del GM EV1 implementado en GmEv1.m. [elaboración propia]	132
FIG 5.11 Gráfica Distancia/Tiempo del GM EV1 implementado en GmEv1.m. [elaboración propia]	132
FIG 5.12 Ciclo de conducción SFUDS obtenido de Gmev1_sfuds.m. [elaboración propia]	134
FIG 5.13 Ciclo de conducción HWFET obtenido de Gmev1_HWFET.m. [elaboración propia]	134

FIG 5.14 Ciclo de conducción US06 obtenido de Gmev1_US06.m. [elaboración propia]	135
FIG 5.15 Ciclo de conducción ECE-15 obtenido de Gmev1_ECE.15.m. [elaboración propia]	135
FIG 5.16 Ciclo de conducción EUDC obtenido de Gmev1_EUDC.m. [elaboración propia]	136
FIG 5.17 Ciclo de conducción ECE-47 obtenido de Scooter_Ece47.m. [elaboración propia]	136
FIG 5.18 -Esquema del flujo de potencias en un vehículo eléctrico. [14]	137
FIG 5.19 Diagrama de flujo para la simulación de la autonomía de un vehículo eléctrico. [15]	140
FIG 5.20 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Scooter_Ece47.m. [elaboración propia]	142
FIG 5.21 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_sfuds.m. [elaboración propia]	143
FIG 5.22 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_HWFET.m. [elaboración propia]	143
FIG 5.23 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_US06.m. [elaboración propia]	144
FIG 5.24 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_ECE15.m. [elaboración propia]	144
FIG 5.25 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_EUDC.m. [elaboración propia]	145

Lista de tablas

Tabla 2.1 Comparación de eficiencia energética de la fuente a la rueda. [8]	27
Tabla 2.2 Comparación de emisiones acústicas entre un vehículo eléctrico y un vehículo con motor de combustión interna. [8]	29
Tabla 2.3 Ventajas del vehículo eléctrico frente al vehículo de combustión interna. [4]	30
Tabla 3.1 Parámetros para las baterías de plomo-ácido. [15]	44
Tabla 3.2 Parámetros para las baterías de níquel-cadmio. [15]	45
Tabla 3.3 Parámetros para las baterías de níquel-metal hidruro. [15]	46
Tabla 3.4 Parámetros para las baterías de litio-ión. [15]	48
Tabla 3.5 Parámetros para las baterías de sodio-azufre. [15]	49
Tabla 3.6 parámetros para las baterías de sodio-metal cloruro. [15]	50
Tabla 3.7 Parámetros del batería de aluminio-aire. [15]	51
Tabla 3.8 Parámetros para las baterías de zinc-aire. [15]	52
Tabla 4.1 Rendimiento mínimo en motores de inducción trifásicos de 4 polos. [15]	115
Tabla 5.1 Parámetros característicos de los ciclos de conducción. [15,27]	137
Tabla 5.2 Resultados autonomía del vehículo eléctrico para diferentes ciclos de conducción. [elaboración propia]	145

1. Introducción

En la actualidad tanto cuestiones ambientales como económicas proporcionan un impulso fundamental a la hora de desarrollar vehículos limpios, eficientes y sostenibles para el transporte urbano. Los automóviles constituyen una parte integral de nuestra vida cotidiana, es por ello que las continuas emisiones de los motores de combustión interna de los vehículos convencionales son responsables de constituir una de las principales fuentes de contaminación urbana que provoca el efecto invernadero, y promueve en cierta medida el calentamiento global. Además, la fuerte dependencia del petróleo como única fuente de energía para vehículos conlleva unas implicaciones económicas y políticas, que pueden desencadenar en una crisis aguda de las reservas mundiales.

El número de automóviles en nuestro planeta se ha visto duplicado en los últimos diez años situándose por encima de los mil millones de unidades; y el progresivo incremento del número de vehículos con motor de combustión interna que aparecen en la carretera cada año no hace más que agravar esta situación [1].

Una solución propuesta ante este problema sería la implantación del vehículo eléctrico como medio de transporte generalizado, ya que presenta la ventaja ambiental de no generar localmente emisiones contaminantes que sí produce el motor de combustión. Teniendo en cuenta este factor unido al hecho de que dos terceras partes de la población mundial vive en núcleos urbanos, justifica el gran interés de esta tecnología para realizar desplazamientos dentro de las ciudades.

Un aspecto a considerar a la hora de implantar el vehículo eléctrico, sería conocer el sistema de generación eléctrica, ya que, si el porcentaje más alto de generación proviene de centrales térmicas que utilizan combustibles fósiles como materia prima, la emisión de compuestos contaminantes y CO₂ sería muy elevada, independientemente de la ubicación. Por lo que debemos considerar todo el ciclo desde la fuente de energía a la rueda, y analizar el comportamiento ambiental desde la central de generación hasta el propio vehículo. Por lo tanto, el concepto de “cero emisiones” solo es cierto en un nivel local, donde se utilizaría el propio vehículo, pero en el conjunto del ciclo el nivel de emisiones depende de la tecnología aplicada para producir la electricidad.

El impulso que se ha dado al vehículo eléctrico en estos últimos años, no solo está condicionado por la necesidad de reducir la dependencia de los recursos fósiles y los problemas medioambientales que conllevan los vehículos convencionales, sino también se ha visto influenciado por los avances en la capacidad de carga de las baterías; así como también por la irrupción de la electrónica de potencia aplicada a la tecnología de los vehículos eléctricos que ha desarrollado y favorecido la viabilidad presente del mismo. Estos avances en electrónica y control de la potencia, así como

en la informática aplicada a los sistemas de conducción han sido los causantes de esta nueva corriente de vehículos eléctricos modernos.

Aunque el vehículo eléctrico constituya ya una realidad tecnológica presente en nuestros días, todavía no supone una alternativa a corto plazo que pueda sustituir por completo al vehículo con motor de combustión interna. Tanto la tecnología híbrida como la puramente eléctrica serán en los próximos años complementarias, ya que esta última está sujeta a la limitación de autonomía de las baterías, así como el tiempo para su recarga, condicionando ambos factores su plena implantación.

Sin embargo, desde el punto de vista de los posibles compradores el precio del vehículo eléctrico sigue siendo demasiado elevado en comparación al de un vehículo con motor de combustión interna. Aunque el coste de la energía puede llegar a ser hasta tres o cuatro veces inferior al de combustión, y en unos pocos años el ahorro energético pueda amortizar el desembolso inicial; el elevado precio inicial de la compra marca claramente la decisión final de adquisición de una u otra tecnología.

Un factor necesario en la irrupción del vehículo eléctrico sería la disponibilidad de una red de electrolineras que nos permitan realizar la recarga de las baterías, que por el momento no constituyen una opción competitiva frente a la facilidad con la que se puede llenar el depósito de carburante en vehículos de combustión interna. Muchas son las marcas que comercializan modelos con más de 160 km de autonomía, pero habría que acelerar la implantación de estructuras de recarga que faciliten la movilidad eléctrica, promoviendo de esta manera la elección de los vehículos eléctricos entre los ciudadanos.

No obstante, y a pesar de estos problemas que todavía tenemos que superar, la venta de vehículos eléctricos no deja de crecer. En España en el año 2015 se alcanzó el record de ventas de vehículos puramente eléctricos con un aumento del 28,5% respecto al año anterior con un total de 2.342 unidades vendidas, siendo los modelos más vendidos en este segmento el Smart Fortwo Electric con 388 unidades, seguido del Nissan Leaf con 344 y el Renault ZOE con 312 [2].

1.1. Justificación y motivación

Como hemos expuesto anteriormente, en la actualidad nuestra sociedad se enfrenta a problemas e innovaciones cada vez más importantes que influyen en el futuro colectivo. Uno de estos principales retos es el uso eficiente y sostenible de los recursos. La industria del automóvil se ve particularmente afectada por tales problemas de forma directa, y lleva tiempo trabajando para encontrar soluciones satisfactorias. La investigación y el diseño de vehículos cada vez más eficientes y respetuosos con el medioambiente forma parte de las respuestas deseadas por todos. Es aquí donde nace la necesidad de avanzar hacia un modelo de transporte

eficiente, sostenible y que mantenga un nivel de prestaciones similar o incluso mejor del cual provenimos actualmente. Es por ello, que la tecnología del vehículo eléctrico se sitúa como una de las más fuertes para que nos ayude a afrontar este reto y así poder superarlo.

Un ejemplo de este problema de actual relevancia se da en el entorno de la movilidad urbana, en el cual están surgiendo con mayor frecuencia nuevas y continuas restricciones de circulación que los gobiernos están imponiendo a los vehículos gasolina y diésel debido a la alta concentración de contaminantes en el aire de las ciudades. Como ejemplo de ellos podríamos nombrar Londres, donde se limita la circulación a cierto tipo de vehículos en función de sus emisiones contaminantes. También en España, grandes ciudades como Madrid y Barcelona, han iniciado programas de limitación de acceso y circulación a vehículos con motores de combustión interna.

Todo ello no hace más que poner de relieve y justificar la necesidad de utilizar vehículos eléctricos como medio de transporte en las ciudades; y son estas importantes razones las que me impulsaban a realizar un trabajo fin de grado que pudiera explicar dicha tecnología poniendo en contexto su gran importancia actual.

No obstante, otra de las motivaciones iniciales que me llevaron a elegir este trabajo, fue mi gran interés por temas relacionados con la automoción; y el haber cursado la asignatura optativa de cuarto curso “Sistemas de transporte de tracción eléctrica” del grado de ingeniería eléctrica no hizo más que acentuar dicho deseo.

No habría que olvidar que este trabajo, además brinda la posibilidad de profundizar en el conocimiento de temas que estarán en un futuro en el debate técnico, económico, social o político; y así como también podría influirme decisivamente en el futuro desarrollo profesional como ingeniero.

1.2. Objetivos

Aunque existen numerosos tipos de vehículos eléctricos (trenes, tranvías, embarcaciones, bicicletas, autobuses...) este trabajo se centra por completo en el automóvil eléctrico, así como también se hace un pequeño inciso sobre la motocicleta eléctrica. La serie de objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de este trabajo son los siguientes:

- Proporcionar una base explicativa ofreciendo una visión detallada del estado actual de la tecnología de propulsión de los vehículos eléctricos, que ayude a facilitar su estudio y comprensión.
- Impulsar la implantación de la tecnología del vehículo eléctrico, detallando este nuevo concepto de movilidad como una alternativa necesaria a los vehículos con motor de combustión interna.

- Detallar los diferentes tipos de baterías, motores eléctricos y configuraciones del tren de potencia, utilizados en la propulsión de vehículos eléctricos.
- Proporcionar una serie de aplicaciones informáticas que ayuden a comprender como funcionan los componentes principales de un sistema propulsivo de un vehículo eléctrico, y que características pueden ofrecer, así como verificar su comportamiento.
- Acabar con ciertas ideas equivocadas sobre los vehículos eléctricos (poco robustos, con autonomía insuficiente y prestaciones muy bajas).
- Ampliar conocimientos sobre la materia tratada.

1.3. Estructura

Para comprender como se estructura la memoria del presente trabajo, se muestra a continuación una descripción de los temas abordados en cada uno de sus capítulos:

El **Capítulo 1** comienza con una introducción al trabajo, la justificación y motivaciones que llevaron a su realización, además de delimitar los objetivos que se pretenden alcanzar, así como la estructura de la que se compone.

El **Capítulo 2** introduce el estado de la tecnología del vehículo eléctrico: su evolución histórica, definición, razones para su uso, clasificación, introducción a la motocicleta eléctrica y previsible futuro de la tecnología.

El **Capítulo 3** trata sobre los sistemas de almacenamiento de la energía utilizados en el vehículo eléctrico, explicando las baterías, los ultracondensadores y la pila de combustible.

El **Capítulo 4** está dedicado a los diferentes tipos de motores eléctricos de tracción utilizados en la propulsión del vehículo eléctrico, proporcionando además una aproximación a la característica ideal de la tracción y explicando cómo este tipo de motores se ajusta mejor a ella.

El **Capítulo 5** trata sobre el estudio de la propulsión de los vehículos eléctricos; explicando sus configuraciones, que fuerzas intervienen en la propulsión del mismo, y también se expone dos modelos concretos de vehículos eléctricos los cuales simularemos con ciertas aplicaciones informáticas y obtendremos sus prestaciones y rango de autonomía en un ciclo de conducción, dándonos una idea sobre las prestaciones y autonomía reales que pueden ofrecer los vehículos eléctricos.

El **Capítulo 6** son las conclusiones extraídas del trabajo.

El **Capítulo 7** está dedicado a los posibles trabajos futuros.

Al final se referencia la bibliografía utilizada durante el trabajo, y los Anejos que incluyen los códigos de los programas de Matlab utilizados.

2. Estado de la tecnología

Este capítulo pretende dar una aproximación inicial al estado de la tecnología del vehículo eléctrico. Comienza con una exposición de la historia del vehículo eléctrico, a través de la cual podremos conocer cuál ha sido su evolución. A continuación, se explica cómo es el esquema conceptual de un vehículo eléctrico, y se proporciona además su definición y cuáles son los sistemas principales de los que se compone. Después, se plantea una serie de razones que nos llevarían a utilizar el vehículo eléctrico como alternativa a los vehículos con motor de combustión interna. Posteriormente, se introduce una clasificación de los diferentes tipos de vehículos eléctricos existentes explicando cuales son las características particulares de cada uno de ellos, y también se introducirá la motocicleta eléctrica. Para finalizar el capítulo se expone el previsible futuro que podría llegar a tener este tipo de tecnología.

2.1. Revisión histórica del vehículo eléctrico [3]

El vehículo eléctrico no es una novedad dentro de la dilatada vida del automóvil, hubo un periodo en el que el motor eléctrico, el motor de combustión y el motor de vapor estaban en un nivel de prestaciones semejantes, compitiendo cada cual por ser el ganador en la carrera para la propulsión de los vehículos.

Numerosos fueron los intentos iniciales por construir un vehículo que se moviera de forma autónoma, uno de los primeros intentos sin llegar a construirse fue el que realizó Isaac Newton en 1680, que propuso un vehículo propulsado por vapor de agua. Esta idea no se llevó a cabo hasta 1769 por Nicholas-Joseph Cugnot. El principal problema que tenía este vehículo era su elevada inercia, que lo hacía muy difícil de parar al tener un peso de 4,5 toneladas. A partir de este momento se imponen en el mundo los vehículos propulsados por vapor de agua. Hasta que en 1858 Barsanti crea el primero motor de explosión monocilíndrico, anclado a un banco, y que funcionaba con una mezcla de hidrógeno y oxígeno siendo el primero en transformar el movimiento alternativo de un pistón a una rueda. Es ya posteriormente en 1876 que Nikolaus August Otto inventa el primer motor de 4 tiempos que aparecen con más fuerza los motores de combustión interna. Tras este hito en 1892 surge el motor de encendido por compresión ideado por Rudolf Diesel. El germen inicial de los motores eléctricos se lo debemos a Michael Faraday, que en 1821, construye dos aparatos para producir la rotación electromagnética lo que desencadenaría luego en lo que hoy conocemos por motores eléctricos.

2.1.1. Los primeros vehículos eléctricos

Se suele considerar que el primer hombre en ensamblar un vehículo eléctrico fue Gustave Troubé, en Francia en el año 1881. Se trataba de un triciclo de 160 kg y 0,1 CV. Dos triciclos más le siguieron en 1882, uno en Inglaterra, fabricado por William Edward Ayrtton y Jhon Perry, y otro en Estados Unidos fabricado por Andrew L.Ricker. Pero no fue hasta 1890 que William Morrison construyó el primer vehículo de cuatro ruedas. Se trataba de una carroza adaptada con motores eléctricos, con un peso de 1931 kg y 3 CV y una velocidad aproximada de 22 km/h y baterías de plomo FIG 2.1; fundando la primera empresa de comercialización de vehículos eléctricos Morris & Salomon.



FIG 2.1 Vehículo Eléctrico de Morrison. [3]

Ya en 1889 un vehículo llamado la “Jamais Contente”, con carrocería en forma de torpedo FIG 2.2 fue el primero en superar los 100 km/h; estableciendo un nuevo record de velocidad en carretera.



FIG 2.2 El Jamais Contente. [3]

Paralelamente en Viena, Jacob Lohner & Co. también produjo coches propulsados eléctricamente desde 1898 hasta 1906. Uno de sus empleados, Ferdinand Porsche, desarrolló un sistema que montaba los motores directamente en las ruedas

delanteras, reduciendo de esta manera las pérdidas energéticas y el número de partes móviles aumentando así la fiabilidad. Estos vehículos conocidos como Lohner-Porsche FIG 2.3, disponían de 2.5 CV de potencia en cada motor llegando a alcanzar en periodos cortos los 3,5 CV, ofreciendo una potencia combinada de 7 CV y unas prestaciones de 15 km/h de velocidad crucero y 50 km/h de velocidad máxima.



FIG 2.3 Lohner-Porsche con cuatro motores en cada rueda. [3]

2.1.2. La edad de Oro de los vehículos eléctricos

En 1900 aparece el llamado Toujours Contente, sucesor del Jamais Contente de Camille Jenatzy, que integraba cuatro motores eléctricos en los bujes de las ruedas, cada uno de 12 CV y con una autonomía entre 50 y 100 km. Ferdinand Porsche lo transformó en un híbrido serie, utilizando un motor de combustión para recargar las baterías, y produjo más de 300 unidades de este modelo FIG 2.4.



FIG 2.4 Lohner-Porsche híbrido. [3]

Tras ello muchos fabricantes apostaron por la tecnología híbrida en serie. En Estados Unidos, por ejemplo, había en 1905 más de 100 fabricantes de vehículos eléctricos, y en las calles y carreteras dominaban los coches de propulsión eléctrica.

La empresa más conocida de coches eléctricos era la Detroit Electric Car, que consiguió vender 1.500 unidades en 1910. Estos vehículos tenían dos motores, uno en cada eje, otorgado de esta manera tracción a las cuatro ruedas. Tenían una velocidad máxima de 40 km/h y una autonomía de 200 km y su precio rondaba los 2.500\$ FIG 2.5; una cantidad sumamente elevada para la época. A partir de este momento la marca americana mejoró y evolucionó sus modelos, ofreciendo mejores prestaciones hasta 1938.



FIG 2.5 Modelo de Detroit Electric dotado de dos motores uno en cada eje. [3]

2.1.3. Declive del vehículo eléctrico y actual resurgimiento

A partir de 1920, cuando ya se habían comercializado cientos de miles de vehículos eléctricos, comienza su decadencia y se produce el auge de los vehículos con motor de combustión interna. Este cambio de tendencia se produjo debido a las continuas mejoras que iban apareciendo en el mundo de la automoción, como fue por ejemplo la invención del sistema de arranque, que llevaron al motor de combustión interna a alcanzar niveles de rendimiento y consumo inverosímiles para la época. Sin embargo, en sus inicios eran evidentes algunas desventajas respecto a otros motores, era sucio, ruidoso y con un bajo rendimiento, monocilíndrico, lo que obligaba a montarle un gran volante, tenía poca potencia y era necesario conocimientos de mecánica para hacerlo funcionar. En cambio, el vehículo eléctrico gozaba de un manejo sencillo, limpio, y no producía humos y podía ser montado en vehículos con carrocerías cerradas. El mayor problema del vehículo eléctrico era y sigue siendo la autonomía. La energía contenida en 1 kg de gasolina era 500 veces superior a la contenida en 1 kg de batería de plomo. Lo que hacía que un coche de 100 kg de peso necesitara de 300 kg de baterías para conseguir una autonomía de unos 50 km a unos 40 km/h de media.

Después de 1920 surgió alguna tímida apuesta en la fabricación de vehículos eléctricos, como Renault, que construyó su primer vehículo eléctrico en 1928, o

Peugeot que en el año 1941 fabricó 400 coches eléctricos con autonomía de 80 km y velocidad máxima de 32 km/h. General Motors también lanzó alguna pequeña serie de coche urbanos, pero no fue ya hasta 1999 con la aparición del GM EV1, FIG 2.6, que contaba con baterías de plomo-ácido y un alcance máximo de unos 160 km, que cosechó cierto éxito.

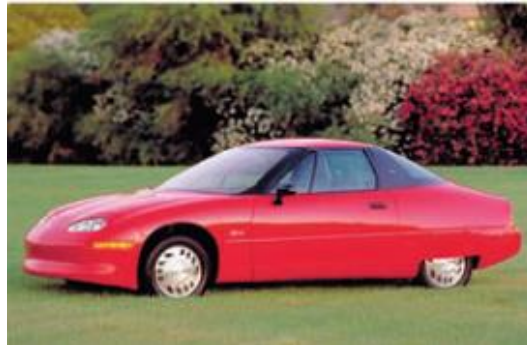


FIG 2.6 EL EV1 de General Motors. [3]

Mientras, Toyota en 1997 lanza el modelo Prius, alzándose como el primer vehículo híbrido fabricado en serie que alcanzaría en el año 2007 el millón de unidades vendidas. Y posteriormente comienza una sucesiva aparición de muchos otros modelos como, por ejemplo, el Honda Insight en el 2000, el Chevrolet Volt en el 2008, el Tesla Model S en el 2009, o el Nissan Leaf en el 2010 el cual se convertiría en el primer coche puramente eléctrico en vender 100.000 unidades en el año 2014. Todo ello nos hace afirmar que estamos en lo que parece ser el nuevo resurgir de los vehículos híbridos y eléctricos

A pesar de ello el vehículo eléctrico nunca llegó a ser una tecnología totalmente descartada. Su funcionamiento silencioso y la ausencia de emisiones de gases contaminantes, de gases de efecto invernadero y de partículas, les han permitido conservar la práctica exclusividad en ciertos sectores como: vehículos para discapacitados, carritos de golf, transporte de mercancías en fábricas y algunos servicios especiales en poblaciones.

Es muy interesante la estadística de vehículos vendidos en Estados Unidos durante el siglo XX FIG 2.7, porque muestra que el vehículo eléctrico, no sólo no ha dejado de existir, sino que sus ventas nunca han dejado de crecer [4].

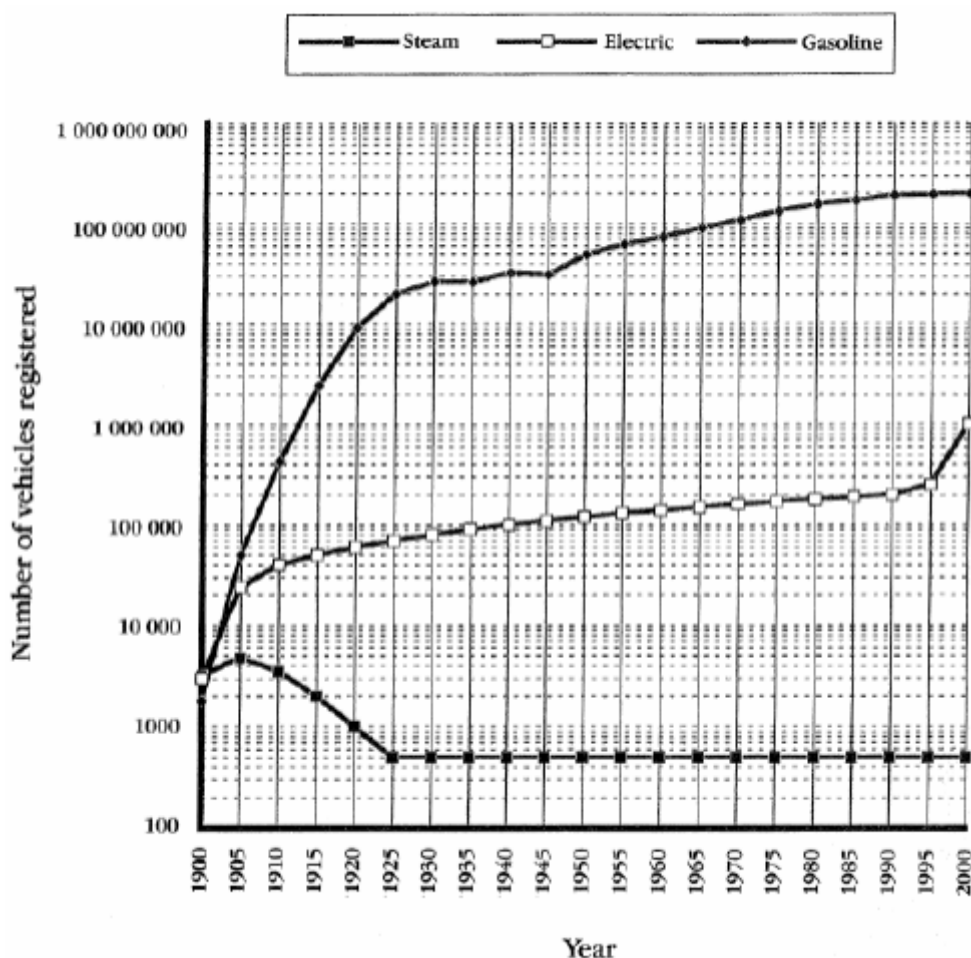


FIG 2.7 Vehículos de diferentes tecnologías vendidos en Estados Unidos durante el siglo XX. [4]

2.2. Definición y esquema conceptual de un vehículo eléctrico [5]

Con el objetivo de contextualizar la tecnología tratada en este trabajo, en este punto se va a exponer una descripción general del vehículo eléctrico junto con su esquema conceptual, analizando los sistemas y subsistemas del mismo.

Entendemos por vehículo eléctrico aquel que se propulsa total o parcialmente por un motor eléctrico alimentado por baterías que se recargan a través de una toma de corriente. La energía química almacenada en la batería se transforma en energía eléctrica y posteriormente se convertirá mediante el motor eléctrico en energía mecánica. Así dos aspectos que caracterizan a un vehículo eléctrico son:

- Que dispone de una fuente de energía (química o electroquímica) portátil.
- Que el esfuerzo de propulsión lo suministra un motor eléctrico.

El esquema funcional de un vehículo eléctrico consta de tres sistemas básicos: el sistema de propulsión, el sistema de recuperación de energía y los sistemas auxiliares FIG 2.8.

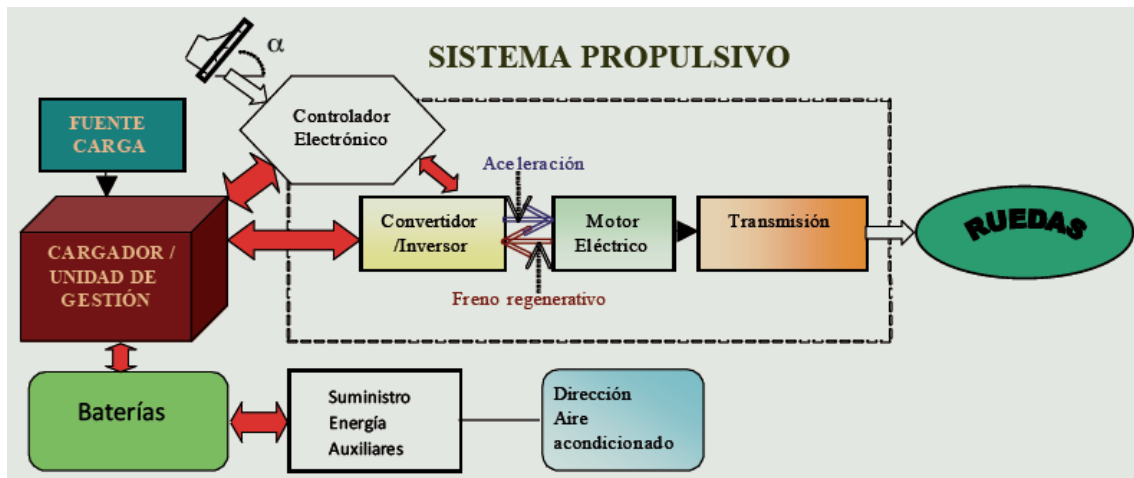


FIG 2.8 Esquema conceptual de la configuración de un vehículo eléctrico. [5]

El sistema de propulsión eléctrica consta de los siguientes subsistemas:

- Controlador del vehículo.
- Convertidor electrónico de potencia.
- Motor eléctrico.
- Transmisión.

El subsistema de almacenamiento de energía consta de los siguientes subsistemas:

- Fuente de energía.
- Unidad de gestión de la energía.
- Unidad de carga.

El sistema de auxiliares consta de los siguientes subsistemas:

- Unidad de dirección.
- Unidad de climatización.
- Unidad de suministro de auxiliares.

Basado en el control de entradas del pedal acelerador y del pedal del freno, el controlador del vehículo proporciona las señales de control adecuadas para el controlador de potencia, cuya función es regular el flujo de energía entre las baterías y el motor eléctrico. El flujo inverso de energía se debe al proceso de frenada regenerativa. El módulo de gestión de la energía coopera con el controlador del vehículo para controlar la frenada regenerativa y su recuperación de energía. También trabaja con la unidad de carga de energía durante el proceso de recarga. La unidad de suministro de energía de auxiliares proporciona la potencia necesaria

con diferentes niveles de tensión para todos los auxiliares, el sistema de dirección y el de climatización.

2.3. Razones para usar el vehículo eléctrico

La introducción del vehículo eléctrico plantea ventajas claras como hemos explicado anteriormente desde el punto de vista de las ciudades, en virtud de su capacidad para atender las demandas actuales de movilidad urbana de manera más eficiente y sostenible en términos de consumo energético y sin recurrir a externalidades negativas como las que generan en la actualidad los vehículos convencionales a base de carburantes derivados del petróleo, como son las emisiones (CO₂ y un variado rango de gases contaminantes) y la contaminación acústica. Analizaremos también más a fondo una serie de ventajas a la hora de usar vehículos eléctricos.

2.3.1. Sostenibilidad y eficiencia

En la Unión Europea el sector transporte representa un fuerte consumidor energético, con una dependencia de más del 90% de los recursos fósiles. Por ello el vehículo eléctrico se presenta como la solución alternativa al vehículo convencional para contribuir con los objetivos europeos propuestos para el 2020 (20% reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de forma vinculante, 20% de participación de energías renovables de forma vinculante y 20% de mejora de la eficiencia energética). Con la integración del vehículo eléctrico se conseguiría tener una menor dependencia de los países productores de petróleo, logrando alcanzar los objetivos de una política económica competitiva, así como de una seguridad en el suministro [6].

En España, el transporte también es el sector de actividad con mayor consumo de energía. En el año 2009 representó en torno al 40% del consumo de energía final a nivel nacional; y dentro de él concretamente es el transporte por carretera el que supone el 80% del consumo energético del sector.

De esta manera que el ahorro energético se convierte en una cuestión muy a tener en cuenta de cara a la sostenibilidad futura del sector transporte. Junto a ello otra cuestión ligada en términos de sostenibilidad más concretos sería la eficiencia energética de una y otra tecnología.

La eficiencia energética (del tanque a la rueda) de los vehículos de combustión modernos se sitúa, en condiciones habituales de uso, por debajo del 22% para el gasóleo y en torno al 18% para los motores de gasolina. Sin embargo, en el caso del vehículo eléctrico, la eficiencia (de la toma de corriente a las ruedas) se sitúa en un 72% aproximadamente con baterías de litio.

Por tanto, la eficiencia energética del tanque a la rueda del vehículo eléctrico es en torno a cuatro veces más elevada que la registrada por el vehículo con motor térmico (en base al promedio de eficiencia del 20% entre motores de gasóleo y gasolina).

Partiendo de estos datos, y a modo de ejemplo, podemos establecer la comparación entre el consumo energético de un coche con motor diésel y el de un automóvil eléctrico equivalente FIG 2.9. En este sentido, mientras que el vehículo diésel consume aproximadamente 6 litros de combustible a los 100 km (60 kWh cada 100 km, pues un litro de combustible contiene casi 10 kWh de energía), el consumo del coche eléctrico se limita a 15,9 kWh a los 100 km, teniendo en cuenta la relación de eficiencia energética entre los dos tipos de vehículos nos representa un ahorro de más de un 73% [7].



FIG 2.9 Comparación de ahorro energético entre vehículo diésel y eléctrico. [7]

El balance de eficiencia realizado hasta ahora sólo se ha centrado en términos del propio vehículo desde el depósito o toma de corriente hasta el movimiento de las ruedas. Sin embargo, podemos tener en cuenta toda la cadena de producción de energía desde el pozo petrolífero o central energética hasta el movimiento de las ruedas.

A continuación, en la Tabla 2.1 se muestra una comparación de la eficiencia energética siguiendo el esquema de la fuente de energía a la rueda entre un vehículo de combustión, y el mismo vehículo; con aportación de energías renovables en la producción eléctrica.

Vehículo	Eficiencia de la fuente a la rueda
Con motor de combustión	18%
Con motor eléctrico	35%

Tabla 2.1 Comparación de eficiencia energética de la fuente a la rueda. [8]

Por lo tanto, en la eficiencia del vehículo eléctrico es muy importante el mix energético existente. El término mix energético se describe como la combinación de

las diferentes fuentes de energía existentes que se utilizan para cubrir la demanda eléctrica de un país.

Si este mix energético fuera exclusivamente de energías renovables, se obtendrían una mayor eficiencia energética, teniendo mejores rendimientos como se muestra en la figura FIG 2.10.

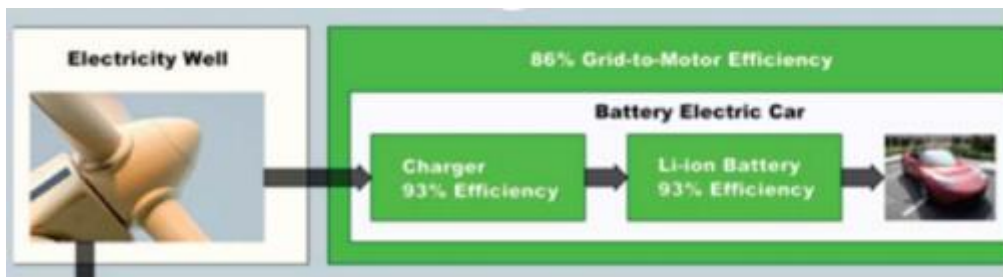


FIG 2.10 Rendimientos de la fuente a la rueda del vehículo eléctrico suponiendo un mix de energías renovables. [4]

No obstante, cabe reseñar que tanto el balance de energía siguiendo un esquema desde el tanque a las ruedas o desde la fuente a las ruedas siempre es ampliamente favorable al vehículo eléctrico, independientemente del mix energético presente.

2.3.2. Reducción de las emisiones de gases contaminantes

La contaminación de todo vehículo debe contabilizarse sumando las emisiones directas, que son las emisiones que produce el propio motor del vehículo, y las emisiones indirectas, que son las emisiones producidas en sistemas externos al vehículo, pero fundamentales para que este pueda desplazarse y funcionar correctamente. Aunque un vehículo eléctrico no produce emisiones contaminantes durante su funcionamiento, la generación de energía eléctrica necesaria para mover el vehículo eléctrico da lugar a emisiones contaminantes dependiendo de cómo se haya generado dicha energía. El caso ideal sería recargar los vehículos eléctricos a través de fuentes de energía renovables como la energía eólica o la energía solar.

Realizando unos cálculos sencillos y aproximados, se puede calcular la diferencia de emisiones producidas por los vehículos eléctricos puros y un vehículo con motor de gasolina, considerando:

- El consumo medio de los vehículos eléctricos actuales es de 15,9 kWh/100 km (como hemos visto en el apartado 2.3.1.).
- El factor de emisiones de CO₂ en el año 2015 del mix de generación eléctrico español es de 0,29 kgCO₂/kWh [9].
- El consumo de un vehículo diésel (aprox. 100 CV) es de 6 L/100km.
- Las emisiones producidas por litro de diésel consumido son de 2,67 kgCO₂/L.

Según estos valores las emisiones de CO₂ generadas por un vehículo eléctrico y por un vehículo de motor diésel a los 100 km, serían cercanas a 4,6 kgCO₂ y 16,02 kgCO₂, respectivamente. El balance es claramente positivo para el vehículo eléctrico.

Cabe destacar que los vehículos eléctricos, aparte de tener una elevada capacidad de reducir las emisiones de CO₂, también tiene un impacto positivo en la reducción de otros gases contaminantes, quizá menos conocidos, pero muy perjudiciales para la salud, como son las partículas en suspensión (PM), los óxidos de nitrógeno (NO_x), y los hidrocarburos no quemados (HC) [10].

2.3.3. Reducción de la contaminación acústica [8]

La principal causa de contaminación acústica urbana es el ruido del tráfico (entre un 70 y un 80% del total). La Agencia Europea de Medio Ambiente mediante su aplicación NOISE (Noise Observation and Information Service for Europe) indica que cerca del 50% de población de las zonas urbanas europeas con más de 250.000 habitantes está expuesta a niveles de ruido, en gran parte debidos al tráfico, superiores a 55 decibelios (límite de exposición indicado por la Organización Mundial de la Salud), lo que significa alrededor de 41 millones de europeos.

Las fuentes de emisión procedentes de los vehículos son las asociadas con el motor, la rodadura y el desplazamiento del aire en la circulación. Las emisiones debidas a la propulsión de los vehículos con motores de combustión interna son la primera fuente de ruido por debajo de los 50-60 km/h, velocidades propias de entornos urbanos y sus accesos. En la Tabla 2.2 se muestra la comparación de los niveles de ruido registrados entre un vehículo con motor de combustión interna y uno eléctrico de características funcionales similares en pruebas realizadas en Estados Unidos. Estas cifras evidencian el papel que los vehículos eléctricos pueden hacer para disminuir la contaminación acústica urbana en los principales ejes viarios con una reducción de hasta 7 DB(A) a bajas velocidades.

Velocidad de circulación	Vehículo eléctrico (Nissan Leaf)	Vehículo con motor de combustión interna (Nissan Versa)
10 Km/h	49 DB(A)	56 DB(A)
20 Km/h	57 DB(A)	62 DB(A)
30 Km/h	64 DB(A)	68 DB(A)

Tabla 2.2 Comparación de emisiones acústicas entre un vehículo eléctrico y un vehículo con motor de combustión interna. [8]

2.3.4. Ventajas técnicas del vehículo eléctrico

Centrándonos en las ventajas que nos ofrece el motor de un vehículo eléctrico, a igualdad de potencia y producido en gran serie es más compacto, más barato y mucho más simple que un motor de combustión interna. No necesita circuito de

refrigeración, ni aceite, ni apenas mantenimientos. Prácticamente no hace ruido al funcionar, sus vibraciones son imperceptibles y casi no emite calor. Funciona a pleno rendimiento sin necesidad de variar su temperatura (disponemos de todas las prestaciones del motor, desde el primer instante en frío). Al no tener elementos oscilantes, ni empuje discontinuo, no necesita volantes de inercia ni sujeciones especiales que lo aíslen del resto del coche. Al generar muy poco calor y no tener vibraciones su duración puede ser muy elevada (el motor no sufre durante su funcionamiento). Además, el motor eléctrico no necesita cambio de marchas exceptuando algún mecanismo para distinguir avance y retroceso, que bien puede ser la inversión de polaridad del propio motor haciéndolo funcionar como generador. Desarrolla un par máximo y constante desde 0 rpm y potencia constante a partir de medio régimen y hasta su límite de giro (teóricamente más del doble que el límite de un motor de gasolina). Esto es lo que hace posible que en la misma marcha podamos arrancar desde parado y circular a la máxima velocidad [11].

	Vehículo de combustión interna	Vehículo eléctrico
Rendimiento del motor	Menos del 33%	Entre el 80% y el 90%
Radiador (disipador de calor)	Si	No
Característica par-rpm	Plana	Par de arranque elevado
Regulación de velocidad y par (reprise)	Caja de cambios + embrague (mayor mantenimiento)	Convertidor electrónico (menor mantenimiento)
Consumo con vehículo parado (ralentí)	Apreciable	Cero
Conversión de energía	Irreversible	Frenado regenerativo
Motor	Voluminoso y pesado 0,7 KWh/kg	Pequeño y ligero 5,8 KWh/kg

Tabla 2.3 Ventajas del vehículo eléctrico frente al vehículo de combustión interna. [4]

Como acabamos de ver, las ventajas del motor eléctrico aisladamente considerado son muchas. Sin embargo, el problema básico de los vehículos eléctricos recae en la portabilidad y almacenamiento de la energía eléctrica. Si no se aumenta la densidad energética de las baterías, reduciendo su peso, no será posible tener una autonomía comparable a los vehículos de combustión interna.

2.4. Clasificación según el grado de electrificación

En este apartado se va a exponer una clasificación descriptiva con el objetivo de comprender de mejor manera las variantes de vehículos eléctricos existentes actualmente y su evolución.

La conversión de la energía eléctrica en mecánica necesaria para el avance del vehículo no es sencilla y este proceso de electrificación ha tenido diferentes etapas.

La electrificación con el paso de los años ha ido aumentando su grado de integración en los vehículos dando como resultado mejoras de eficiencia y prestaciones FIG 2.11.

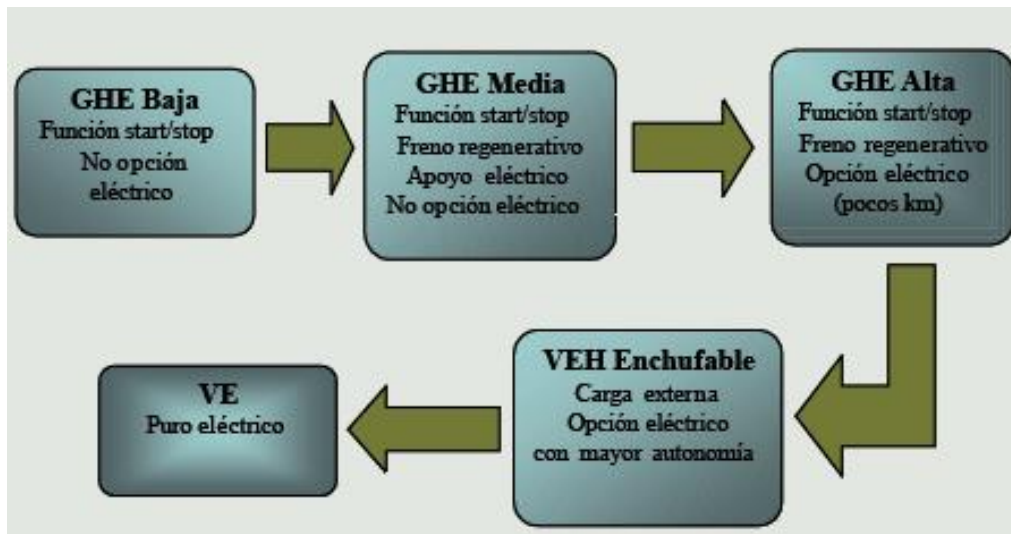


FIG 2.11 Clasificación de los vehículos eléctricos híbridos en función del GHE. [5]

Se define como grado de hibridación eléctrica (GHE) a la relación entre la potencia eléctrica y la potencia total de tracción. Partiendo de este concepto, surgen diversas alternativas desde un nivel de hibridación eléctrica bajo hasta llegar al vehículo eléctrico puro [5].

A continuación, se da una clasificación detallada en función del grado de electrificación del vehículo.

2.4.1. Vehículos híbridos

2.4.1.1. Vehículos con GHE baja (micro hybrid) [5]

Son el primer paso hacia la electrificación del sector transporte. Estos vehículos disponen de sistemas de propulsión convencionales, pero incorporan un sistema adicional de arranque-parada (start/stop). Los microhíbridos paran automáticamente el motor de combustión interna (MCI) cuando el vehículo se detiene y lo arrancan cuando se pisa el pedal del acelerador. Con este sistema se pueden alcanzar ahorros de combustible de hasta un 7%. No ofrecen la opción de conducción en modo eléctrico ni de aceleración eléctrica.

2.4.1.2. Vehículos con GHE media (mild hybrid) [5]

Estos vehículos integran un motor eléctrico que proporciona par de asistencia en la aceleración, con lo que el motor de combustión interna puede ser más pequeño y eficiente. Además, el motor eléctrico puede actuar en modo inverso como un

generador cuando el vehículo está frenando, recuperando la energía cinética y cargando las baterías. Con este sistema se alcanzan ahorros del 15% al 20% de combustible. No ofrecen la opción de conducción en modo eléctrico.

2.4.1.3. Vehículos con GHE alta (full hybrid)

Constan de una combinación entre un motor térmico y un motor eléctrico. Este tipo de hibridación permite un funcionamiento limpio a bajas velocidades en entornos urbanos, movido por la electricidad almacenada en las baterías, y a la vez recorrer grandes distancias al disponer del motor térmico. Están equipados con motores de combustión interna, diseñados para funcionar con su máxima eficiencia. Si se genera más energía de la necesaria, el motor eléctrico se usa como generador y carga la batería del sistema. En otras situaciones, funciona sólo el motor eléctrico, alimentándose de la energía guardada en la batería FIG 2.12 [12].

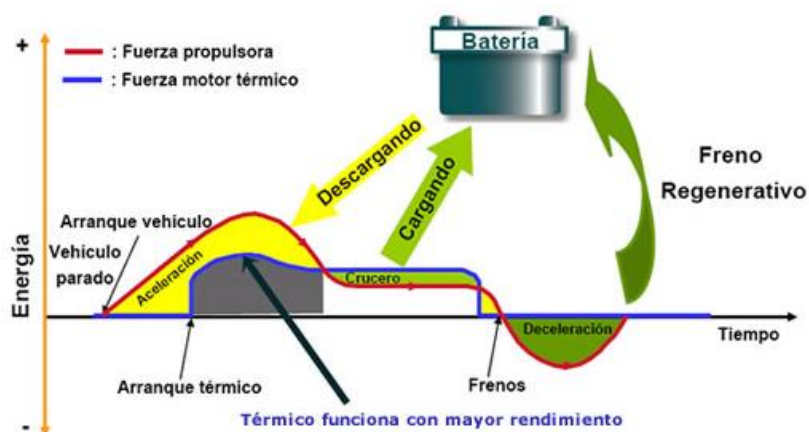


FIG 2.12 Gráfica funcionamiento vehículo híbrido. [12]

En ellos también es posible utilizar el frenado regenerativo para recuperar la energía cinética al frenar, que suele disiparse en forma de calor en los frenos, convirtiéndola en energía eléctrica. En tales casos, el consumo de combustibles y, por tanto, las emisiones contaminantes, se pueden reducir hasta en un 25%.

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

2.4.1.3.1. Configuración en serie [5]

Aquella en la que solamente un convertidor de energía puede proporcionar potencia propulsiva; no existe conexión mecánica entre el motor de combustión y las ruedas. En esta configuración, el motor de combustión interna es el aportador principal que acciona un generador eléctrico que suministra energía a la batería que enlaza con el

motor de propulsión. Una disposición de una configuración en serie se muestra en la FIG 2.13.

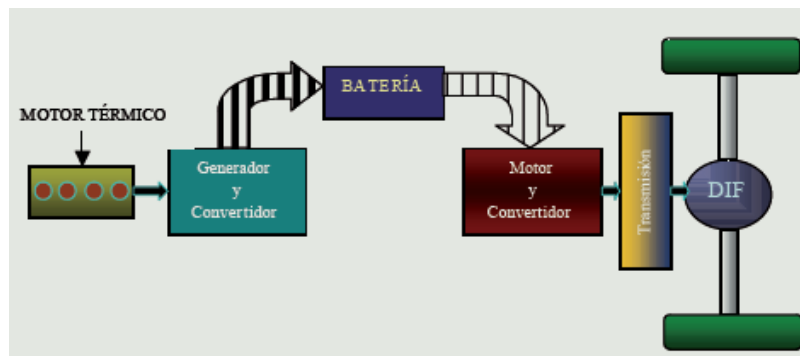


FIG 2.13 Configuración híbrida serie. [5]

La configuración en serie es la más simple, y en ella la potencia requerida para mover el vehículo híbrido la proporciona solamente el motor eléctrico. Una ventaja de esta tipología es que el motor térmico y el eléctrico se pueden montar separadamente. Esto permite la posibilidad de distribuir el peso del sistema propulsor del vehículo híbrido. Algunas de las marcas que se encuentran en el mercado con configuración híbrida en serie son las siguientes: Opel Ampera, Audi A1 e-tron, y Chevrolet Volt.

2.4.1.3.2. Configuración en paralelo [5]

Aquella en la que más de una fuente de energía puede proporcionar potencia propulsiva. El motor de combustión interna y el motor eléctrico se configuran en paralelo, con un acoplamiento mecánico que combina los pares de ambas fuentes de energía. Una disposición de una configuración en paralelo se muestra en la FIG 2.14.

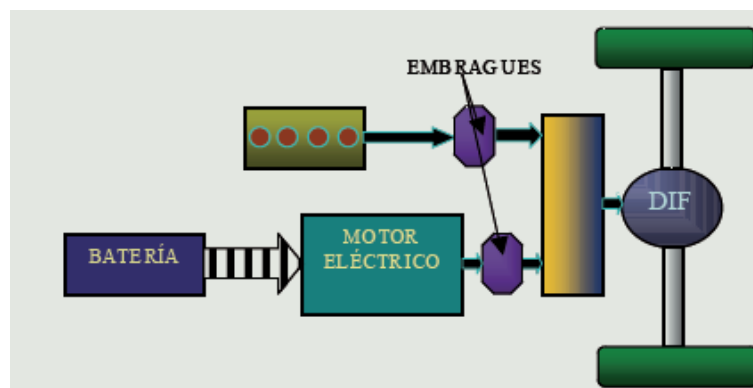


FIG 2.14 Configuración híbrida paralelo. [5]

En la configuración en paralelo, el motor de combustión interna y el motor eléctrico se conectan al eje de transmisión mediante embragues separados. Los requerimientos de potencia para el motor eléctrico son menores que en la configuración en serie, ya que el motor de combustión interna complementa la potencia total requerida por el vehículo híbrido. La potencia propulsiva se puede

suministrar bien por el motor de combustión interna, bien por el motor eléctrico o bien por combinación de ambos sistemas, por lo que sus tamaños son más pequeños. Un inconveniente de esta configuración es la complejidad en el control y del acoplamiento mecánico. Algunas de las marcas que se encuentran en el mercado con configuración híbrida paralelo son las siguientes: Honda Insight, Peugeot 3008 Hybrid4, Ford Fusion Hybrid, Mercedes Benz S400 BlueHybrid, y BMW Active Hybrid 7.

2.4.1.3.3. Configuración en serie-paralelo [5]

También denominada por otros autores power split, utiliza una combinación serie-paralelo pero introduciendo un engranaje planetario que conecta el motor térmico, el motor eléctrico y el generador. Es posible desconectar el motor térmico y hacer funcionar el vehículo eléctricamente, pero en la mayoría de los puntos operativos coexisten ambos flujos de energía como en la configuración en paralelo (desde el motor térmico vía caja de cambios a las ruedas) y como una configuración en serie (desde el generador y motor eléctrico a las ruedas). El reparto de flujos energéticos depende del régimen de giro. Una disposición de una configuración en serie-paralelo se muestra en la FIG 2.15.

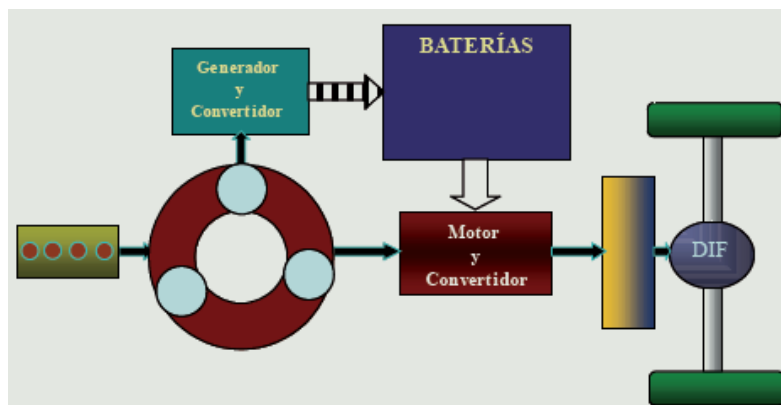


FIG 2.15 Configuración híbrida serie-paralelo. [5]

Algunas veces puede actuar como puramente paralelo pero la mayoría de las veces funciona como parcialmente en serie y parcialmente en paralelo. Con esta disposición, como en el caso anterior, es posible combinar las ventajas de ambas configuraciones en serie y paralelo, pero es mucho más cara y compleja. Algunas de las marcas que se encuentran en el mercado son las siguientes: Toyota Prius, y Lexus ES300h.

2.4.2. Vehículo híbrido enchufable (plug-in hybrid) [13]

Combinan la propulsión del motor eléctrico y la del motor de combustión interna. Las baterías se pueden cargar de la red, cuando el vehículo está parado o mediante el

sistema de frenado regenerativo cuando frena y baja fuertes pendientes por lo que proporcionan una mayor autonomía en modo eléctrico.

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

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

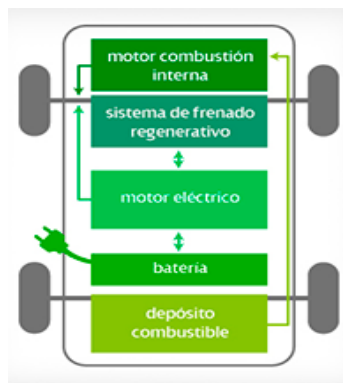


FIG 2.16 Estructura del vehículo híbrido eléctrico enchufable. [13]

2.4.3. Vehículo eléctrico puro [13]

El vehículo eléctrico puro utiliza únicamente el motor eléctrico como sistema de propulsión. La energía almacenada en las baterías se carga de la red eléctrica mientras el vehículo está aparcado. También dispone de sistema de frenado regenerativo que en las frenadas o en las fuertes pendientes recupera energía y recarga las baterías. Tienen una autonomía limitada por la capacidad de las baterías. No produce ruido, ni emisiones de gas de efecto invernadero en su entorno de utilización. Cuando se recarga únicamente con energía renovable, es nula la emisión de CO₂.

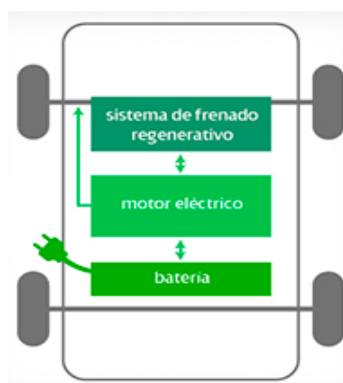


FIG 2.17 Estructura del vehículo eléctrico puro. [13]

2.5. Motocicleta eléctrica [3]

Haremos también una breve reseña a la motocicleta eléctrica, ya que en posteriores capítulos es objeto de estudio. De forma análoga al coche eléctrico, una motocicleta eléctrica es un vehículo eléctrico con dos ruedas que utiliza un motor eléctrico como medio de propulsión. La electricidad se almacena a bordo de unas baterías recargables, que acciona uno o más motores eléctricos.

Si tenemos en cuenta las condiciones de uso, pero sobre todo las prestaciones requeridas en una motocicleta urbana como puede ser el actual ciclomotor, parece claro que este vehículo tiene las características ideales para convertirse en eléctrico. Aunque no ofrece una autonomía muy elevada esta es suficiente para cubrir trayectos urbanos, además no requiere un par motor desmesurado, ni alta potencia ni tampoco alcanzar altas velocidades. Estas características llevan a pensar que con la tecnología disponible actualmente, debería haber miles de motocicletas eléctricas circulando por las calles de las grandes ciudades. No obstante, este aún no es el caso actualmente, debido a que los ciclomotores con motor de combustión son vehículos socialmente muy integrados, baratos, cómodos y de gran versatilidad. Los ciclomotores con motor de combustión son la opción más rápida y económica para moverse en las ciudades. Sin embargo, una motocicleta eléctrica tiene un precio todavía actualmente bastante superior al de una motocicleta convencional de similares prestaciones.

Las motocicletas eléctricas existentes están enfocadas por lo tanto a trayectos urbanos, ya que hasta que no se encuentre una tecnología que permita reducir el peso del paquete de baterías, las altas prestaciones en estos vehículos sacrifican la utilidad de los mismos. Dentro de la gama de motocicletas urbanas, principalmente las llamadas scooters eléctricas, son las más predominantes.

Como ya se ha comentado, puede parecer que el mundo de la moto no ha hecho todo lo posible para acercarse a la electricidad. Cuando lo lógico es pensar que en vehículos de menores prestaciones, como son las motos urbanas, sería más fácil empezar a realizar cambios; estas sin embargo han quedado en un segundo plano, eclipsadas por los coches, por las investigaciones y prototipos de los grandes fabricantes. Quizás el hecho de que los vehículos de cuatro ruedas hayan realizado el paso previo por el concepto de híbrido, ha contribuido a que el protagonismo de la propulsión eléctrica haya sido para ellos. Disponer del espacio del que gozan los coches para introducir elementos eléctricos, o acumuladores de energía eléctrica de gran tamaño, es un inconveniente técnico que sufren las motocicletas eléctricas. Sin embargo, es de gran importancia que se sigan probando nuevos modelos de motocicletas eléctricas más eficientes, con suficiente autonomía y mucho más baratas; para que se pueda favorecer y acercarse al concepto de movilidad eléctrica dentro de las ciudades.

No obstante, a pesar de tener menor importancia en la escena de la movilidad eléctrica como hemos explicado anteriormente los scooters eléctricos se adaptarían muy bien a las necesidades de desplazamiento en las ciudades por lo que en este trabajo también se ha realizado un pequeño estudio de las prestaciones de un scooter eléctrico tomando como ejemplo el modelo de Peugeot Scoot'Elec.

2.6. Futuro del vehículo eléctrico [3,10]

La realidad del vehículo eléctrico se verá impulsada en el futuro fundamentalmente por un previsible aumento de los precios del petróleo, las crecientes preocupaciones sobre la seguridad en el abastecimiento de este hidrocarburo, y las repetidas advertencias de los científicos sobre la necesidad de reducir el impacto del sector de la automoción en el cambio climático global.

Sin embargo, uno de los contrapuntos que ponen en desventaja a los actuales vehículos eléctricos y que impiden un mayor desarrollo futuro respecto a los convencionales impulsados por un motor de combustión interna es su elevado coste. Pero es probable que este se vaya reduciendo a medida que aumente progresivamente la producción de baterías y se avance en la propia tecnología.

En octubre de 2009 la Agencia Internacional de la Energía publicó una hoja de ruta para el desarrollo del vehículo eléctrico y el vehículo híbrido enchufable, seleccionando como horizonte el año 2050.

Según este estudio, las tecnologías de transporte no convencionales y medioambientalmente más sostenibles tendrán una elevada penetración a nivel mundial FIG 2.18.

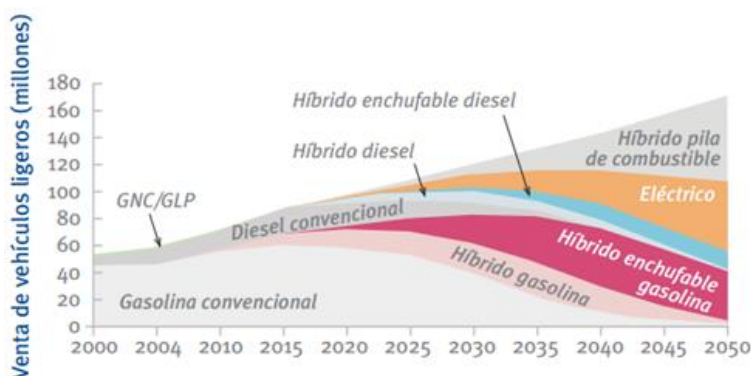


FIG 2.18 Evolución esperada de vehículos en circulación por tipo de combustible 2000–2050. [10]

Se estima que los vehículos eléctricos e híbridos enchufables alcancen cifras de ventas superiores a 100 millones de unidades en el año 2050, aunque la cifra de dicho tipo de vehículos no empezará a ser significativa hasta el año 2020, FIG 2.19.

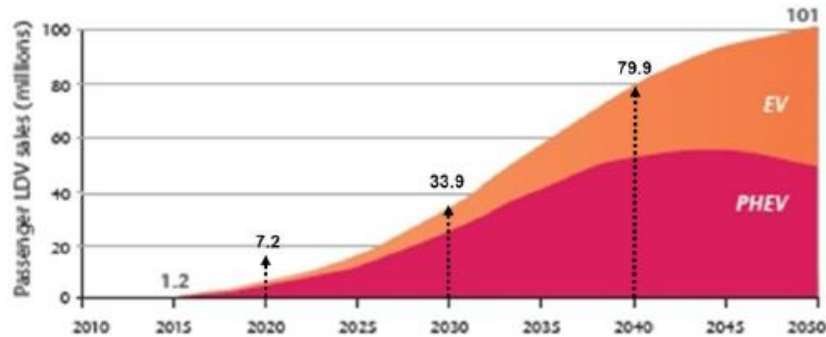


FIG 2.19 Proporción de vehículos eléctricos e híbridos enchufables 2000–2050. [10]

Dentro del contexto mundial, Norte América y Europa tendrán una especial relevancia en el desarrollo de los vehículos enchufables, reuniendo cerca del 50% de las ventas mundiales de este tipo de vehículos en 2020, FIG 2.20.

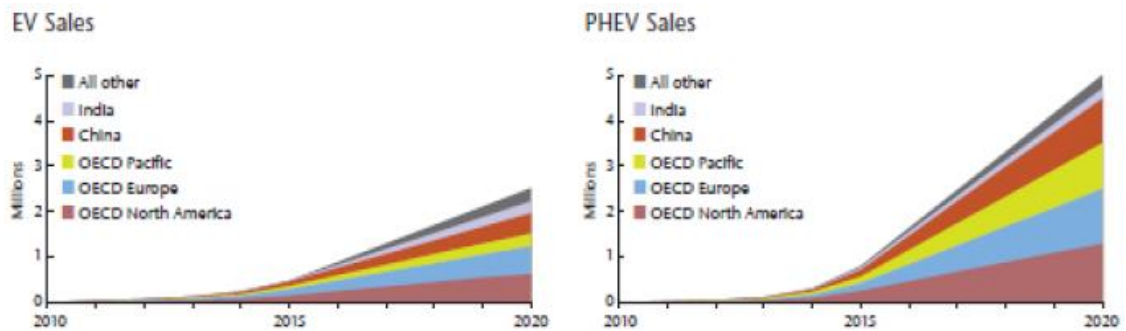


FIG 2.20 Evolución esperada de venta de vehículos eléctricos e híbridos enchufables 2010–2020. [10]

3. Sistemas de almacenamiento de la energía

Los sistemas de almacenamiento de energía son aquellos dispositivos que almacenan energía, entregan energía (proceso de descarga) y aceptan energía (proceso de carga). Existen diversos sistemas de almacenamiento de energía propuestos para los vehículos eléctricos. Nos centraremos en los sistemas de almacenamiento eléctrico, entre los que se incluyen: las baterías, los ultracondensadores y la pila de combustible. Otros sistemas de almacenamiento de energía no eléctricos serían los volantes de inercia.

Hay un número de requerimientos de almacenamiento de energía para cumplir con las exigencias de los vehículos eléctricos, tales como: energía específica, potencia específica, rendimiento, mantenimiento, coste, impacto ambiental y seguridad. Para los vehículos eléctricos puros la energía específica es prioritaria ya que marca los límites de autonomía del vehículo. Por otro lado, para los vehículos híbridos la energía específica deja de ser tan importante y la potencia específica pasa al primer plano, ya que la energía la obtiene a bordo bien mediante un motor de combustión interna o una pila de combustible, y es necesaria una potencia suficiente para acelerar o subir una pendiente, y la frenada regenerativa.

3.1. Baterías

Una batería recargable es un dispositivo capaz de almacenar y suministrar energía eléctrica mediante reacciones electroquímicas de oxidación/reducción. En este tipo de reacciones red-ox, la transferencia de electrones se lleva a cabo a través de un circuito exterior dando lugar a una corriente eléctrica.

3.1.1. Principio de funcionamiento [14]

Las baterías son generadores secundarios que necesitan de un suministro previo de electricidad durante la carga. Durante la etapa de descarga (utilización de la batería), la energía química de los materiales activos de electrodo se transforma, directa y espontáneamente, en energía eléctrica. La unidad básica de una batería es la celda electroquímica. La asociación de dos o más celda constituye la batería propiamente dicha. Los elementos se conectan en serie, en paralelo o en una combinación de ambas formas para aumentar el voltaje y/o la capacidad de la batería. La celda electroquímica está formada por dos electrodos separados por un electrolito. En el electrodo positivo (cátodo) está el material activo con mayor potencial red-ox y en el electrodo negativo (ánodo) el de menor potencial FIG 3.1.

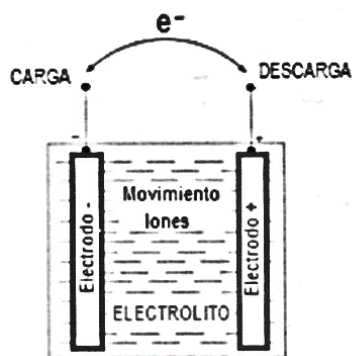


FIG 3.1 Esquema de una celda de batería. [14]

Durante el funcionamiento de la batería, las reacciones químicas en los electrodos generan electrones que fluyen de un electrodo a otro, sin embargo, el flujo es sostenible solamente si los electrones generados son capaces de moverse por un circuito externo que conecta ambos electrodos. Los puntos de conexión entre los electrodos y el circuito externo se denominan terminales.

La energía almacenada en una batería es la diferencia en energía libre entre los estados de carga y descarga de los compuestos químicos. Esta energía química disponible se convierte en energía eléctrica solo bajo demanda, utilizando los componentes básicos de una celda: electrodo positivo, electrodo negativo, electrolito y separador.

- Electrodo positivo: el electrodo positivo es un óxido o algún otro componente que sea capaz de reducirse durante el proceso de descarga. Este electrodo consume electrones de circuito externo durante la descarga. Ejemplos de electrodos positivos son el óxido de plomo (PbO_2) y el oxihidróxido de níquel (NiOOH). Los materiales del electrodo están en estado sólido.
- Electrodo negativo: el electrodo negativo es un metal o una aleación que sea capaz de oxidarse durante el proceso de descarga. Estos electrodos generan electrones en el circuito externo durante la descarga. Ejemplos de electrodos negativos son el plomo (Pb) y el cadmio (Cd). Los materiales del electrodo también están en estado sólido.
- Electrolito: el electrolito es un medio que permite la conducción iónica entre el electrodo positivo y negativo de una celda. El electrolito debe tener una alta y selectiva conductividad para los iones que toman parte en las reacciones de los electrodos, pero debe ser aislante para los electrones para evitar la autodescarga. El electrolito puede ser líquido, gel o sólido, y ácido o alcalino, en función del tipo de batería. En las baterías de plomo-ácido el electrolito es una solución acuosa de ácido sulfúrico (SO_4H_2). Baterías más avanzadas como las de plomo-ácido selladas, níquel-metal hidruro y litio-ión, utilizan un electrolito tipo gel, pasta o resina. En las baterías de litio-polímero, el electrolito es sólido.

- Separador: el separador debe ser una capa de material aislante eléctrico que físicamente separe los electrodos de polaridad opuesta. Deben ser permeables a los iones del electrolito y pueden tener también una función de almacenaje o inmovilización del electrolito. Se fabrican de polímeros sintéticos.

3.1.2. Parámetros de las baterías

Tras describir el principio de funcionamiento de las baterías, se van a dar una serie de parámetros que caracterizan el funcionamiento de las mismas.

- Tensión en circuito abierto (OCV): se define como el voltaje de la batería cuando está en reposo y en circuito abierto.
- Tensión nominal de celda: es la diferencia entre los potenciales que son generados entre las placas positivas y negativas en el electrolito.
- Tensión estándar: resulta de la multiplicación de las tensiones de las celdas individuales por el número de celdas conectadas en serie.
- Capacidad de carga: es la cantidad de electricidad que puede almacenar durante la carga y devolver durante la descarga. Mide en amperios la corriente que puede suministrar la batería en una hora en el proceso de descarga, expresados mediante la unidad amperio-hora (Ah).
- Intensidad de descarga: Es la corriente instantánea en amperios a la que una batería se descarga.
- Estado de carga (SOC): Capacidad disponible de la batería respecto a la capacidad nominal de la misma. Se mide en porcentaje.
- Estado de descarga (SOD): Es una medida de la carga que se ha sacado de la batería durante la descarga. Se mide en porcentaje.
- Profundidad de descarga (DOD): Es el porcentaje de capacidad para la cual la batería se considera descargada. Un valor cercano al 90% de la capacidad de batería es recomendable como DOD.
- Estado de salud (SOH): Es una medida en tanto por ciento que indica la vida útil remanente de la batería.
- Estado de funcionamiento (SOF): Mide la capacidad de la batería para cumplir la misión que se le encomienda combinando los parámetros SOC y SOH (a una temperatura determinada).
- Energía específica: se define como la capacidad de energía por unidad de masa, o también como la energía que se puede generar por la unidad de masa total de reactivos en la celda (Wh/kg).
- Densidad de energía: se define como la cantidad de energía que puede suministrar un elemento en relación con su volumen (Wh/l).
- Potencia específica: se define como la máxima potencia por unidad de masa de la batería (W/kg) que puede producir en un periodo de tiempo muy corto.

- Densidad de potencia: potencia que se puede extraer por unidad de volumen (W/l).
- Rendimiento: se puede definir en cualquier punto de funcionamiento como la relación en porcentaje entre la tensión de operación y la tensión en circuito abierto.
- Auto-descarga: indica la pérdida de capacidad de una batería, cuando la batería no está en uso y se mide en porcentaje la cantidad de carga disipada por unidad de tiempo.
- Ciclos de vida de la batería: son el número de ciclos de carga/descarga que se pueden realizar hasta que la capacidad sea el 90% de su valor nominal. Es altamente recomendable que las baterías tengan más de 500 ciclos de vida para su aplicación en vehículos eléctricos.
- Tiempo de descarga: es función de la intensidad de descarga. Su relación se da a través de la ecuación de Peukert. Se expresa como:

$$C_p = I^k T$$

Ecuación 3.1

Donde C_p es la capacidad, I es la corriente de descarga, k es el coeficiente de Peukert, que varía entre 1 y 1,5 y depende del tipo de batería, y T es el tiempo de descarga. La dependencia expresada en la ecuación significa que la capacidad de la batería depende de la corriente de descarga.

- Tiempo de recarga: tiempo que tarda en cargarse la batería por completo.
- Temperatura de funcionamiento: es el rango de temperaturas en el que la batería puede funcionar correctamente.

Para seleccionar correctamente la batería que necesitaremos en el vehículo eléctrico o híbrido, habrá que tener en cuenta todos los parámetros anteriormente enumerados, que van a condicionar la elección de un tipo u otro de batería.

3.1.3. Tipos de baterías [14]

En este apartado se presentan detalladas los principales tipos de baterías utilizadas en vehículos híbridos y eléctricos. Dependiendo de su utilización puede hablarse de baterías de arranque, que son las correspondientes al automóvil convencional, y de baterías de tracción, utilizadas por vehículos eléctricos e híbridos.

A pesar de todas las diferentes posibilidades de baterías conocidas, y cerca de 150 años de desarrollo, todavía no se ha desarrollado una batería adecuada que permita su uso generalizado en vehículos eléctricos. Sin embargo, recientemente se han producido algunos avances importantes en la tecnología de las baterías que guardan gran esperanza de futuro, como son los desarrollos de baterías basadas en el grafeno.

3.1.3.1. Plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido se diseñan para ofrecer una alta potencia y un comportamiento seguro y fiable además de económico. Sin embargo, la baja energía específica, el pobre comportamiento en frío y su corto ciclo de vida son un obstáculo para su empleo en un vehículo eléctrico. La presencia de ácido sulfúrico resulta en un potencial riesgo de seguridad para los ocupantes. El hidrógeno liberado por las reacciones de autodescarga es otro problema de peligro potencial. En orden a proporcionar un buen nivel de seguridad estas baterías se sellan. El plomo en los electrodos es otro problema medioambiental debido a su toxicidad.

Durante la operación de descarga FIG 3.2, los electrones, que provienen del electrodo negativo, se consumen en el electrodo positivo. Se utiliza en el electrodo positivo una estructura altamente porosa para incrementar el área de contacto PbO_2 /electrolito y así proporcionar elevadas densidades de corriente, según el PbO_2 se convierte a $PbSO_4$. Según la batería se descarga, la resistencia interna se eleva debido a la formación de $PbSO_4$ y a la disminución de la conductividad del electrolito según se consume el H_2SO_4 . Los electrones se liberan en el electrodo negativo durante el proceso de descarga. La producción de $PbSO_4$ puede degradar el comportamiento de la batería, haciendo más pasivo la actividad del electrodo negativo.

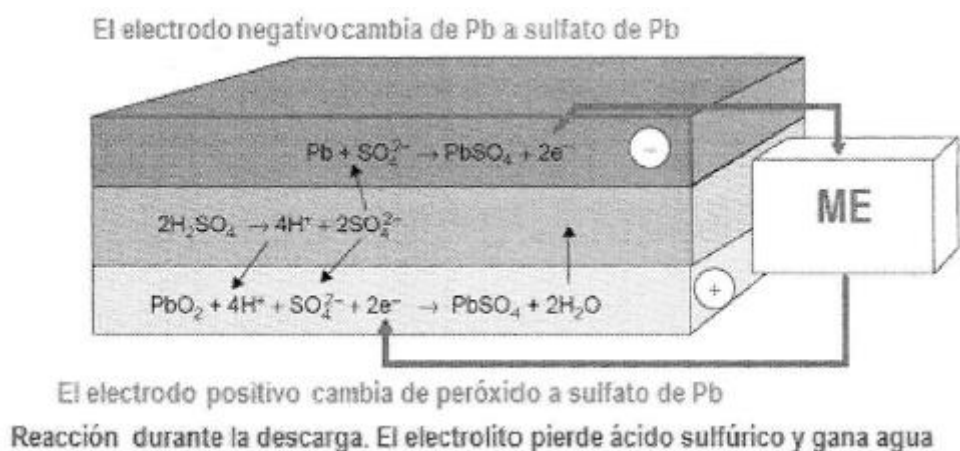
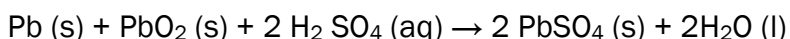


FIG 3.2 Reacción durante el proceso de descarga de una batería de Pb-ácido. [14]

La reacción química global del proceso de descarga es:



Durante la operación de carga, se produce el proceso inverso, el sulfato de plomo se reconvierte en plomo y óxido de plomo. Los electrones son consumidos por el electrodo negativo, mientras que el positivo libera electrones FIG 3.3.

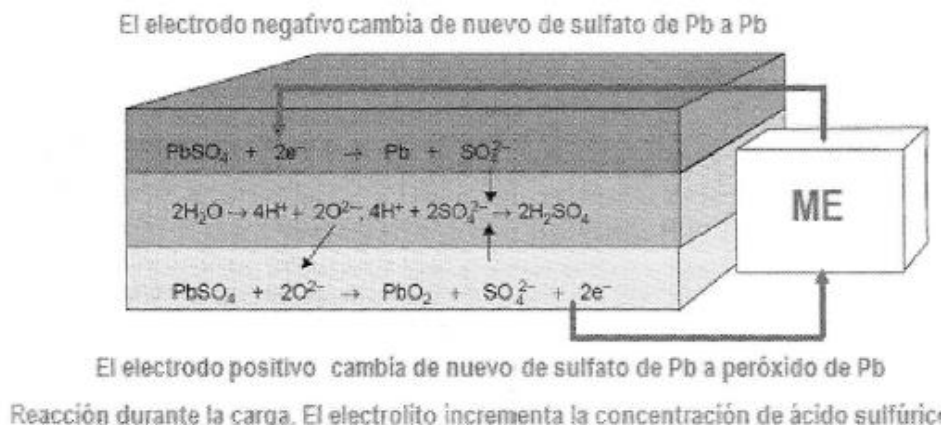
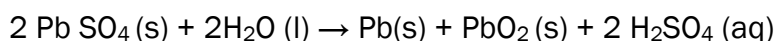


FIG 3.3 Reacción durante el proceso de carga de una batería de Pb-ácido. [14]

La reacción química global del proceso de carga es:



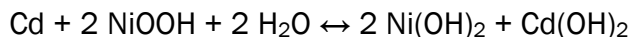
Las baterías de plomo-ácido son utilizadas en automoción convencional y fueron las primeras que comenzaron a utilizarse, y aún siguen prestando servicio en algún caso, como baterías de tracción en vehículos eléctricos. Sin embargo, su peso elevado unido a su baja energía específica, hace que para conseguir una autonomía de 50 km con una velocidad punta de 70 km/h se necesiten unos 400 kg de baterías.

Parámetros Batería Pb-ácido	
Energía específica	20-35 Wh/kg
Densidad de energía	54-95 Wh/l
Potencia específica	~125 W/kg
Tensión nominal de celda	2 V
Rendimiento	~ 80%
Auto-descarga	~ 2% al día
Número de ciclos	Hasta 800 al 80% de capacidad
Tiempo de recarga	8 h (pero el 90% en 1 h es posible)
Temperatura de funcionamiento	Ambiente, pobre comportamiento en frío
Disponibilidad del producto	Disponible comercialmente

Tabla 3.1 Parámetros para las baterías de plomo-ácido. [15]

3.1.3.2. Níquel-cadmio

Las baterías de níquel-cadmio están relegadas por ser muy tóxico el cadmio a pesar su doble densidad de energía respecto a las de plomo-ácido. Son baterías alcalinas en las que la energía eléctrica proviene de la reacción química del metal con oxígeno en un medio electrolítico alcalino. La batería de níquel-cadmio emplea hidróxido óxido de níquel como electrodo positivo y cadmio metálico como electrodo negativo. La reacción neta bajo un electrolito de hidróxido de potasio es las siguiente:



(→: descarga; ←: carga)

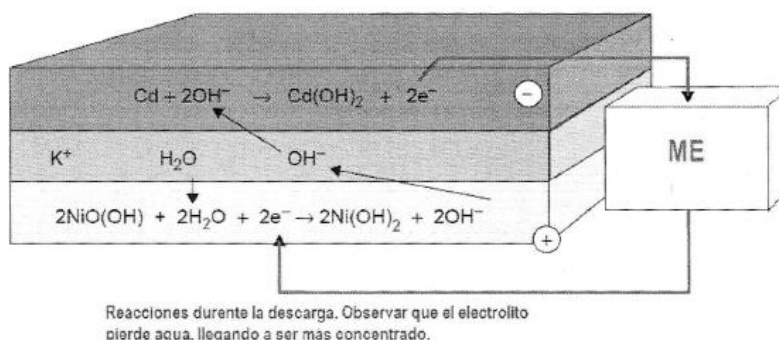


FIG 3.4 Reacciones durante la descarga en una batería de Ni-Cd. [14]

La energía específica de la batería de Ni-Cd es de 40-55 Wh/kg similar a la batería de plomo-ácido. Como ventajas de este tipo de baterías: mejor comportamiento en frío, tensión de descarga casi plana, baja autodescarga, larga vida (hasta los 2000 ciclos), carga rápida (80%-90% en 18 min) y gran fiabilidad. El mayor inconveniente es su elevado coste y que el cadmio es un metal tóxico. Otro lado negativo es que la tensión por celda es de 1,2 V, lo que para configurar 12 V necesita 10 celdas comparadas con las 6 que necesita las de plomo-ácido. Estas barreras han conducido al desarrollo de las baterías de níquel-metal-hidruro utilizadas en aplicaciones de vehículos híbridos y eléctricos.

Parámetros Batería Ni-Cd	
Energía específica	40-55 Wh/kg
Densidad de energía	70-90 Wh/l
Potencia específica	~250 W/kg
Tensión nominal de celda	1,2 V
Rendimiento	~ 75%
Auto-descarga	~ 0,5% al día muy baja
Número de ciclos	Hasta 1200 al 80% de capacidad
Tiempo de recarga	1 h (60% capacidad en 20 min)
Temperatura de funcionamiento	-40 °C - +85 °C
Disponibilidad del producto	Pequeños tamaños, difícil en grandes

Tabla 3.2 Parámetros para las baterías de níquel-cadmio. [15]

3.1.3.3. Níquel-metal-hidruro

Su funcionamiento es similar a las de Ni-Cd, la principal diferencia es que el electrodo negativo de las de Ni-MeH utiliza hidrógeno, absorbido por un metal hidruro, que la hace libre de cadmio, una gran ventaja. Una interesante característica de esta batería es que su electrodo negativo se comporta exactamente como una pila de combustible.

En las baterías de Ni-MeH, el electrodo positivo es un hidróxido óxido de níquel similar al utilizado en las de Ni-Cd, mientras que el electrodo negativo es un metal hidruro donde se almacena hidrógeno. El concepto de las baterías de Ni-MeH se basa en el hecho de que finas partículas de ciertas aleaciones metálicas, cuando se exponen al hidrógeno, bajo ciertas condiciones de presión y temperatura, absorben grandes cantidades de este gas para formar compuestos de metal hidruro. Además, los metales hidruros son capaces de absorber y liberar hidrógeno muchas veces sin degradarse. La reacción en el electrodo positivo es similar a la del Cd, el oxihidróxido de Ni se convierte en hidróxido de Ni, durante la descarga. En el electrodo negativo el H₂, se libera del metal formando agua y electrones FIG 3.5.

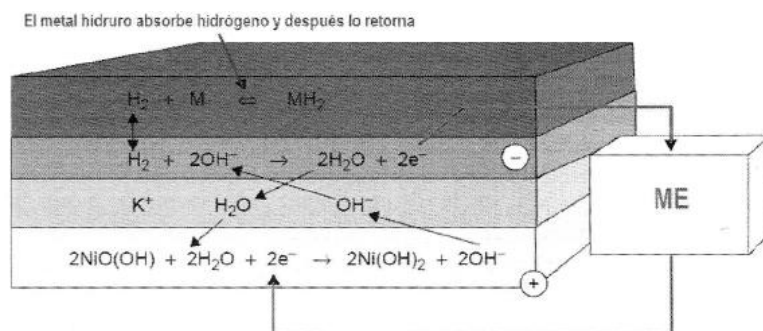


FIG 3.5 Reacciones durante la descarga en una batería de Ni-MeH. [14]

En términos de energía y potencia específica la batería de Ni-MeH es mayor que la de Ni-Cd, con un rango de energía específica entre 60 y 70 Wh/kg. La potencia específica de estas baterías puede alcanzar los 200 W/kg. La batería de Ni-MeH tiene mayor duración que las de plomo-ácido, presentando unas condiciones aceptables con relación a la seguridad y manejabilidad. Las desventajas de estas baterías es que son caras, tienen efecto memoria, son exotérmicas durante la carga y tienen bajo rendimiento. La batería Ni-MeH es probable que en el futuro se mantenga liderando, junto a las de Li-ión, el mercado de las baterías recargables para aplicaciones automovilísticas.

Parámetros Batería Ni-MeH	
Energía específica	60-70 Wh/kg
Densidad de energía	~ 150 Wh/l
Potencia específica	200 W/kg
Tensión nominal de celda	1,2 V
Rendimiento	~ 70%
Auto-descarga	Pobre hasta un 5% al día
Número de ciclos	Hasta 1000 al 80% de capacidad
Tiempo de recarga	1 h (60% capacidad en 20 min)
Temperatura de funcionamiento	Ambiente
Disponibilidad del producto	Disponible comercialmente

Tabla 3.3 Parámetros para las baterías de níquel-metal hidruro. [15]

3.1.3.4. Litio-ión

Las baterías de litio-ión está consideradas actualmente como una de las tecnologías más importantes para almacenaje de la energía eléctrica en vehículos eléctricos. Poseen gran eficiencia, sin embargo, deben superar todavía determinados problemas de seguridad y su exagerado coste.

La principal característica de esta pila es que los materiales activos de ambos electrodos son compuestos de intercalación capaces de insertar o desinsertar Li^+ reversiblemente. Para que estos procesos sean eficaces es necesario que los materiales tengan estructuras abiertas, por ejemplo, estructuras laminares o canales estructurales por los que pueda moverse los iones de Li^+ . En las baterías de Li-ión, el electrodo negativo es litio intercalado con carbono con la forma del grafito, mientras que el electrodo positivo puede ser algunos óxidos de litio.

En la FIG 3.6 se observa el proceso de descarga de una celda de Li-ión. Durante el proceso de descarga, los iones de litio se liberan del electrodo negativo, viajando a través del electrolito orgánico hasta alcanzar el electrodo positivo, donde se incorporan rápidamente en el material compuesto de litio.

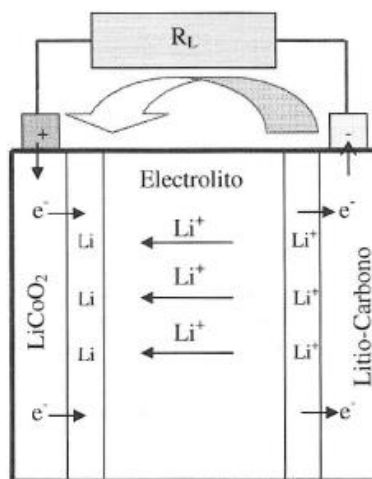


FIG 3.6 Esquema de una celda de Li-ión. [14]

Durante la operación de carga, los iones de litio se mueven en sentido contrario desde el electrodo positivo al negativo.

Las baterías de Li-ión tienen una alta energía específica, una elevada potencia específica, un buen comportamiento a altas temperaturas, baja autodescarga y son reciclables. Un punto importante de estas baterías es la necesidad de un buen sistema de control de la tensión de las celdas durante su carga. Estas características hacen de este tipo de batería altamente adecuadas para su aplicación en el campo de los vehículos híbridos y eléctricos por lo que las hace ser una de las más utilizadas por los fabricantes.

Parámetros Batería Li-ión	
Energía específica	90-120 Wh/kg
Densidad de energía	250 Wh/l
Potencia específica	~ 300 W/kg
Tensión nominal de celda	3,5 V
Rendimiento	~ 90%
Auto-descarga	Muy baja, 10% al mes
Número de ciclos	>1000
Tiempo de recarga	2-3 h
Temperatura de funcionamiento	Ambiente
Disponibilidad del producto	Disponible comercialmente

Tabla 3.4 Parámetros para las baterías de litio-ión. [15]

3.1.3.5. Litio polímero

Estas baterías se consideran de estado sólido porque sus electrolitos son sólidos. El más común es el óxido de polietileno. Como electrodo positivo se usa solo el óxido de vanadio. Tienen la mayor energía y potencia específicas. La utilización de polímeros sólidos tiene, respecto a la seguridad, una gran ventaja en caso de accidente del vehículo. Ya que el litio se intercala en el electrodo de carbono, el litio está en forma iónica que resulta menos reactivo que el litio metálico. La delgada celda de Li-polímero proporciona una ventaja añadida para su adaptabilidad a diferentes espacios y tamaños dentro del chasis de los vehículos híbridos y eléctricos. La principal desventaja de las baterías de Li-polímero es que tiene que funcionar a temperaturas entre 60°C y 120°C. Otra desventaja muy importante de estas baterías es que se hacen inestables si se sobrecargan o si se descargan por debajo de un cierto umbral.

3.1.3.6. Sodio-azufre

El sodio, similar al litio, presenta un elevado potencial electroquímico y una baja masa atómica, lo que le hace atractivo como electrodo negativo en las baterías. Además, el sodio es abundante en la naturaleza y a bajo coste. El azufre, que es una elección posible como electrodo positivo, también está fácilmente disponible y a bajo coste. El uso de electrolitos acuosos no es posible debido al carácter altamente reactivo del sodio. La solución se encuentra en beta-alúmina, que es un óxido de aluminio y sodio con una compleja naturaleza cristalina.

La temperatura de operación de estas baterías está alrededor de los 300°C, lo que requiere un adecuado sistema de aislamiento, así como un sistema de gestión térmica. Otra desventaja es la ausencia de un mecanismo de sobrecarga. Al máximo de carga, una o varias celdas desarrollan una gran resistencia, que tiran abajo la tensión de las celdas de la batería conectadas en serie. Otro importante problema está del lado de la seguridad, ya que la reacción química entre el sodio fundido y el azufre puede causar excesivo calor y explosiones en caso de accidentes.

Parámetros Batería Na-S	
Energía específica	150-240 Wh/kg
Densidad de energía	150 Wh/l
Potencia específica	230 W/kg
Tensión nominal de celda	2,7 V
Rendimiento	~ 85%
Auto-descarga	Muy baja, hay que aplicar energía para mantenerla caliente cuando no se usa
Número de ciclos	1000 al 80% de capacidad
Tiempo de recarga	8 h
Temperatura de funcionamiento	300-350 °C
Disponibilidad del producto	Difícil para aplicaciones de tracción

Tabla 3.5 Parámetros para las baterías de sodio-azufre. [15]

3.1.3.7. Sodio-metal cloruro

Son una de las baterías que más prometen también conocidas como ZEBRA. Se derivan de las de sodio-azufre, pero con consideraciones respecto a la sobrecarga y el proceso de descarga. Su construcción es similar a las de sodio-azufre, pero el electrodo positivo de azufre, se sustituye por uno de cloruro de níquel o una mezcla de cloruro de níquel y cloruro de hierro. En la FIG 3.7 se muestra un esquema de tipo de batería

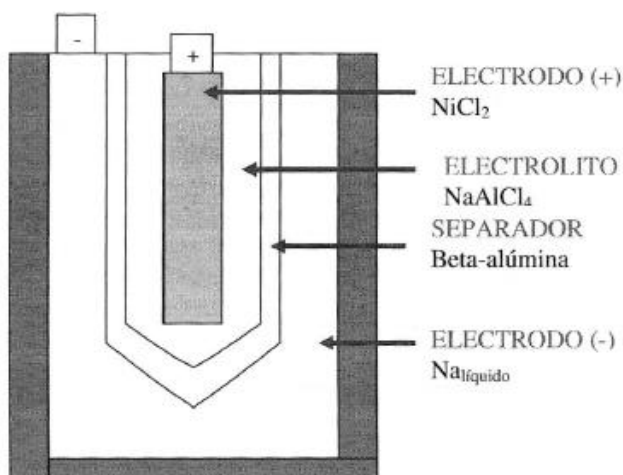


FIG 3.7 Esquema de una celda de una batería de sodio-metal cloruro. [14]

Con el objetivo de proporcionar un buen contacto iónico entre los electrodos positivo y negativo, entre ambos sólidos se introduce un segundo separador electrolítico de cloruro de aluminio y sodio en una capa entre el NiCl_2 y la beta-alúmina. El electrolito NaAlCl_4 es un componente vital en estas baterías, aunque reduce la energía específica en un 10%. La temperatura de funcionamiento es elevada. Las reacciones de descarga para los electrodos positivo y negativo se representan en la FIG 3.8.

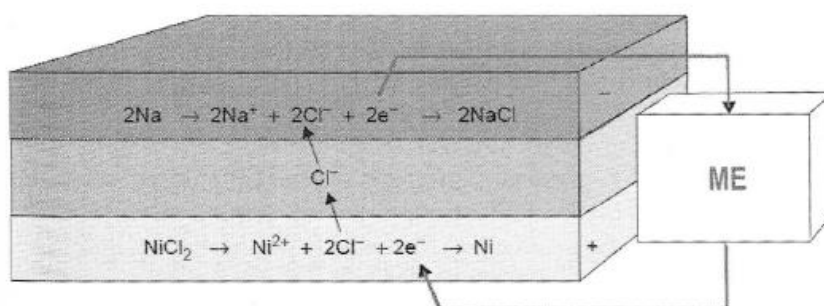


FIG 3.8 Reacciones durante la descarga en una batería de sodio-metal cloruro. [14]

Las baterías ZEBRA han mostrado ser seguras bajo condiciones normales de uso. Muestran un alto potencial para su utilización en aplicaciones de vehículos híbridos y eléctricos.

Parámetros Batería Na-MeCl	
Energía específica	90-120 Wh/kg
Densidad de energía	150 Wh/l
Potencia específica	130-160 W/kg
Tensión nominal de celda	2,5 V
Rendimiento	~ 80%
Auto-descarga	10% al día, pero cuando no se está utilizando hay que aplicar energía para mantenerla caliente
Número de ciclos	>1000
Tiempo de recarga	8 h
Temperatura de funcionamiento	300°C - 350°C
Disponibilidad del producto	Disponible comercialmente

Tabla 3.6 parámetros para las baterías de sodio-metal cloruro. [15]

3.1.3.8. Aluminio-aire

La reacción química de la batería de aluminio-aire es esencialmente simple. El aluminio se combina con el oxígeno del aire y el agua para formar hidróxido de aluminio, liberando energía eléctrica en el proceso.

El electrodo negativo está constituido por una placa de aluminio delgada. Según tienen lugar las reacciones químicas el espesor se va reduciendo progresivamente. El electrodo positivo es una estructura porosa, que consta de una malla metálica sobre la que se imprime una capa de carbono catalizado. Una fina capa de teflón da la necesaria porosidad para dejar que el oxígeno entre, pero previene que el electrolito salga. El electrolito es una solución alcalina, como el hidróxido de potasio.

La batería se recarga sustituyendo los electrodos gastados. El electrolito tendrá que ser reemplazado normalmente, ya que estará contaminado de hidróxido de aluminio.

El principal inconveniente de esta batería es su baja potencia específica. Por ejemplo 100 kg de batería solo proporcionan 1 kW de potencia en el vehículo lo que es claramente insuficiente.

Parámetros Batería Al-aire	
Energía específica	225 Wh/kg
Densidad de energía	195 Wh/l
Potencia específica	10 W/kg
Tensión nominal de celda	1,4 V
Auto-descarga	Muy baja, (<10% al día)
Número de ciclos	>1000
Tiempo de recarga	10 min mientras se sustituye
Temperatura de funcionamiento	Ambiente
Disponibilidad del producto	Solo disponible en sistemas estacionarios

Tabla 3.7 Parámetros del batería de aluminio-aire. [15]

3.1.3.9. Zinc-aire

Las baterías de zinc-aire son muy similares a las de aluminio-aire pero con un comportamiento global bastante mejor, particularmente en lo relativo a la potencia específica que es del orden de 10 veces mayor, haciéndola más adecuada para aplicaciones automovilísticas. Las baterías de Zn-aire tienen un electrodo positivo poroso en el que el oxígeno reacciona con el electrolito y un electrodo negativo de zinc metálico. El electrolito es una solución alcalina.

La energía de la batería se obtiene por combinación del zinc con el oxígeno del aire formando óxido de zinc. Dependiendo del estado de los electrodo y electrolito, el hidróxido de zinc se puede formar como en las baterías de aluminio-aire. El proceso normalmente es irreversible.

En la práctica, la batería de zinc-aire solo es recargable por sustitución del producto que se descarga, el óxido de zinc, por electrodos nuevos de zinc. En este sentido, la batería de zinc-aire presenta una similitud y una competencia en el futuro, con la pila de combustible, aunque aquí el combustible es el zinc metálico.

Entre sus principales ventajas destaca la facilidad de carga y su alto potencial energético. A diferencia de otros tipos de baterías, estas necesitan que el vehículo vaya equipado con un sistema de suministro de aire filtrado. Las baterías de zinc-aire una vez agotada la carga no pueden recargarse, sino que hay que extraer el zinc y cargarlo fuera de la batería. Sin embargo, la carga del zinc es fácil y rápida. Este tipo de batería puede proporcionar tres veces más de duración que las de plomo-ácido. Además, presentan como principal ventaja la posibilidad de ser recicladas sin límite, sin perder sus cualidades químicas, ni sus cualidades físicas.

Parámetros Batería Zn-aire	
Energía específica	230 Wh/kg
Densidad de energía	270 Wh/l
Potencia específica	105 W/kg
Tensión nominal de celda	1,2 V
Auto-descarga	Alta ya que el electrolito queda en la celda
Número de ciclos	>2000
Tiempo de recarga	10 min mientras se sustituye
Temperatura de funcionamiento	Ambiente
Disponibilidad del producto	Solo unos pocos suministradores

Tabla 3.8 Parámetros para las baterías de zinc-aire. [15]

3.1.4. Criterios de selección de las baterías [3]

Los criterios más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de elegir una batería para su aplicación en vehículos eléctricos son: la cantidad de energía que puede almacenar (ya sea por unidad de masa o de volumen: Wh/kg o Wh/l), la potencia específica que puede proporcionar, la fiabilidad, la duración, la seguridad y el coste. De la cantidad de energía almacenada va a depender la autonomía del vehículo, teniendo siempre en cuenta el consumo del motor y otros sistemas. La potencia puede entenderse como la velocidad con la que la batería puede ceder o almacenar energía. Una batería potente es capaz de ceder una alta cantidad de energía si el motor requiere realizar un sobreesfuerzo, por ejemplo en una pendiente muy pronunciada. O también será capaz de acumular mucha energía cuando el motor la ceda actuando como generador en una frenada brusca. Estos parámetros siempre se valoran respecto al peso o volumen de la batería, ya que no sería eficiente tener mucha capacidad o potencia, pero con un peso desmesuradamente elevado. Para poder comparar las diferentes tecnologías, se habla siempre de densidad de energía, de potencia específica y/o energía específica.

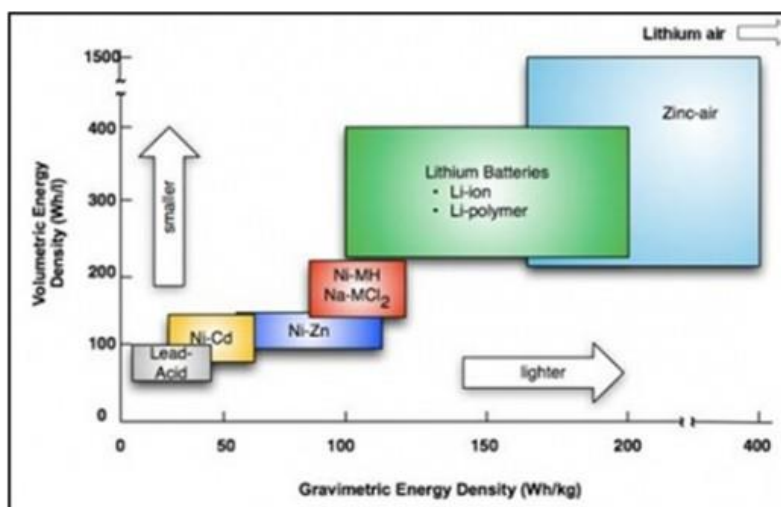


FIG 3.9 Densidades de energía de las diferentes tecnologías de baterías. [4]

La fiabilidad y la duración son requisitos que obviamente se exigen a cualquier componente, pero en el caso de las baterías que pueden sufrir una degradación en sus celdas a medida que se utilizan, son aspectos muy valorados.

Debido al riesgo que una elevada concentración de energía pueda suponer, al que se añaden los peligros de ciertas reacciones químicas bajo condiciones desfavorables creadas por un mal uso, la seguridad en las baterías es un factor determinante cuando se plantea equiparlas en vehículos destinados al transporte de personas. Cuanto más elevado sea la tensión de la celda de la batería, menos celdas conectadas se requerirán en un pack de baterías para conseguir la tensión de alimentación deseada.

Finalmente, la viabilidad del proyecto va a depender del coste, tanto desde el punto de vista de los fabricantes, como de los usuarios. No se puede plantear una alternativa a los vehículos de combustión si el precio en este caso de las baterías es prohibitivo.

3.1.5. Modelado y simulación de baterías [15]

Se ha procedido a realizar unas simulaciones usando Matlab, que nos proporcionarán una aproximación más cercana al comportamiento real de las baterías utilizadas en los vehículos eléctricos. Estas simulaciones son válidas tanto para baterías de plomo-ácido como de NiCd, diferenciándose entre sí en el modelo utilizado para caracterizar cada una de ellas. Por lo tanto, una batería puede ser representada conociendo las ecuaciones que rigen su comportamiento, y de esta forma se puede determinar con mayor exactitud las prestaciones finales del vehículo.

Realizar el modelado real de una batería es proceso difícil. El rendimiento de la misma depende de cantidades razonablemente fáciles de medir, como la temperatura, y la tensión. Sin embargo, también dependen de parámetros mucho más difíciles de especificar con precisión, como la edad o la forma en que la batería se ha utilizado en el pasado. Es por ello que se ha seleccionado las baterías de plomo-ácido y níquel-cadmio para las simulaciones por tener modelos mucho más simples. El primer paso para simular una batería será construir un circuito equivalente que nos dé una buena aproximación al comportamiento de la batería FIG 3.10.

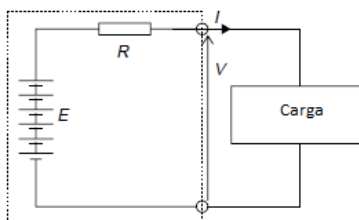


FIG 3.10 Circuito equivalente de una batería conectada la carga. [15]

La batería se representa con un voltaje fijo E (tensión de las celdas de la batería conectadas en serie), pero la tensión en sus terminales es un voltaje diferente V, a causa de la caída de tensión a través la resistencia interna R. Suponiendo que una corriente I, que fluye hacia fuera de la batería, por la teoría básica de circuitos podemos decir que:

$$V=E-IR$$

Ecuación 3.2

Por lo tanto, si la batería se está descargando, entonces está claro que el voltaje disminuye por IR. Por lo que en las baterías de vehículos eléctricos la resistencia interna debe ser lo más baja posible. El valor de la resistencia interna de la batería dependerá del tipo de batería usado. Para las baterías de plomo-ácido la resistencia interna de la batería sería la siguiente:

$$R=n^{\circ}celdas \times \frac{0,022}{C_{10}}$$

Ecuación 3.3

En el caso de las baterías de NiCd se deberá seguir esta otra forma de calcular la resistencia interna de la batería:

$$R=n^{\circ}celdas \times \frac{0,06}{C_3}$$

Ecuación 3.4

Los términos C_{10} y C_3 hacen referencia a la velocidad de descarga de una batería. Para C_{10} indica que la batería se descarga en 10h y para C_3 lo hace en 3 h.

A partir este simple modelo, aplicándolo a las baterías de plomo-ácido y NiCd, podríamos simular la descarga de una batería en función de la corriente demandada o la potencia demanda por el motor siguiendo los siguientes pasos:

- Calculamos las tensiones de circuito abierto:

Para el caso del plomo-ácido partimos del siguiente modelo:

$$E = n^{\circ}celdas \times (2,15 - DoD \times (2,15-2,00))$$

Ecuación 3.5

Y en el caso del NiCd partimos de este otro modelo:

$$E=n^{\circ}celdas \times \left(\begin{array}{l} -8,2816DoD^7+23,5749DoD^6-30DoD^5+23,7053DoD^4 \\ -12,5877DoD^3+4,1315DoD^2-0,8658DoD+1,37 \end{array} \right)$$

Ecuación 3.6

Dónde: E es la tensión de circuito abierto y DoD es la profundidad de descarga. Estos modelos estarán implementados en las funciones de Matlab `tension_circuito_abierto_PbA.m` y `tension_circuito_abierto_NiCd.m`.

- Cálculo de la corriente por la batería:

Si combinamos la ecuación de potencia eléctrica con la ecuación 3.2, obtenemos lo siguiente:

$$P = V \times I = (E - I R) \times I = E I - R I^2$$

Ecuación 3.7

Despejando de la ecuación de segundo grado anterior obtendríamos el valor de la corriente por la batería.

- Calculo de la capacidad:

Se calcula la capacidad de la batería usando la expresión de Peukert vista en el apartado 3.1.2 ecuación 3.1. Esta relación indica que la capacidad de la batería depende de la corriente de descarga. A partir de ella los siguientes puntos de la simulación se irán actualizando con el valor de los puntos obtenidos de la carga sustraída en el punto anterior.

- Actualizar el nivel de descarga:

En función de los datos obtenidos de la carga sustraída y de la capacidad de Peukert (calculada a partir de la corriente demandada por el motor) obtenemos la profundidad de descarga como el cociente entre ambos valores. Esta profundidad de descarga (DoD) es cero cuando la batería está completamente cargada y es uno cuando se encuentra descargada. Aunque normalmente se asigna un valor próximo a uno en el que la batería se la considera 'muerta' para finalizar la simulación.

Con los pasos anteriormente explicados obtenemos los siguientes resultados para la descarga de una batería de plomo-ácido a corriente constante.

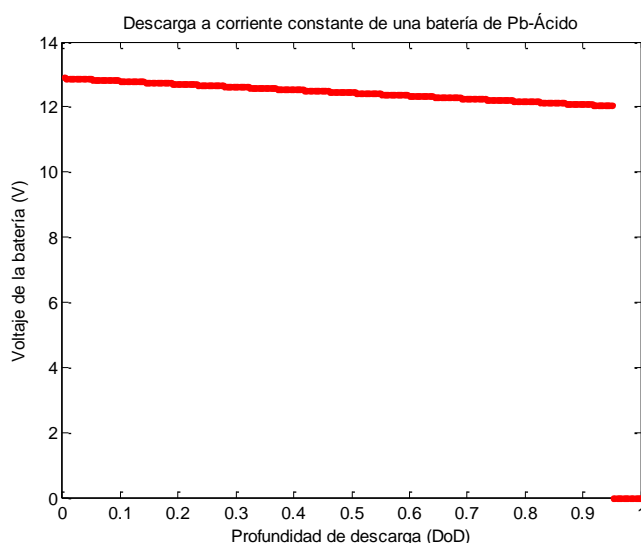


FIG 3.11 Descarga de una batería de plomo-ácido a corriente constante implementado en el programa DescargaBatPbA.m. [elaboración propia]

En este caso se ha representado el voltaje de la batería frente a la profundidad de descarga. Como se aprecia las baterías de plomo-ácido según se van descargando disminuye el voltaje en sus terminales, debido a la caída de tensión de la resistencia interna. Pero esta disminución es muy ligera al ser la resistencia interna de este tipo de baterías de plomo-ácido extremadamente pequeña. La disminución del voltaje tiene un comportamiento lineal como se observa en la FIG 3.11 debido al modelo del que partimos, en el cual la profundidad de descarga (DoD) es proporcional a la tensión en circuito abierto (E). Cuando se alcanza un valor de 0.95 consideramos en este caso que la batería esta descargada. El procedimiento y los datos utilizados para la simulación se recogen en el código implementado en el programa de Matlab DescargaBatPbA.m.

Ahora presentamos los resultados para una descarga a corriente constante de la batería de NiCd.

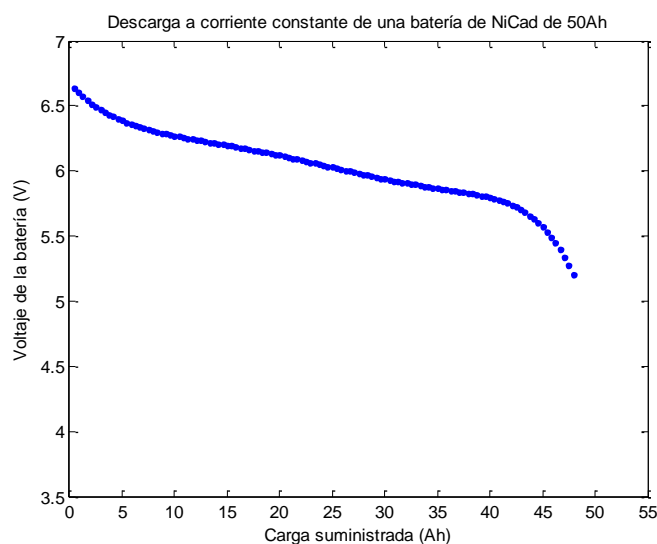


FIG 3.12 Descarga a corriente constante de una batería de Níquel-Cadmio implementado en el programa NiCd.m. [elaboración propia]

En este caso se ha representado el voltaje de la batería frente a lo corriente suministrada por la misma en Ah. Como se aprecia también se produce una disminución en el voltaje a medida que la batería se descarga, pero en este caso esta disminución es de mayor intensidad debido a que la resistencia interna de este tipo de baterías es superior a las de plomo-ácido. Ahora la disminución del voltaje en los terminales de la batería no tiene un comportamiento lineal como en el caso anterior; debido a que el modelo inicial del que partimos es de orden superior y mucho más complejo que el de las baterías de plomo-ácido. El procedimiento y los datos utilizados en esta simulación se recogen en el código implementado en Matlab NiCd.m.

Por último, se ha representado la descarga de una batería de plomo-ácido a una potencia constante demandada por el motor del vehículo eléctrico.

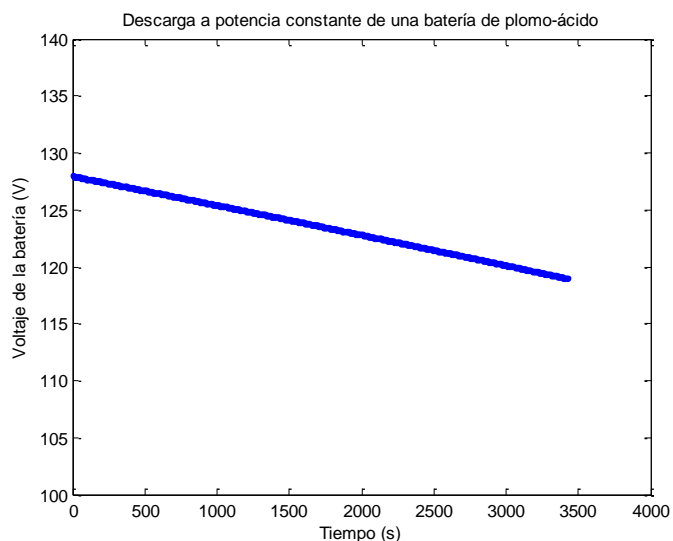


FIG 3.13 Descarga a potencia constante de una batería de plomo-ácido implementado en el programa PbAcido.m. [elaboración propia]

En la gráfica se ha representado la variación del voltaje frente al tiempo. La batería suministra una potencia constante al motor hasta que se descarga en el segundo 3.500. Al igual que en los anteriores casos se produce una disminución del voltaje en los terminales de la batería según se va descargando y al ser una batería de plomo-ácido este comportamiento observado en la gráfica responde al modelo lineal implementado. El procedimiento y los datos de esta simulación se recogen en el código implementado en Matlab PbAcido.m

3.2. Ultracondensadores [16]

Los ultracondensadores se caracterizan por tener una potencia específica más alta y una energía específica más baja que las baterías. Su energía específica está en el rango de unos pocos Wh/kg. Sin embargo, su potencia específica puede alcanzar los 3 kW/kg, mucho más alta que en cualquier batería. Debido a su baja densidad de energía y a la dependencia de la tensión en bornes sobre el SOC, es difícil su empleo como sistema de almacenamiento de energía para los vehículos eléctricos. No obstante, se utiliza como sistema auxiliar de energía junto con baterías. De esta manera se puede optimizar el diseño de la batería para energía específica alta y ciclos de vida, olvidándonos de la potencia específica que la suministraría el ultracondensador cuando se necesitara. Usados conjuntamente y debido además al efecto de carga muy rápida en los ultracondensadores, el efecto de la descarga rápida de la batería y la carga rápida en frenada regenerativa se minimizan, así la energía instantánea disponible y vida se incrementan significativamente.

Los más utilizados son los de doble capa. Su almacenamiento se basa en un principio puramente electrostático sin la intervención de una reacción química, donde la energía eléctrica es almacenada en la doble capa electroquímica formada en la interfase electrodo-electrolito, con una diferencia de potencial aplicada entre los electrodos. El electrolito es una solución acuosa, en el que están inmersas dos varillas de carbono entre las que se aplica un incremento de tensión no superior a 1 V, porque provocaría la descomposición eléctrica del agua. Bajo la tensión de descomposición, mientras la corriente no fluye tiene lugar una doble capa eléctrica en el borde del electrodo y electrolito. La doble capa eléctrica actúa como aislante solo bajo la tensión de descomposición FIG 3.14.

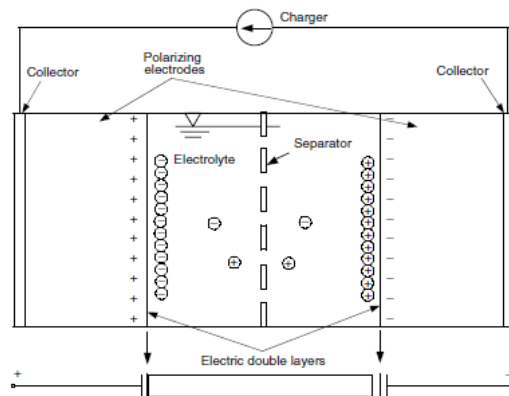


FIG 3.14 Principio básico de un condensador eléctrico de doble capa. [16]

3.3. Pila de combustible [4]

Las pilas de combustible al igual que las baterías son dispositivos electroquímicos que transforman la energía química en energía eléctrica. La diferencia entre las baterías y la pila de combustible radica en que las primeras van transformando los electrodos y el electrolito hasta que se agotan, mientras que las pilas de combustible no modifican los electrodos ni el electrolito, sino que van oxidando un combustible (hidrógeno) que se va reponiendo de modo continuo. En la FIG 3.15 se representa el principio de funcionamiento de una célula de combustible del tipo PEM (proton exchange membrane, pila con membrana de intercambio de protones).

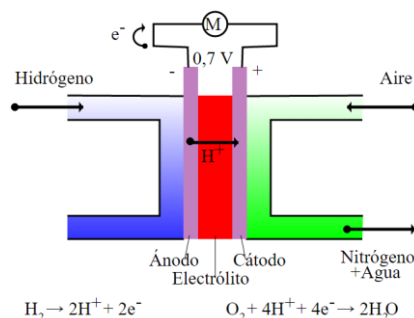


FIG 3.15 Célula de combustible PEM. [17]

Dicha membrana es un electrolito. Este electrolito es un polímero que deja pasar los protones, pero no los electrones. Los electrodos son rejillas de nanotubos metálicos (níquel o carbono) revestidos de platino. A través del polímero pasan los protones, pero los electrones son obligados a pasar a través del circuito. Puede decirse que la célula de combustible, gracias al catalizador, viene a ser la reacción inversa de la electrolisis. La tensión de la célula es de 1,2 V. Para alcanzar los valores requeridos de tensión y corriente se agrupan en serie y/o paralelo varias células. Los puntos críticos de las pilas de combustible son el precio, y la gestión de la evacuación del agua que se produce. Si esta agua no se evacua, inunda el electrodo evitando que el oxígeno entre en contacto con el catalizador, y detiene la reacción. Si se evacua en exceso, el catalizador se reseca y se agrieta, creando un cortocircuito entre el hidrógeno y el oxígeno. La reacción de oxidación pasa a ser una combustión exotérmica y violenta que destruye la pila.

Se está investigando en la obtención del hidrógeno a partir de los hidrocarburos mediante procesos químicos de reformado, y en el almacenamiento y transporte en moléculas de alta densidad energética, líquidas a la presión y temperatura atmosférica.

4. Motores eléctricos de tracción

4.1. Introducción [4,14]

Los motores eléctricos están considerados como una tecnología consolidada que ha sido utilizada durante los últimos 150 años, constituyendo la principal fuente de energía de tracción en la industria actual. Estas máquinas se caracterizan por su robustez, fiabilidad, y un alto rendimiento; y gracias a la electrónica de potencia son más fáciles de controlar. Sin embargo, aún existe una gran cantidad de investigación en curso para mejorar su eficiencia a través de nuevas alternativas de diseño, nuevos materiales y estrategias de control. Las mejoras en este sentido hasta el momento han sido muy pequeñas, pero este hecho no resta importancia ya que un ligero aumento de la eficiencia puede tener un impacto positivo acumulado que pudiera afectar a las cifras globales de toda la industria. Esta circunstancia es particularmente importante en el sector de la automoción. Un ejemplo de ello sería la tecnología de los motores de arranque de imanes permanentes con materiales magnéticos ligeros y de alta energía que tienen en su composición elementos pertenecientes al grupo de las tierras raras como es el neodimio.

Generalmente han existido dos tipos de familias de motores eléctricos diferenciadas: los motores industriales y los motores de tracción ferroviaria. Los motores industriales son fabricados a gran escala con unos costes muy ajustados, suelen ser asíncronos, no están sometidos a vibraciones importantes, su clase térmica es baja (por lo general clase F) y se consideran asequibles, fiables y robustos. Esta tecnología no puede trasladarse directamente a la tracción ya que las condiciones de operación y las tensiones a las que los motores van a estar sometidos en esta aplicación son completamente diferentes. En este punto es donde aparecen los motores ferroviarios que tienen un comportamiento más cercano a los motores de tracción existentes en la actualidad. Estos motores se caracterizan por su alta potencia (hasta 1,5 MW) con un diseño muy compacto de alta relación potencia-peso y un volumen muy reducido. Las condiciones de trabajo a las que están sometidos son muy distintas a las de los anteriores por lo que su clase térmica es elevada (clase H) lo que les hace soportar mejor las fuertes vibraciones. Desarrollan un rango muy amplio de velocidades (de 0 a 6000 rpm) y deben ser reversibles para permitir el frenado regenerativo.

Los motores eléctricos de tracción para automoción tienen exigencias funcionales y de diseño distintas a estos dos grupos, por lo que constituyen una familia independiente. Por una parte, tienen un nivel de potencia más parecido a los motores industriales y, por otra, las exigencias de diseño y las condiciones de trabajo los aproximan más a los motores de tracción ferroviaria.

Como requerimientos generales del motor eléctrico para la tracción de un vehículo eléctrico o híbrido se pueden citar los siguientes:

- Robustez.
- Alta relación par/inercia, que permita buenas aceleraciones.
- Alta densidad de par y de potencia.
- Alto par en el arranque y en pendiente y alta potencia en autopista.
- Amplio rango de velocidades, con potencia constante alrededor de 3 o 4 veces la velocidad base, y manteniendo un buen compromiso entre el requerimiento de pico de par de la máquina y el valor nominal de tensión-intensidad del inversor.
- Alto rendimiento en un amplio rango de velocidades y de par, incluso a bajos pares.
- Alto soporte frente a arranques y paradas frecuentes.
- Bajo ruido, mantenimiento y coste.
- Bajas emisiones electromagnéticas.
- Potencia constante en un amplio régimen de giro.
- Operación en diferentes entornos y condiciones climáticas.

La potencia nominal es el parámetro esencial que marca significativamente el diseño de la máquina e influye en las especificaciones del inversor de acompañamiento si es que este acompaña a la máquina. Tanto en el campo industrial como ferroviario se ha acabado imponiendo por lo general el motor asíncrono de inducción de jaula de ardilla; y concretamente en el caso de la tracción ferroviaria generalmente este está suele estar acompañado de un inversor. Sin embargo, en las aplicaciones industriales el inversor solamente es empleado en casos puramente necesarios. En el sector de la automoción no existe un modelo de motor predominante y masivamente adoptado por los fabricantes, ya que cada uno tiene sus propios pros y contras que lo diferencian del resto; y el criterio decisivo que se emplea para su selección es el rendimiento, ya que la eficiencia del motor es decisiva en el rendimiento global del vehículo. La selección del tipo de motor eléctrico por lo tanto depende del fabricante, sin que haya claramente una tecnología dominante sobre el resto, aunque suelen predominar en automoción los motores de inducción y los síncronos de imanes permanentes como veremos a continuación.

Los motores eléctricos pueden funcionar con corriente continua o con corriente alterna. Los de corriente continua se utilizaron en varios prototipos de vehículos eléctricos durante la década de 1980 fundamentalmente debido a su estado de desarrollo y su fácil control. Sin embargo, su tamaño y requerimientos de mantenimiento, están relegando la aplicación de este motor, no solo en aplicaciones automovilísticas, sino también en otros campos de la tracción mecánica. Los recientes vehículos híbridos y eléctricos utilizan motores de corriente continua y alterna sin escobillas, entre los que se incluyen los motores de inducción, los motores

de imanes permanentes y los de reluctancia conmutada. El motor de corriente alterna de inducción ha alcanzado una tecnología bastante madura, debido a la actividad de I+D desarrollada en los últimos 50 años. Su control es algo más complejo que los de corriente continua, pero con la disponibilidad de procesadores rápidos digitales, se pueden manejar con gran facilidad. Poseen un mejor rendimiento y mayor potencia específica que los de corriente continua, por lo que generalmente son los favoritos para aplicaciones de propulsión.

El competidor al motor de inducción es el motor de imanes permanentes de corriente alterna. Este motor tiene imanes en el rotor, mientras que en el estator es similar al de inducción. Los imanes pueden estar montados en superficialmente o en el interior del rotor, aunque esta última configuración presenta mayores problemas de fabricación. Su control es similar a los motores de inducción, pero con una mayor densidad de potencia. El coste de los imanes es un aspecto negativo. Los motores de imanes permanentes se clasifican en sinusoidales y trapezoidales dependiendo de la distribución del flujo magnético en el entrehierro. Los trapezoidales tienen el devanado trifásico concentrado y se conocen con el nombre de motores de corriente continua sin escobillas.

Otro candidato es el motor de reluctancia conmutada. Este tipo de motor no tiene jaula, ni devanados ni imanes en el rotor lo que le ayuda a incrementar el par y las características de inercia. El ruido y rizo en el par son sus aspectos negativos.

En la FIG 4.1 se muestran las configuraciones de algunos de los motores eléctricos comentados anteriormente.

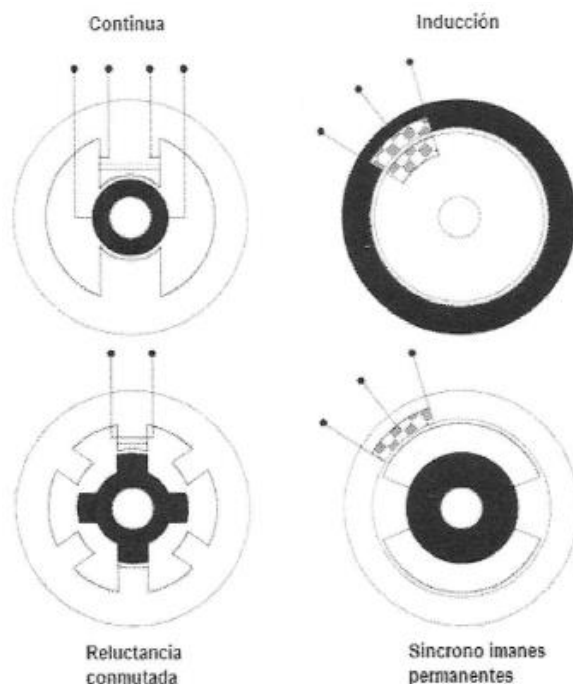


FIG 4.1 Esquema tipos de motores en automoción. [14]

El par en las máquinas eléctricas se obtienen utilizando uno de los dos principios básicos de la teoría del electromagnetismo:

- Principio de fuerza de Lorentz: donde el par se produce por la interacción mutua de dos fuerzas magnetomotrices ortogonales.
- Principio de reluctancia magnética: donde el rotor produce par según se mueve hacia una posición de mínima reluctancia magnética en un camino de reluctancia variable.

Las máquinas de corriente alterna y continua, incluyendo las de imanes permanentes, trabajan según el primer principio. Mientras que las de reluctancia conmutada, con el último.

4.2. Características ideales de la tracción en vehículos [3,4,16]

Si bien la finalidad del motor en un vehículo es la entrega de par, este no puede ser recibido por las ruedas de cualquier manera. Hay que tener en cuenta que no debe haber fluctuaciones de par y que se garantice un nivel de empuje constante. Si se produjeran estas deficientes fluctuaciones se generarían sensaciones de poca fiabilidad sobre el motor y a la vez serían muy molestas al conducir; aunque el motor estuviera cumpliendo con su función correctamente. El conductor tiene que ser capaz de gestionar correctamente y de un modo fácil la entrega de par según las condiciones de circulación.

La curva ideal para la tracción de un vehículo cualquiera podríamos decir que estaría compuesta por un tramo de par constante y elevado, con el cual se arrancaría y aceleraría el motor hasta una velocidad a la cual se entregaría la potencia nominal del motor, y a partir de ese momento convendría que la entrega de potencia fuera como mínimo la nominal. Como la potencia es el par multiplicado por la velocidad, para mantener una entrega de potencia constante el par se reduce a la vez que sube la velocidad. Naturalmente sería ideal que el motor pudiera entregar el par nominal en todo el rango de velocidades, pero para ello habría que sobredimensionar el motor, resultando mucho más grande, pesado y costoso.

Si consideramos las curvas ideales de par-velocidad de prestaciones de la tracción de un vehículo en función de la velocidad de giro del motor de la FIG 4.2, puede observarse que existe una velocidad denominada velocidad base que separa dos regiones. La parte de la izquierda es la zona de bajas velocidades, inferiores a la velocidad base. En ella el motor suministra el par máximo a cualquier velocidad. Al ser el par constante con la velocidad, la potencia aumenta linealmente con la velocidad. Esta zona se denomina región de par máximo o de par constante. Ese par constante debe ser inferior al máximo par que permite la adherencia del neumático a la calzada. Con este comportamiento se obtiene a bajas velocidades un alto par,

necesario para arrancar, acelerar y superar pendientes. En la otra zona de altas velocidades, mayores que la velocidad base, el motor suministra la potencia máxima a cualquier velocidad. Al ser la potencia constante con la velocidad, el par disminuye hiperbólicamente con la velocidad. A esta zona se la denomina región de potencia máxima o de potencia constante.

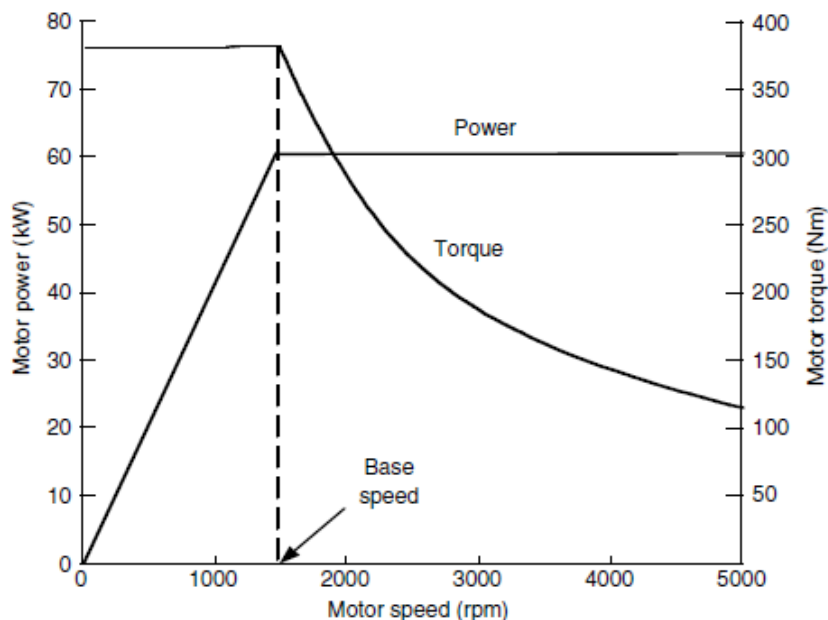


FIG 4.2 Perfil ideal de la relación par/potencia - velocidad en un vehículo. [16]

Centrándonos ahora en las prestaciones del motor de combustión interna, mostradas por la FIG 4.3 y por la FIG 4.4; en ellas se recoge una representación gráfica de la potencia, el par, el consumo y el rendimiento en función de la velocidad. Lo primero que apreciamos es que las curvas no comienzan a velocidad cero porque este motor no puede arrancar por sí mismo, necesitando un motor auxiliar de arranque. Si, una vez en marcha, se baja de esta velocidad inicial, el motor se cala. Una vez arrancado el par crece ligeramente, alcanza el máximo para unas revoluciones bajas, y desciende ligeramente debido a las características de funcionamiento del motor (aumento de pérdidas en el colector de aire, en la fricción mecánica y en la viscosidad) dando como resultado una curva bastante plana. La potencia suministrada por el motor crece hasta alcanzar un máximo para unas revoluciones altas, que es también el punto de máximo rendimiento del motor. Las revoluciones máximas del motor se establecen ligeramente por encima de las revoluciones que dan la potencia máxima.

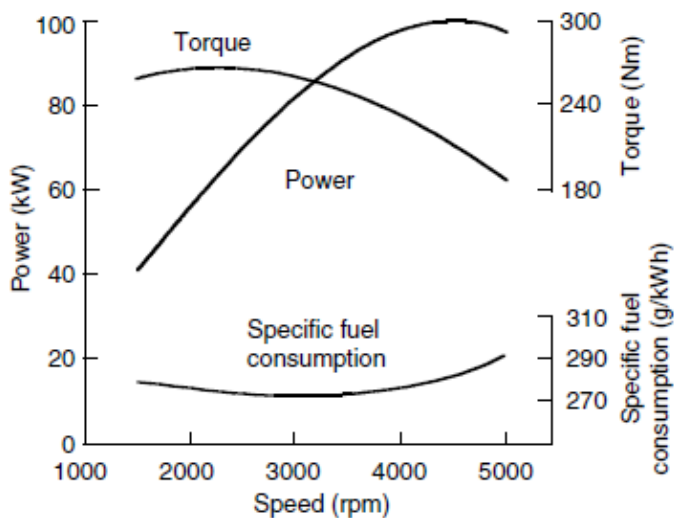


FIG 4.3 Potencia, par y consumo para un vehículo de combustión interna. [16]

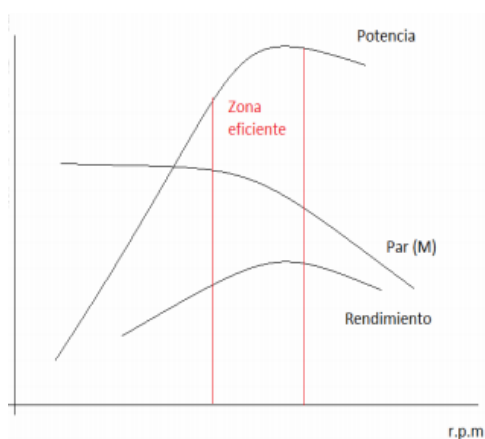


FIG 4.4 Potencia, par y rendimiento para un vehículo de combustión interna. [4]

Por lo tanto, en el motor de combustión, la relación entre el motor y las ruedas pasa por una caja de cambios que ayuda a perfilar y adaptar la curva par-velocidad del motor con la que idealmente sería necesaria en una aceleración continua hasta la velocidad deseada. De este modo se puede conseguir que el vehículo funcione en un amplio rango de velocidades estando siempre el motor en el estrecho margen de revoluciones que suministra rendimiento, potencia y par elevados con unas revoluciones aceptables: ni tan bajas para que se cale el motor, ni tan altas para que aumente en exceso su desgaste, ruido y calentamiento FIG 4.5.

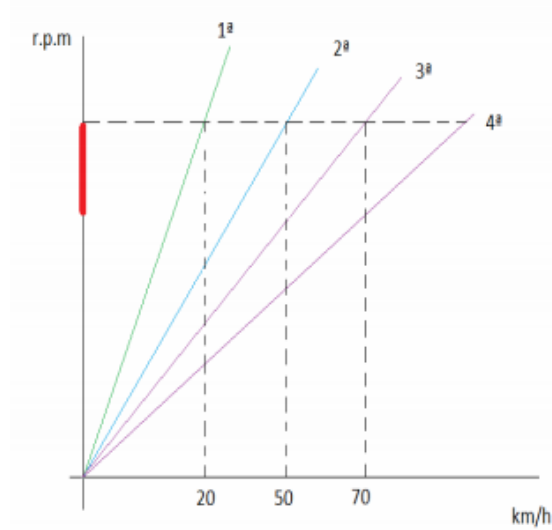


FIG 4.5 Marcha adecuada para velocidad de giro del motor en función de la velocidad del vehículo en motores de combustión interna. [4]

Observando la FIG 4.6, donde se representan las curvas de par-velocidad que se obtiene con un vehículo de combustión interna, a través del cambio de marchas, y con cada una de ellas, se puede ver que el solapamiento de todas intenta conseguir el perfil ideal de la FIG 4.2 anteriormente explicado. Es así como la caja de cambios en los vehículos con motores de combustión interna se encarga de acercar la curva de par (y también la de potencia) al comportamiento ideal.

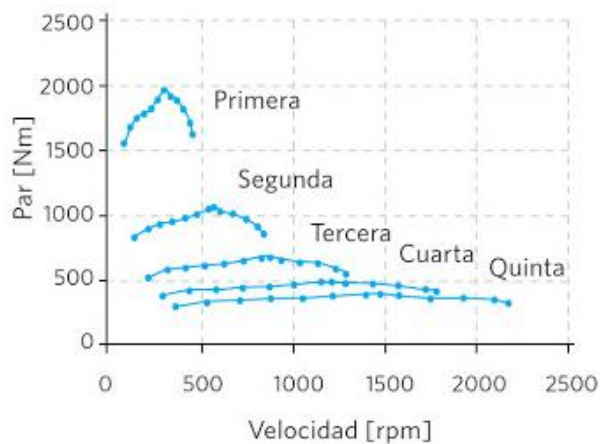


FIG 4.6 Perfil de relación par-velocidad de un motor de combustión interna. [3]

En el caso de los motores eléctricos la curva característica de tracción está caracterizada por la relación de velocidades, x , siendo diferente para cada tipo de motor. Esta relación x se define como el cociente entre la velocidad máxima (crítica del motor) y su velocidad base; y cada tipo de motor eléctrico tiene limitado su valor. Por ejemplo, un motor de imanes permanentes tiene una baja x , normalmente menor a 2, debido a la dificultad de un campo débil por su magnetismo permanente. El de reluctancia conmutada puede alcanzar $x=6$ y el de inducción $x=4$.

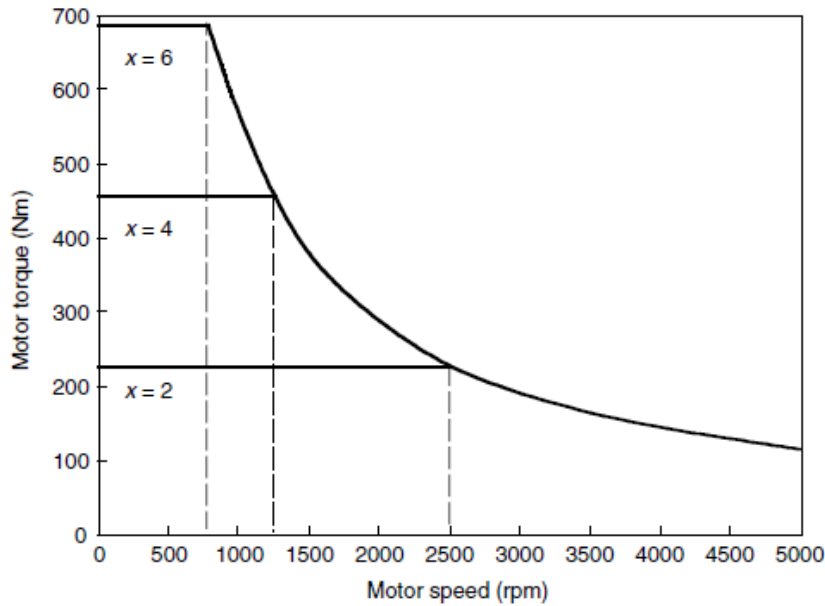


FIG 4.7 Curvas características de un motor eléctrico para $x = 2, 4$ y 6 . [16]

Curiosamente como vemos en la FIG 4.7 la curva característica de un motor eléctrico casi coincide con la curva considerada como ideal para un vehículo, por lo que garantizando el funcionamiento del motor en una amplia gama de velocidades, el comportamiento de este será muy próximo al ideal, ahorrando el nada simple sistema de transmisión con cambio de marchas.

Además, como el motor eléctrico tiene un par alto incluso en el arranque, es decir no se cala a baja velocidad como es el caso de los motores de combustión interna, hace definitivamente superflua el uso de la caja de cambios. La transmisión se reduce, como mucho, a un engranaje fijo que acopla el motor a las ruedas. Aun sin ella el comportamiento como hemos dichos anteriormente se ajustaría bastante bien, aunque no a la perfección, al comportamiento ideal mostrado en la FIG 4.2.

4.3. Clasificación [4]

Las máquinas eléctricas se pueden clasificar de acuerdo a muchos criterios diferentes. La forma externa del motor está determinada principalmente por la dirección del campo magnético en el circuito electromagnético de la máquina. La FIG 4.8 muestra una clasificación de los diferentes tipos de motores eléctricos usados en el campo de la tracción del automóvil de acuerdo con la dirección del flujo magnético. Como se describe en la siguiente figura, los motores eléctricos se pueden dividir en tres familias.

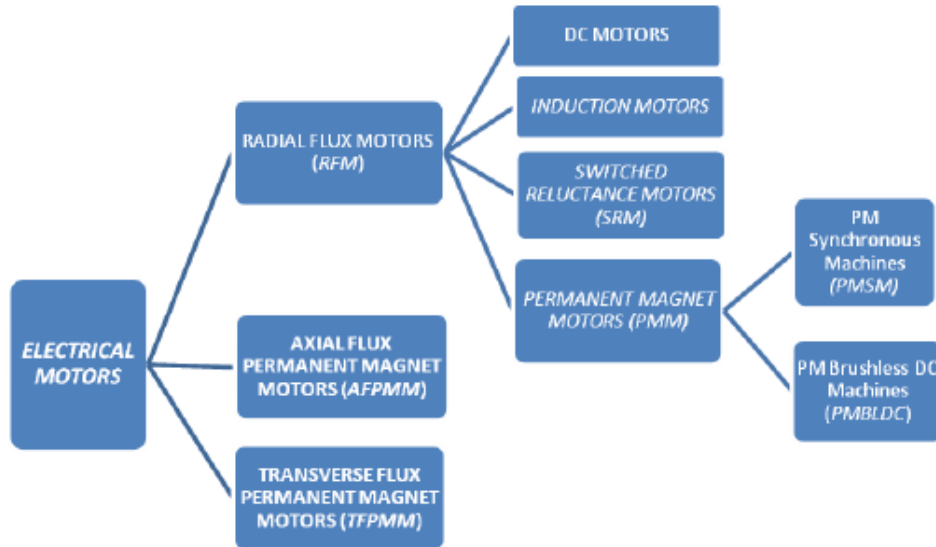


FIG 4.8 Clasificación de los motores eléctricos de acuerdo a la dirección del flujo magnético. [4]

De acuerdo a la dirección del campo magnético tenemos por lo tanto 3 grupos diferentes: motores de flujo radiales, motores de flujo axial y motores de flujo transversal. Siguiendo el tipo de clasificación de motores eléctricos que hemos realizado, detallaremos cada tipo de motor utilizado para la propulsión de vehículos híbridos y eléctricos a continuación.

4.4. Motores de flujo radial

En los motores de flujo radial, el campo magnético en la máquina se desplaza radialmente a través del entrehierro. La dirección de la corriente en los conductores tiene que ser axial. De este modo el campo radial actúa sobre la corriente axial con una fuerza tangencial que hace girar al rotor.

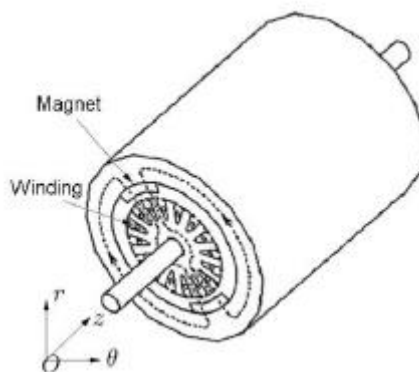


FIG 4.9 Forma típica de un motor de flujo radial. [4]

4.4.1. Motor de corriente continua

Los motores eléctricos de continua se han utilizado en aplicaciones donde se ha requerido velocidad ajustable, buena regulación de la velocidad y arranques y paradas frecuentes junto con reversibilidad. Fueron los primeros utilizados en aplicaciones de tracción debido fundamentalmente a su característica de simplicidad en el control. Dominaron la tracción eléctrica en ferrocarriles hasta la aparición de la alta velocidad y se utilizaron inicialmente en los prototipos de vehículos eléctricos cuando éstos resurgieron en la segunda mitad del siglo XX.

Como atributos positivos de los motores de continua podemos destacar los siguientes:

- Fácil control debido a su linealidad.
- Capacidad de proporcionar par independiente y control del flujo.
- Tecnología de fabricación madura.
- Permiten un funcionamiento instantáneamente reversible y frenado regenerativo.

Como inconvenientes se incluyen los siguientes:

- Desgastes de las escobillas que conduce a un elevado mantenimiento.
- Velocidad máxima baja, en comparación con otros motores.
- Emisiones electromagnéticas debido al conmutador.
- Baja relación potencia-peso; son más pesados y más grandes que otras máquinas con la misma potencia nominal.
- Bajo rendimiento.

4.4.1.1. Principio de funcionamiento [15]

El principio de funcionamiento básico de un motor de corriente continua es sencillo. Básicamente consiste en un hilo dentro de un campo magnético al que se le hace pasar una corriente, y se produce una fuerza que actúa sobre el hilo.

Basándonos en la FIG 4.10; la corriente fluye a través de la de la escobilla X, el conmutador de semi-anillo A, da la vuelta por el hilo y regresa por el conmutador de semi-anillo B y la otra escobilla Y. La fuerza es perpendicular al hilo y al campo magnético como se representa en la figura. Las dos fuerzas hacen que el hilo y el conmutador giren. Una vez que el hilo se encuentra fuera del campo magnético su momento cinético hace que siga girando hasta que el semi-anillo contacta con la escobilla de nuevo.

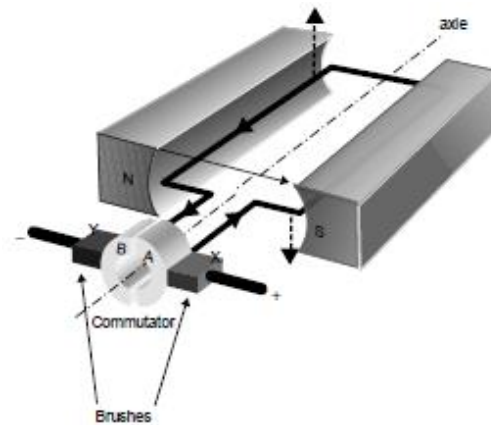


FIG 4.10 Principio de funcionamiento básico de un motor de corriente continua. [15]

En la práctica un motor de corriente continua sigue el esquema de funcionamiento presentado a continuación en la FIG 4.11.

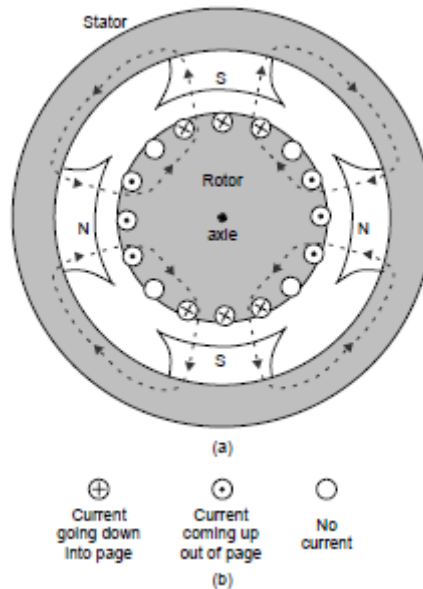


FIG 4.11 a) Corte transversal de un motor de corriente continua de 4 polos (las líneas de puntos muestran el flujo magnético. b) Convenio utilizado para indicar la dirección del flujo de la corriente en los hilos. [15]

El motor de corriente continua consta por lo tanto de los siguientes elementos:

- El hilo, denominado armadura, se bobina en un núcleo de hierro, de manera que el campo magnético no tiene que atravesar un gran hueco de aire, evitando así, que se debilite el campo.
- Normalmente se utilizan varios hilos de manera que una mayor cantidad de corriente está en contacto con los imanes. Esto significa que el conmutador está compuesto de tantos segmentos como de bobinas se incluyan.
- Cada bobina consta de varios hilos para incrementar el par.
- Se utilizan más de dos imanes para incrementar la fuerza de giro.

4.4.1.2. Característica par-velocidad [15]

La característica par-velocidad determina el funcionamiento de la máquina. La ecuación 4.1 muestra la relación del par con el régimen de giro.

$$T = \frac{VK_m\Phi}{R_a} - \frac{(K_m\Phi)}{R_a}$$

Ecuación 4.1

Donde T es el par de la máquina, V es la tensión de alimentación al motor, k_m es la constante del motor, Φ es el flujo magnético total y R_a es la resistencia de la armadura del motor. Esta ecuación muestra que el par es máximo en el arranque y disminuye según aumenta el régimen de giro de la máquina. En esta expresión no se ha tenido en cuenta ninguna pérdida. Este par se asume generalmente constante, lo que significa que la forma general de la ecuación sigue siendo válida, y su representación gráfica se puede observar en la FIG 4.12.

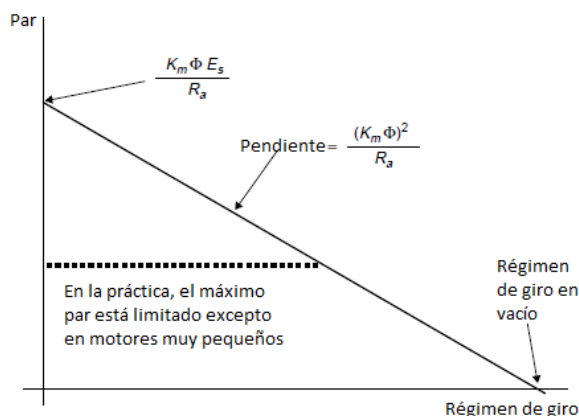


FIG 4.12 Característica par - velocidad de un motor de corriente continua. [15]

4.4.1.3. Configuraciones [14,15]

Según la conexión del circuito de campo los motores de corriente continua pueden ser: shunt, serie y excitación independiente FIG 4.13.

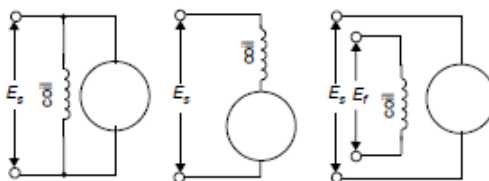


FIG 4.13 Diferentes configuraciones del motor de corriente continua. Izqda.: shunt, centro: serie, drcha: excitación independiente. [15]

Estas máquinas tienen todas ellas dos conjuntos de devanados. Uno en el rotor (armadura) y el otro en el estator (devanado de campo) que genera el campo

magnético. La corriente se suministra a ambos, siendo mayoritaria en el de armadura y estableciéndose las correspondientes fuerzas magnetomotrices en ambos devanados, cuya magnitud depende del número de vueltas y de la corriente.

En el caso de excitación independiente, existen dos fuentes de tensión de alimentación independientes a la armadura y del devanado de campo. Esta configuración ofrece la máxima flexibilidad de control del par-velocidad a través del control independiente de la corriente de los devanados de la armadura y de campo. Se puede controlar el par bien variando la tensión en el rotor, o bien variando el campo magnético.

En el caso de la excitación shunt, ambos se encuentran en disposición en paralelo conectados a una misma fuente. Un control independiente de las corrientes del devanado de armadura y de campo solo se puede conseguir insertando una resistencia en un circuito apropiado, pero esta es una forma ineficiente de hacerlo. Una manera más moderna y a la vez eficaz de controlarlo es mediante un convertidor de CC/CC en un apropiado circuito. El convertidor CC/CC se puede controlar activamente para producir una tensión adecuada de campo y armadura. Simplifica el suministro de potencia, pero complica la regulación.

En el caso de la configuración en serie la corriente es la misma para la armadura que para el devanado de campo, también tienen la misma fuente de potencia, por tanto, el flujo del campo es función de la corriente de la armadura. Para mantener un flujo similar al de excitación independiente hay que bobinar el devanado de campo con hilos más gruesos. Su ventaja es un alto par en el arranque, pero su control es difícil. Estos han sido los favoritos en tracción hasta que en los años 80 el desarrollo de la electrónica de potencia permitió sistemas de control como el chopper, que exigen un circuito de campo independiente. Y finalmente con la aparición de los inversores electrónicos que han permitido el control de velocidad de los motores de inducción por medio de la frecuencia, han ido desplazando a los motores de corriente continua en aplicaciones de tracción para vehículos eléctricos.

La ecuación 4.1 que relaciona el par con el régimen de giro tiene validez para este tipo de motores y para cualquier configuración analizada. En el caso de la excitación independiente, si la tensión de campo se mantiene constante, se puede suponer que el flujo se mantiene prácticamente constante según cambia el par. En este caso, la característica de par-velocidad angular de un motor con excitación independiente es una línea recta como la mostrada en la FIG 4.12.

4.4.1.4. Control del motor de corriente continua [14,15]

La FIG 4.12 y la ecuación 4.1 muestran que el control de un motor de corriente continua es muy simple. Si la tensión de alimentación se reduce, entonces el máximo par cae en la misma proporción y la pendiente de la recta permanece invariable FIG 4.14. En

otras palabras, cualquier pareja de par-régimen de giro se puede obtener por debajo de las condiciones de máximo par.

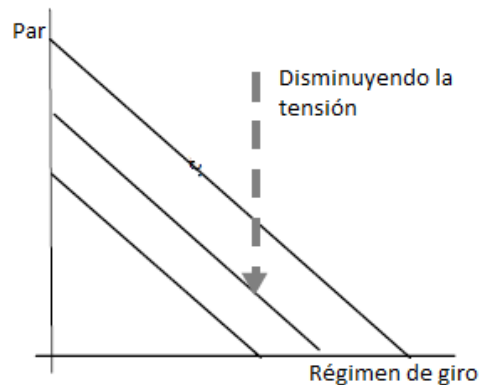


FIG 4.14 Influencia de la variación de la tensión de la armadura sobre la característica par - velocidad de un motor de corriente continua. [15]

Sin embargo, la reducción de la tensión no es la única manera de controlar el motor. También se puede hacer variando el valor del campo magnético. Si el campo se reduce entonces el par máximo cae y la pendiente de la recta se hace más plana FIG 4.15.

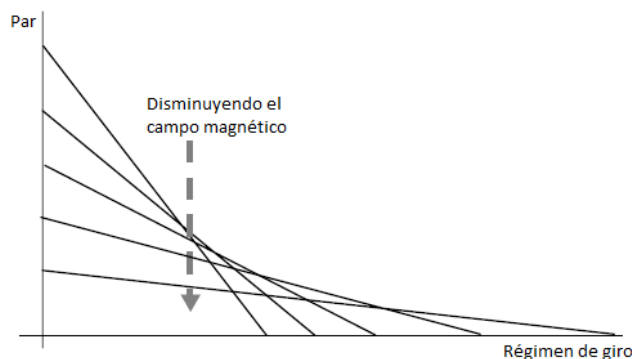


FIG 4.15 Influencia de la variación del campo magnético sobre la característica par - velocidad de un motor de corriente continua. [15]

4.4.2. Motor de reluctancia conmutada

El motor de reluctancia conmutada se le considera un buen candidato para aplicaciones de velocidad variable de vehículo automóvil por su bajo coste, estructura robusta, topología de convertidor fiable, alto rendimiento en un amplio rango de regímenes de giro y simplicidad en su control. Aunque estos motores apenas se usen en el ámbito industrial, recientemente algunos fabricantes les han incluido en su oferta comercial. Están caracterizados principalmente como hemos dicho anteriormente por un diseño robusto de alta eficiencia y por ser una máquina

eléctrica que genera gran ruido comparándolo con otras máquinas. A continuación, detallaremos más concretamente sus ventajas y desventajas.

Las ventajas de este tipo de motores son:

- Construcción simple y robusta, debido a la ausencia de devanados del rotor e imanes permanentes.
- Estructura de bajo coste sin necesidad de mantenimiento.
- Mayor eficiencia que los motores de corriente continua y de inducción.
- Fácil ventilación porque la mayor parte de las pérdidas se producen en el estator.
- Mayor temperatura de funcionamiento, ya que no hay materiales de aislamiento eléctrico en el rotor.
- El funcionamiento es incluso posible con fases de estator defectuosas. Se les considera una unidad con tolerancia a fallos.
- La región de par constante de la característica par – velocidad es muy amplia.
- El funcionamiento a alta velocidad está disponible sin la preocupación de fallas mecánicas debido a fuerzas centrífugas porque no hay devanados en el rotor.
- Trabajan a velocidades de rotación altas sin problemas por las fuerzas de inercia. La relación x de velocidad máxima / velocidad base es de 6 o mayor como habíamos dicho anteriormente.
- Diseños más pequeños que los motores de inducción y las máquinas de CC para la misma potencia y par de salida.
- Arranque y frenado rápido debido a la baja inercia del rotor.

Las desventajas de estos motores son:

- El par de salida presenta un rizado considerable que produce ruido y vibraciones mecánicas perjudiciales para otros elementos.
- Como el estator y el rotor tienen polos salientes, la reluctancia es muy importante y, como resultado, el par de interacción de los imanes con las ranuras es significativo, lo que reduce el rendimiento de salida.
- Esta alta reluctancia del circuito magnético genera un gran ruido acústico en comparación con otras máquinas.
- La ausencia de un devanado magnetizante en el rotor (o imanes permanentes) impone la carga de excitación sobre los devanados del estator y el inversor. Esto aumenta los requerimientos de kVA de los inversores. Trayendo consigo pérdidas de cobre más importantes en el estator.
- Tienen menor densidad de potencia que los motores de flujo axial y transversal.
- Menos eficiencia que los motores imanes permanentes.

4.4.2.1. Aspectos constructivos [4,14]

Desde el punto de vista constructivo, estas máquinas son muy diferentes a las de inducción y de corriente continua, tanto el rotor como el estator se diseñan en forma de dientes denominados polos salientes, que se fabrican al apilar laminaciones de acero magnético de elevada permeabilidad magnética.

Otro de sus aspectos constructivos más sobresalientes es la ausencia de devanados o imanes en el rotor. El estator tiene un devanado concentrado (similar a los polos de una máquina de corriente continua), los devanados opuestos se conectan para formar una fase y cada una de ellas es excitada individualmente por un inversor. Cuando se le suministra corriente al motor, el rotor gira en orden a minimizar la reluctancia del campo magnético. Por lo que se trata de un motor esencialmente simple y de bajo coste.

La topología es muy versátil ya que son posibles muchas combinaciones diferentes de los polos del estator y del rotor. Aunque la topología más extendida es la de 6 bobinas en el estator y 4 dientes en el rotor (6/4).

4.4.2.2. Principio de funcionamiento [15]

El principio básico de funcionamiento del motor de reluctancia conmutada, se muestra en la FIG 4.16. En la FIG 4.16 (a) el rotor y el estator se magnetizan por la acción de la corriente que atraviesa la bobina del estator. Ya que el rotor está fuera de las líneas de campo magnético, se produce un par para minimizar el entrehierro y hacer simétrico el campo magnético (el campo magnético es reluctante al atravesar el entrehierro y trata de minimizarlo).

En el estado que se muestra en la FIG 4.16 (b), el rotor se alinea con el estator, y la corriente se desconecta. El momento angular adquirido, lleva al rotor a girar un cuarto de vuelta, a la posición de la FIG 4.16 (c). Aquí el campo magnético se restablece, en la misma dirección anterior. De nuevo, el campo ejerce un par para reducir el entrehierro y generar un campo simétrico, que empuja al rotor a girar. Cuando el rotor se alinea con el estator la corriente se desconecta de nuevo.

La principal dificultad de funcionamiento de este motor recae en controlar el momento de conexión-desconexión de la corriente en el estator. Por ejemplo, si la posición del rotor es de 90° fuera de la línea, como es el caso de la FIG 4.27 (a) presentada en el capítulo 4.4.3.3., y se magnetiza la bobina, no se produce ningún par, ya que el campo debiera ser simétrico. Así el par es mucho más variable y como resultado, los primeros motores eran muy ruidosos. El par se puede suavizar incrementando el número de bobinas en el estator y dentando el rotor. El número de dientes (polos salientes) a menudo será 2 menos que el número de bobinas.

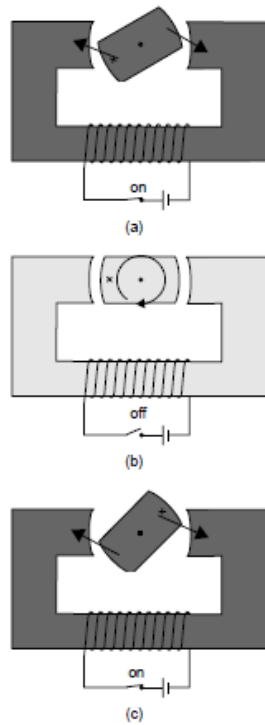


FIG 4.16 Esquema del principio de funcionamiento básico de un motor de reluctancia conmutada. [15]

Hasta ahora hemos visto el principio de funcionamiento básico de estas máquinas. En la FIG 4.17 se muestra el esquema de un funcionamiento real de un motor de reluctancia conmutada.

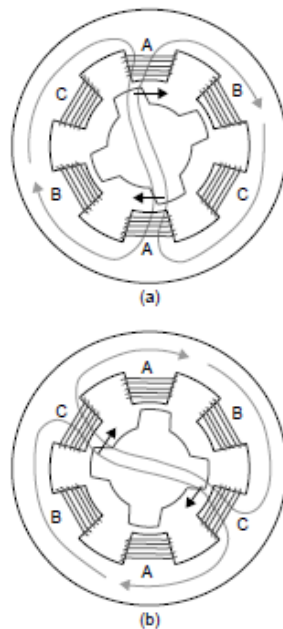


FIG 4.17 Esquema de funcionamiento de un motor de reluctancia conmutada con topología (6/4). [15]

En la FIG 4.17 (a), la bobina A está energizada ejerciendo una fuerza en el sentido de las agujas del reloj sobre el motor. Cuando los dientes se alinean con la bobina A,

la corriente en A se desconecta. Los otros dos dientes se encuentran ahora cerca de la bobina C, que se energiza, manteniendo un movimiento suave del rotor. El controlar la conexión-desconexión de la corriente en cada instante, necesita de una gran información que se obtiene a través de sensores, y de sistemas más avanzados de electrónica digital.

4.4.2.3. Modos de operación [16]

Para un motor de reluctancia conmutada hay una velocidad en que la fuerza electromotriz inversa es igual a la tensión del bus de continua. Esta velocidad se define como velocidad base. Por debajo de esta velocidad la fuerza electromotriz inversa es mucho menor que la tensión del bus de continua. Cuando los conmutadores del convertidor abren y cierran para energizar o desenergizar la fase, la corriente de la fase aumentará o disminuirá respectivamente. La amplitud de la intensidad de la fase se puede regular desde cero hasta el valor nominal simplemente activando o desactivando los conmutadores. El par máximo es posible en este caso cuando la fase se encuentra activada en una posición desalineada y desactivada en una posición alineada y la intensidad de la fase se regula a su valor nominal por histéresis o por control PWM (Modulación por ancho de impulsos). En la FIG 4.18 se puede observar formas de onda típicas de intensidad de fase de un motor de reluctancia conmutada.

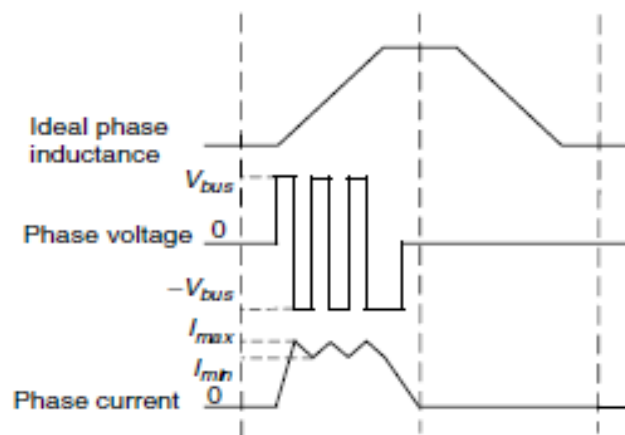


FIG 4.18 Funcionamiento a baja velocidad (por debajo de la velocidad base) de un motor de reluctancia conmutada. [16]

Por encima de la velocidad de base, la tensión de la fuerza electromotriz inversa es mayor que la tensión del bus de continua. En cualquier posición del rotor (en la que la fase tiene una pendiente positiva de inductancia con respecto a la posición del rotor) la intensidad de la fase puede caer incluso si los conmutadores del inversor de potencia están activados. La intensidad de la fase está limitada por la fuerza electromotriz inversa. En orden a generar alta intensidad y, por lo tanto, elevado par motor, generalmente se adelanta la excitación de la fase de la posición desalineada

y la posición de activación se avanza gradualmente según crece el régimen de giro. La fuerza electromotriz inversa aumenta con el régimen de giro. Esto conduce a una disminución de la intensidad de la fase y, en consecuencia, a una caída del par. Si la posición de activación se avanza para generar tanta intensidad en la fase como sea posible, el par caerá casi linealmente en proporción inversa a la velocidad del rotor. La potencia máxima de un motor de reluctancia conmutada es casi constante. En la FIG 4.19 se pueden observar formas de onda típicas de intensidad de fase de un motor de reluctancia conmutada para alta velocidad.

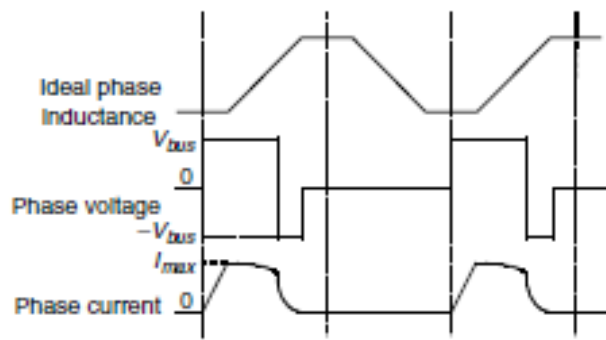


FIG 4.19 Funcionamiento a alta velocidad (por encima de la velocidad base) de un motor de reluctancia conmutada. [16]

El avance de la activación está limitado a la posición en el que la inductancia de la fase tiene pendiente negativa con respecto a la posición del rotor. Si el régimen de giro se incrementa, ya no es posible más avance para crear mayor intensidad y el par caerá drásticamente (modo natural). Las curvas características de par-velocidad se muestran en la FIG 4.20.

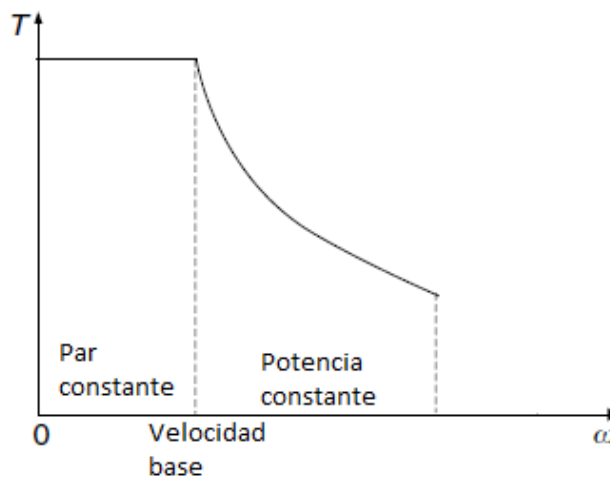


FIG 4.20 Curvas características de un motor de reluctancia conmutada. [16]

4.4.2.4. Accionamiento de un vehículo eléctrico basado en el motor de reluctancia conmutada [14,16]

Un sistema motor de reluctancia conmutada para vehículos eléctricos consta de la propia máquina motora, un inversor de potencia, sensores de posición, intensidad y tensión, y un sistema de control (controlador de señal digital) como se muestra en la FIG 4.21.

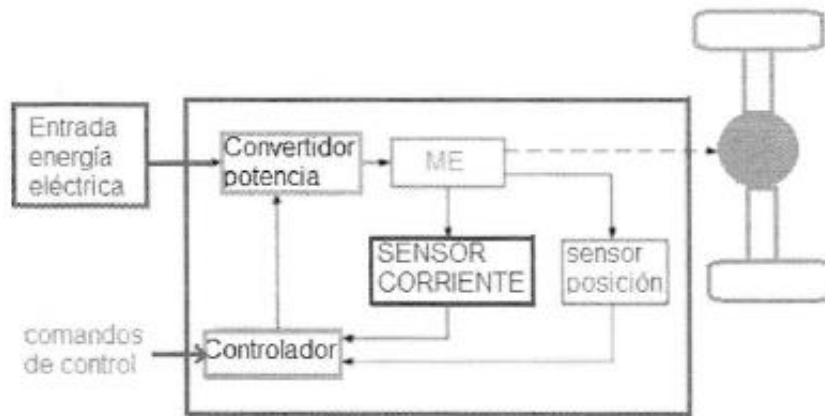


FIG 4.21 Esquema de un sistema de propulsión con motor de reluctancia conmutada. [14]

Con un adecuado control se puede extraer altas prestaciones al sistema de propulsión con motor de reluctancia conmutada. El inversor del motor se conecta a la fuente de corriente continua. Los devanados del motor al inversor de potencia como se observa en la FIG 4.22.

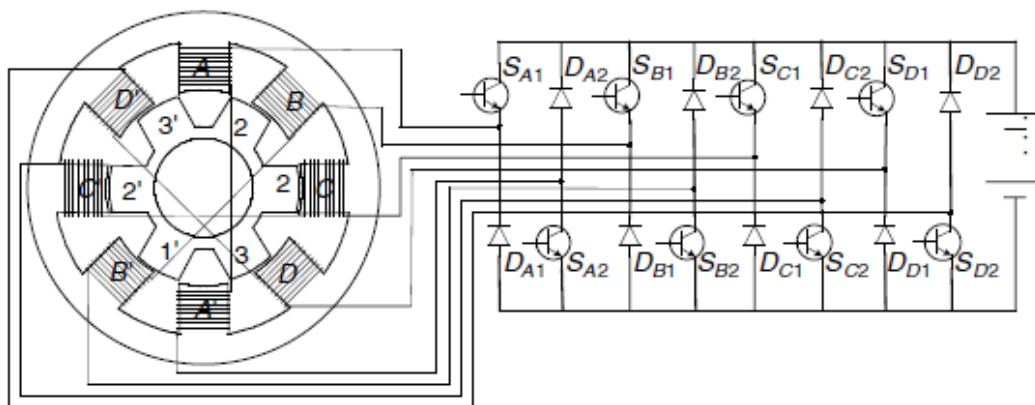


FIG 4.22 Esquema de conexión de un motor de reluctancia conmutada a su fuente de energía. [16]

El circuito de control proporciona una señal de conmutación a los conmutadores del inversor de acuerdo con estrategias de control particulares y las señales de varios sensores. De esta manera la velocidad del motor se puede controlar variando la longitud en tiempo del impulso de la corriente de alimentación a través del sistema un rectificador de diodos frontales anteriormente presentado en la FIG 4.22.

4.4.3. Motores de imanes permanentes

La mayoría de los motores eléctricos tienen un devanado de excitación que puede ser reemplazado por un conjunto de imanes permanentes que tienen la función de crear un flujo magnético en el entrehierro. Esto dio origen a una nueva clase de motores eléctricos conocidos como máquinas de imanes permanentes, que se caracterizan por la ausencia de pérdidas del cobre en el rotor y menores necesidades de mantenimiento.

El elemento básico y esencial de estos motores por lo tanto es la utilización de imanes permanentes de alta energía. Una unidad de motor de imanes permanentes puede ser diseñada potencialmente con una alta densidad de potencia, alta velocidad y alto rendimiento. Todas estas características hacen que estos motores sean muy atractivos para su aplicación en vehículos eléctricos e híbridos.

Estos motores generalmente presentan las siguientes ventajas:

- Son los motores eléctricos de mayor rendimiento porque los imanes permanentes no consumen energía, y porque no tienen colector ni escobillas.
- El uso de imanes permanentes de alta energía permite alcanzar pares altos y realizar máquinas de pequeño tamaño y ligeras (motores muy compactos).
- Este motor puede ser controlado muy fácilmente con la ayuda de un inversor de potencia.
- Al igual que en los motores de reluctancia conmutada, no hay pérdidas del cobre en el rotor (compuesto por imanes permanentes). La única producción de calor está en el estator, que es más fácil de enfriar que el rotor porque es estático y se sitúa en la periferia del motor (puesto que el estator es externo). Por lo tanto, esta máquina se puede enfriar fácilmente.
- Es una máquina de bajo mantenimiento, debido a la ausencia de escobillas y sistemas de conmutadores.

Pero también presentan los siguientes inconvenientes:

- Los imanes permanentes de alta energía contienen materiales de tierras raras por lo que son caros y esto encarece el precio del motor.
- Estas máquinas son incapaces de alcanzar velocidades máximas mayores que el doble de la velocidad base. El rango de potencia constante es crucial para lograr altas eficiencias en los vehículos.
- Existe el riesgo de bloquear el motor cuando se produce un fallo de cortocircuito en el inversor. El rotor giratorio siempre está energizado e induce constantemente una fuerza electromotriz en los devanados cortocircuitados. Si se produjera este hecho, aparecería una corriente muy grande que circularía en esos devanados y se produciría un par de torsión considerablemente grande que tiende a bloquear el rotor. Por lo tanto, para

evitar cualquier riesgo de seguridad para los pasajeros del vehículo, es esencial una técnica de detección muy rápida de estos fallos y, en consecuencia, un procedimiento aún más rápido para borrar el fallo y desconectar el inversor en cuestión de milisegundos.

4.4.3.1. Configuraciones [14]

Existen principalmente dos grandes familias de motores de imanes permanentes:

- Motores síncronos de imanes permanentes; caracterizados por tener una distribución del campo magnético giratorio uniforme, por lo que las formas de onda inducidas son sinusoidales FIG 4.23. Disponen de un devanado en el estator similar al de un motor de inducción. En ellos es posible un control vectorial.

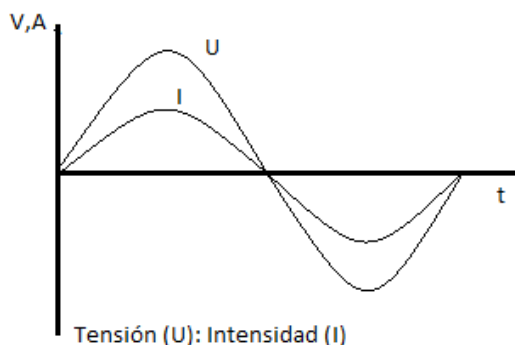


FIG 4.23 Formas de onda de un motor síncrono de imanes permanentes (flujo sinusoidal). [14]

- Motores de continua sin escobillas o brushless, caracterizados porque la distribución del campo magnético giratoria es trapezoidal, por lo que las tensiones inducidas en estas máquinas son de naturaleza trapezoidal FIG 4.24. El motivo de esta forma de onda trapezoidal de la fuerza electromotriz inversa son las bobinas concentradas en lugar de distribuidas sinusoidalmente. El campo del estator se conmuta en pasos discretos de pulsos de onda cuadrada. Debido a esto también se las conoce como máquinas de onda cuadrada o conmutadas electrónicamente.

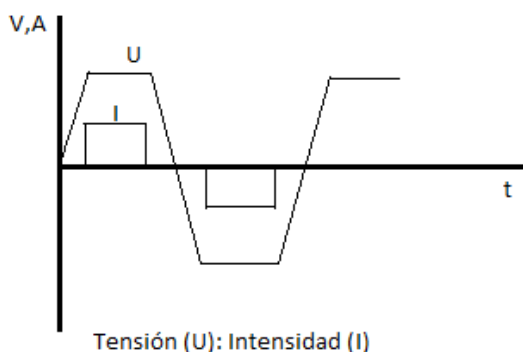


FIG 4.24 Formas de onda en un motor de continua sin escobillas (flujo trapezoidal). [14]

Los motores síncronos de imanes permanentes con frecuencia se confunden con los motores de corriente continua sin escobillas. Básicamente estas máquinas son idénticas en cuanto a la generación del par. Ambas son máquinas síncronas que realizan la excitación sobre el rotor a través de imanes permanentes. La tensión externa trifásica alterna se aplica sobre el devanado del estator, que es similar al del motor de inducción. El término de motor de continua sin escobillas refleja el hecho de que este motor se aproxima en su funcionamiento al motor de corriente continua convencional con una electrónica de potencia en lugar de escobillas. Por otro lado, el término de motor síncrono de imanes permanentes enfatiza el hecho de que la máquina utiliza imanes permanentes para crear el campo de excitación. La principal diferencia es la forma de onda de las corrientes del estator, que son de tipo rectangular en el caso de los motores de continua sin escobillas y de tipo sinusoidal en el caso de los motores síncronos de imanes permanentes, como se ha comentado. Consecuentemente, la fuerza electromotriz inversa es trapezoidal en el caso de los motores de continua sin escobillas y sinusoidal en el caso de los motores síncronos de imanes permanentes.

4.4.3.2. Motor síncrono de imanes permanentes [19]

Actualmente en los vehículos híbridos eléctricos podríamos decir que se utilizan casi universalmente los motores síncronos de imanes permanentes de configuración interior de neodimio sinterizado debido a sus propiedades superiores, especialmente la densidad de potencia. El estator de esta máquina es bastante similar al de un motor de inducción o al de un motor síncrono. Los imanes permanentes están localizados en el rotor y producen un flujo radial. El rotor incorpora también un devanado de jaula de ardilla, que sirve para arrancar el motor, importante cuestión conociendo las complejas y dificultosas maniobras de arranque en motores síncronos convencionales. Al mismo tiempo, el devanado en jaula de ardilla actúa como protección contra la desmagnetización de los imanes durante el periodo de arranque.

Los imanes permanentes en el rotor ofrecen ciertas ventajas, como es su idoneidad para operaciones a altas velocidades. Estos imanes suelen ser prismáticos, más fáciles y baratos de fabricar que los de otras geometrías. La disposición de los imanes puede hacerse de dos formas: periféricos y superficiales al rotor, que presentan el problema de que a altas velocidades la fuerza centrífuga dificulta la sujeción de los mismos ya que normalmente van pegados al rotor giratorio; y otra en la que están enterrados en el rotor que es la solución adoptada habitualmente. El diámetro del rotor está limitado por el número de polos del mismo.

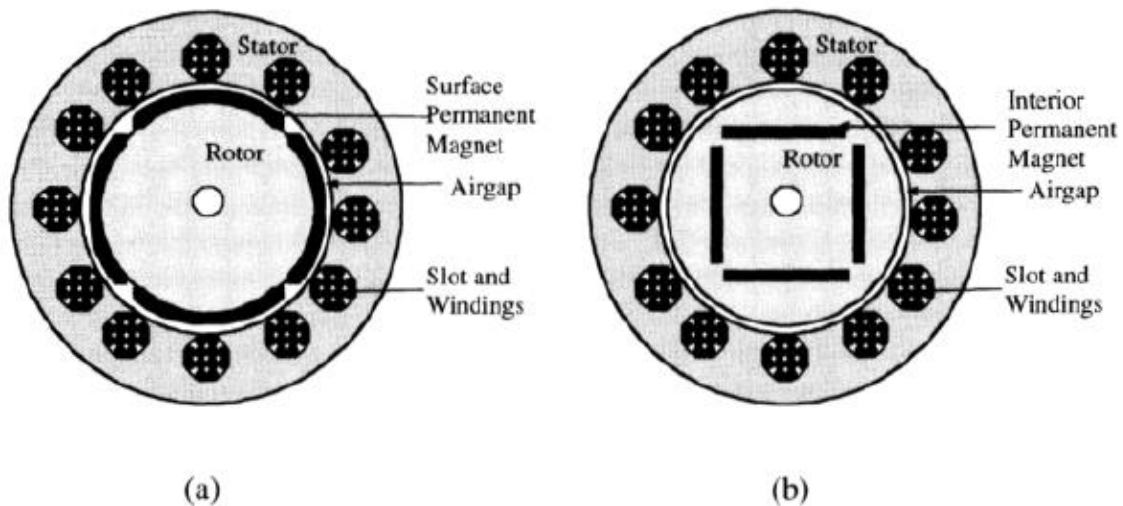


FIG 4.25 Corte transversal de un motor síncrono de imanes permanentes; (a) con disposición periférica de los imanes; (b) con disposición enterrada de los imanes. [1]

Uno de los problemas típicos de estos motores, es el aumento del flujo de dispersión especialmente en las uniones de los imanes, por lo que se hace necesario minimizarlo y reconducirlo por los caminos adecuados; y para ellos se ha probado introduciendo barreras de aire y puentes de otros materiales con la doble finalidad de sujetar el imán y aumentar la reluctancia de estos caminos.

Los motores síncronos de imanes permanentes presentan intrínsecamente una región estrecha de potencia constante. Los imanes interiores añaden un componente de resistencia al par producido por el motor, que tiende a ampliar esa región. El funcionamiento con debilitamiento de campo posibilita aumentar el rango de potencia constante y es posible aplicando flujo en el estator que se contraponga al del rotor. El límite de alta velocidad depende de los parámetros del motor, de la corriente, de la fuerza electromotriz opuesta y de la máxima tensión de salida del inversor.

En general las pérdidas de Foucault en el rotor son despreciables. Aun así, se aumenta el diámetro del rotor y se practican agujeros para minimizarlas y aligerar el peso. Las pérdidas son mayores en su conjunto especialmente a plena carga, porque los armónicos de reacción de inducido son mayores al ser el entrehierro de muy reducido tamaño.

Son el competidor más serio para los motores de inducción en aplicaciones de tracción, debido a su mayor densidad de potencia, una mayor eficiencia y la distribución más eficaz de calor en el ambiente. Los motores síncronos de imanes permanentes son empleados mayoritariamente en vehículos híbridos como hemos afirmado al inicio del capítulo; sirviendo como ejemplo el Toyota Prius; pero también se utilizan en algunos vehículos puramente eléctricos como son el Nissan Leaf, y el Chevrolet Spark EV FIG 4.26.

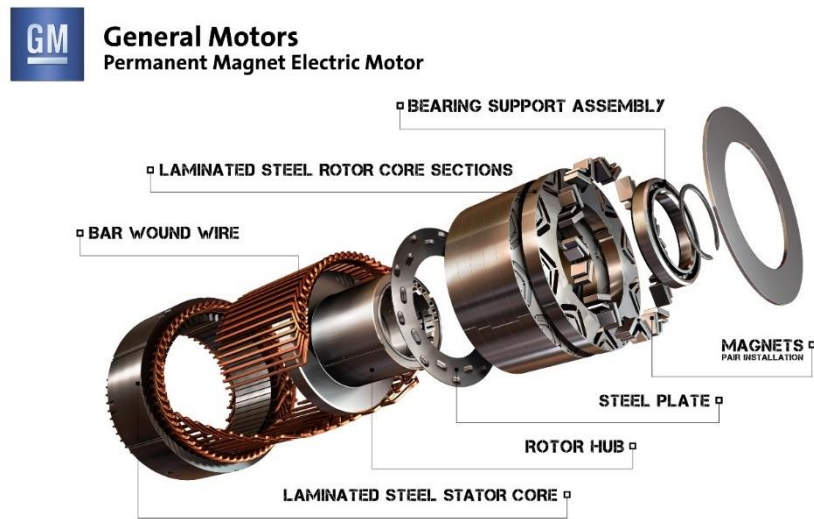


FIG 4.26 Motor síncrono de imanes permanentes de un Chevrolet Spark EV. [18]

4.4.3.3. Motor de continua sin escobillas o brushless [15,16]

Podría decirse que el motor de continua sin escobillas es realmente un motor de corriente alterna, ya que la corriente a través del mismo es alterna. Se denomina así porque la alternancia de la corriente debe ser a frecuencia variable y por tanto derivada de una fuente de continua, y también además porque su característica par-velocidad es muy similar al motor de continua convencional. Dicha denominación da lugar a confusiones por parte de fabricantes y usuarios. También se le suele dar otros nombres como es el de motor brushless o motor de alterna auto-síncrono. Los motores brushless se utilizan en los modelos híbridos Insight, Accord y Civic de Honda. También se emplea en scooters eléctricas como es el modelo Scoot'Elec de Peugeot que estudiaremos más adelante.

Su funcionamiento se basa en una alimentación secuencial, conmutada electrónicamente, de cada una de las fases del estator de forma sincronizada con el movimiento del rotor. En la FIG 4.27 los interruptores conmutan directamente la corriente de una fuente de continua a través de una bobina en el estator. El rotor consta de un imán permanente. La corriente fluye en la dirección que magnetiza el estator así que el rotor gira en el sentido de las agujas del reloj FIG 4.27 (a). Según se observa en la FIG 4.27 (b), el rotor pasa entre los polos del estator, y la corriente del estator es conmutada a off. El momento aplicado mantiene el rotor en movimiento, según se observa en la FIG 4.27 (c), la bobina del estator se re-energiza, pero la corriente y, por tanto, el campo magnético se invierte. Así, el rotor es empujado a girar en sentido de las agujas del reloj. El proceso continúa con la corriente en el estator alternada. Obviamente, la conmutación de la corriente debe sincronizarse con la posición del rotor. Esto se hace utilizando sensores de efecto hall, que utilizan el magnetismo del rotor para detectar su posición. Un problema con

un simple devanado en el estator como en la FIG 4.27, es que el par es bastante inestable.

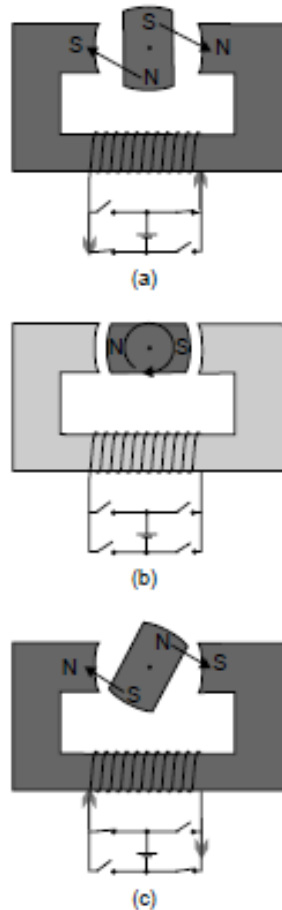


FIG 4.27 Esquema funcionamiento básico de un motor brushless. [15]

La inestabilidad del par se resuelve colocando tres o más devanados, como en la FIG 4.28. En esta configuración, la bobina B se energiza para girar el rotor en el sentido de las agujas del reloj. Una vez que el rotor esté entre los polos de la bobina B, la bobina C se energizará y así sucesivamente.

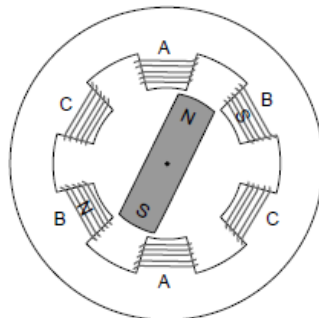


FIG 4.28 Diagrama que muestra una disposición de tres devanados en el estator de un motor brushless. [15]

Un sistema propulsivo basado en un motor de continua sin escobillas consta principalmente de la maquina motora, de un controlador de señal digital y de un convertidor de potencia como se observa en la FIG 4.29. Los sensores H1, H2, H3 monitorizan la posición del rotor. La información de la posición del rotor se envía al controlador que a través del convertidor abre o cierra la alimentación del devanado apropiado del estator. De esta manera se controla el par y el régimen de giro del motor.

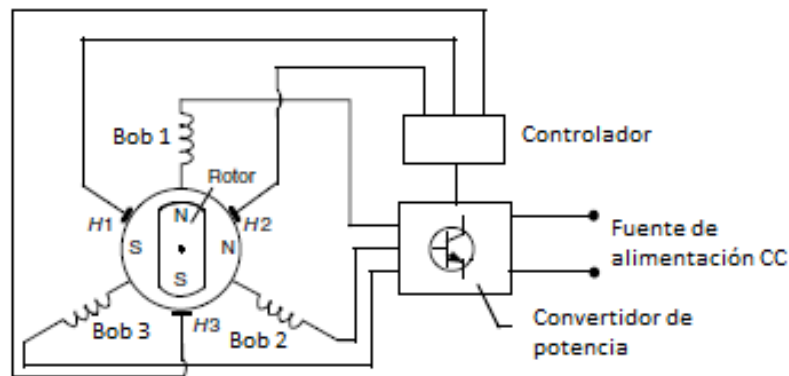


FIG 4.29 Sistema de control de un motor brushless. [16]

Una característica de estos motores es que el par se reduce según se incrementa la velocidad. El campo magnético rotativo genera una fuerza electromotriz inversa en la bobina que se está aproximando. Esta fuerza electromotriz inversa es proporcional a la velocidad de rotación y reduce la corriente que fluye por la bobina. La reducción de la corriente reduce también la fuerza del campo magnético, y por tanto, el par. Este tipo de motor puede funcionar también como generador y por lo tanto como freno regenerativo.

4.4.3.4. Propiedades de los materiales de imanes permanentes [15,16]

Los imanes permanentes son una fuente de generación de fuerza magnetomotriz similar a la de una fuente de corriente constante, con una permeabilidad algo mayor que la del aire ($\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$). En la actualidad hay tres tipos de materiales para motores de imanes permanentes en vehículos eléctricos:

- Alnicos (Al, Ni, Co, Fe).
- Cerámicas (ferritas), como por ejemplo: ferrita de bario y ferrita de estroncio.
- Tierras raras; como por ejemplo: samario-cobalto y neodimio-hierro.

Las curvas de desmagnetización se muestran en la FIG 4.30. Las características de estos materiales para imanes permanentes se muestran en el segundo cuadrante del diagrama B-H.

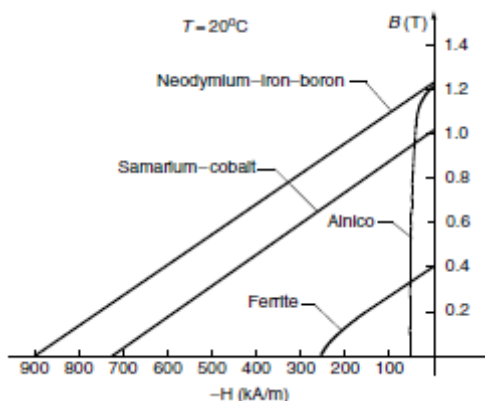


FIG 4.30 Curvas de desmagnetización para diferentes materiales. [16]

4.4.3.4.1. Alnicos

Las principales ventajas de los alnicos son la elevada densidad de flujo magnético remanente y su bajo coeficiente de temperatura. El coeficiente de temperatura de su densidad de flujo magnético residual B_r , o remanencia, es de $0,002\%/^{\circ}\text{C}$ y la máxima temperatura de servicio es de 520°C . Estos aspectos permiten una temperatura de funcionamiento alta y una elevada densidad de flujo en el entrehierro. Desafortunadamente, la fuerza coercitiva es muy baja y la curva de desmagnetización es extremadamente no lineal. Por lo tanto es muy fácil de magnetizar como desmagnetizar. Los alnicos se han utilizado en motores en el rango desde unos pocos vatios hasta los 150 kW. Dominaron la industria de los imanes desde 1940 hasta 1970 aproximadamente, cuando las ferritas llegaron a ser las más utilizadas.

4.4.3.4.2. Ferritas

Las ferritas de bario y estroncio se descubrieron alrededor del año 1950. Tienen una fuerza coercitiva mayor que los alnicos, pero una densidad de flujo remanente más bajo. Los coeficientes de temperatura son altos, el coeficiente de remanencia B_r es de $0,2\%/^{\circ}\text{C}$ y el coeficiente de fuerza de campo coercitivo H_c , o coercitividad, es de $0,27\%/^{\circ}\text{C}$. La temperatura máxima de funcionamiento es de 400°C . La principal ventaja de las ferritas es su bajo coste y su alta resistencia eléctrica.

4.4.3.4.3. Tierras raras

Recientemente donde mayores progresos se han alcanzado con relación a la densidad de energía disponible (BH) han sido con el desarrollo de tierras raras para imanes permanentes.

La primera generación de tierras raras para imanes permanentes estaba basada en samario-cobalto alrededor del año 1960, comenzando su comercialización una década después. Como ventajas del samario-cobalto, se pueden citar su alta densidad de flujo remanente, elevada fuerza coercitiva, curva de desmagnetización lineal y un coeficiente de temperatura bajo. El coeficiente B_r de remanencia es de

0,03-0,045%/°C y el coeficiente H_c de coercitividad es de 0,14-0,40%/°C. La temperatura máxima de funcionamiento es de 250-300°C. Es adecuado para el desarrollo de motores de bajo volumen, es decir, alta potencia específica y bajo momento de inercia. Su inconveniente es el coste. Tanto el samario como el cobalto son relativamente caros debido a su restricción en el suministro.

Con el descubrimiento del neodimio (segunda generación de tierras raras para imanes permanentes) los aspectos económicos se han visto parcialmente paliados. Los imanes de neodimio-hierro-boro ahora se producen en cantidades crecientes, tienen mejores propiedades magnéticas que los imanes de samario-cobalto, pero solo a temperatura ambiente. La curva de desmagnetización y la fuerza coercitiva son altamente dependientes de la temperatura. El coeficiente de remanencia B_r es de 0,095-0,15%/°C y el coeficiente de coercitividad H_c es de 0,4-0,7%/°C. La temperatura de funcionamiento es de 200°C.

4.4.4. Motor de inducción

Los motores de inducción o asíncronos se diferencian de los demás tipos de motores eléctricos en el hecho de que no existe corriente conducida a uno de los arrollamientos. La corriente que circula por uno de los devanados (generalmente el rotor) se debe a la fuerza electromotriz inducida por la acción del flujo del otro, y por esta razón es por la que se denominan motores de inducción. También se les da el nombre de máquinas asíncronas debido a que la velocidad de giro del rotor no es la de sincronismo impuesta por la frecuencia de la alimentación. Los motores de inducción funcionan con corriente alterna, lo que su aplicación en vehículos eléctricos puede parecer inapropiada al operar con una fuente de continua como puede ser la batería. Sin embargo, la corriente alterna se puede conseguir de forma fiable a través de un inversor.

A continuación, recogeremos los puntos fuertes y débiles de los motores de inducción. Como puntos fuertes tenemos:

- Es una tecnología madura y bien establecida. Estas máquinas son robustas, de bajo coste y con una topología de construcción simple.
- Las necesidades de mantenimiento son muy bajas en comparación con las máquinas de corriente continua (debido a que no hay conmutadores ni escobillas).
- Alta disponibilidad.
- El tren de potencia es más compacto comparando con las máquinas de corriente continua.
- Buen comportamiento dinámico cuando se utiliza en combinación con un convertidor electrónico de potencia con el algoritmo de control vectorial.

- La eficiencia es mejor que las máquinas de corriente continua y la relación de velocidad suele ser de 4.

Como puntos débiles de estos motores tenemos:

- Las técnicas control son más complejas que en otros motores.
- Requisitos extremadamente altos en las tolerancias de producción.
- Pérdidas presentes tanto en el estator como en el rotor.
- Menor eficiencia y densidad de potencia que los motores de flujo axial y de flujo transversal de imanes permanentes.
- Menor potencia y par de torsión que los motores eléctricos de imanes permanentes.

Como hemos visto anteriormente, debido a los múltiples puntos fuertes que poseen estos motores, se posicionan como uno de los grandes favoritos a la hora de ser implantados como máquinas de propulsión de vehículos híbridos y eléctricos, por lo que haremos un análisis más detallado de los motores de inducción en los siguientes puntos.

4.4.4.1. Aspectos constructivos [14,15]

Hay dos tipos de motor de inducción, aquel con rotor bobinado y aquel con rotor en jaula de ardilla. Debido al alto coste, alto mantenimiento y falta de robustez, los motores con rotor bobinado son menos atractivos de cara a la aplicación en vehículos eléctricos e híbridos, por lo que a partir de este momento solo nos centraremos en el motor de jaula de ardilla.

El motor de inducción consta de una parte fija denominada estator, y una parte giratoria, denominada rotor, separadas ambas por una capa de aire denominada entrehierro. El estator se encuentra devanado por tres bobinas espaciadas en 120° y el rotor está formado por barras de cobre o aluminio conectadas en sus extremos (cortocircuitadas) por dos anillos de aluminio, formando una especie de jaula. El interior del rotor está relleno de hierro laminado.

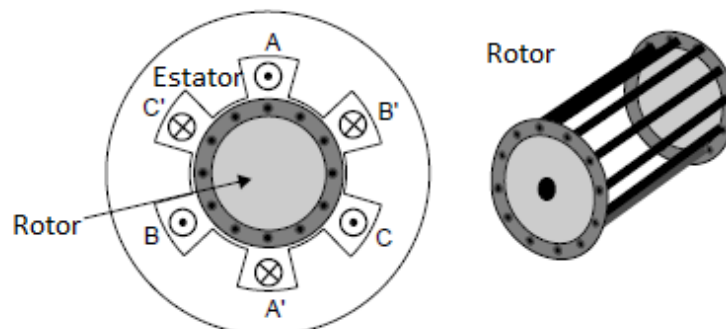


FIG 4.31 Corte transversal de un motor de inducción (izquierda) y rotor de jaula de ardilla (derecha). [15]

4.4.4.2. Motores de inducción en vehículos eléctricos [18,20]

El motor de inducción fue empleado para la propulsión del vehículo puramente eléctrico EV1 de la compañía General Motors. En la FIG 4.32 pueden verse las partes de un motor de inducción de este fabricante utilizado en el Chevrolet Volt.

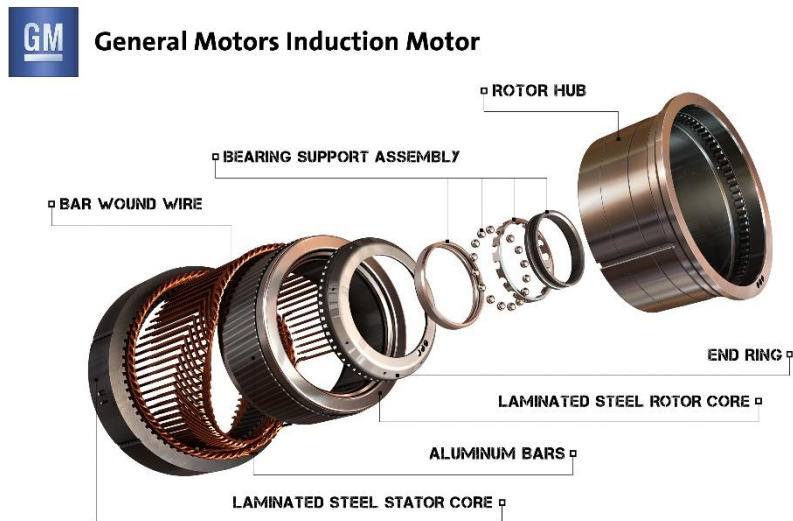


FIG 4.32 Motor de inducción de General Motors. [18]

También la compañía Tesla Motors utiliza motores de inducción para la propulsión de sus modelos de vehículos eléctricos. En la FIG 4.33 se muestra un motor de inducción perteneciente al Tesla Model S.

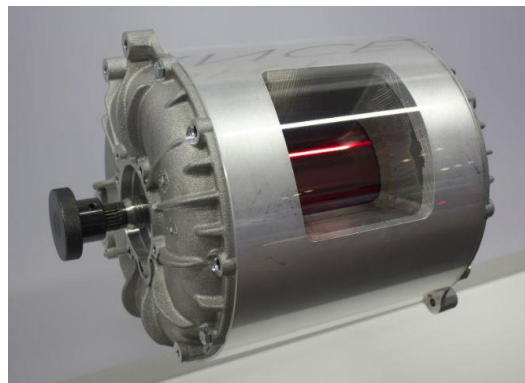


FIG 4.33 Motor de inducción Tesla Model S. [20]

4.4.4.3. Principio de funcionamiento [4,14]

El principio de funcionamiento de la máquina de inducción se basa en el concepto de campo giratorio. El bobinado trifásico distribuido alojado en el estator al ser alimentado por un sistema trifásico equilibrado de tensiones, produce en el entrehierro un campo magnético con distribución espacial senoidal que gira a una velocidad constante denominada velocidad de sincronismo (n_s). Esta velocidad

depende del número de polos magnéticos de la máquina, características constructivas y de la frecuencia de alimentación a la máquina; según la siguiente fórmula:

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

Ecuación 4.2

Donde f es la frecuencia de la tensión de alimentación y p es el número de polos de la máquina.

Este campo giratorio al desplazarse atraviesa el circuito eléctrico del rotor, inicialmente en reposo. Debido a la ley de inducción de Faraday se inducirá una fuerza electromotriz en dicho circuito y como consecuencia, circulará un sistema de corrientes. Por lo tanto, sobre los conductores del rotor se produce una fuerza electromagnética debido a la interacción de estas corrientes inducidas y el campo magnético producido por el estator. Esta fuerza impulsa al rotor a girar en el mismo sentido que el campo magnético del estator. Girará a una velocidad muy próxima a la de sincronismo, pero por debajo, puesto que en el momento en que estas velocidades fueran iguales ya no se induciría fuerza electromotriz en el rotor y este se pararía. El rotor en modo motor siempre girará por detrás de la velocidad de sincronismo. Esta velocidad relativa entre ambos será mayor cuanto mayor sea el par resistente del motor. Esta diferencia de velocidad se caracteriza por un parámetro adimensional que recibe el nombre de deslizamiento y se puede calcular según la siguiente expresión:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Ecuación 4.3

Donde n_s es la velocidad de sincronismo y n es la velocidad de giro del motor, normalmente ambas expresadas en rpm.

El deslizamiento para el motor toma valores entre 0 y 1. Cuando el motor está parado, justo en el momento de arranque, el deslizamiento vale 1. Una vez arrancada la máquina, el valor del se acercará a valores cercanos a 0. Los valores normales del deslizamiento, dependerán de la potencia del motor y de sus características constructivas, pero puede oscilar entre 0,02 para motores de gran potencia y cercanos a 0,06 e incluso 0,08 para motores de menor potencia.

4.4.4.4. Circuito monofásico equivalente [4]

El comportamiento en régimen estacionario de la máquina asíncrona puede modelarse con una buena aproximación por medio de un circuito equivalente. Este

circuito equivalente monofásico se suele expresar referido al estator de la máquina FIG 4.34.

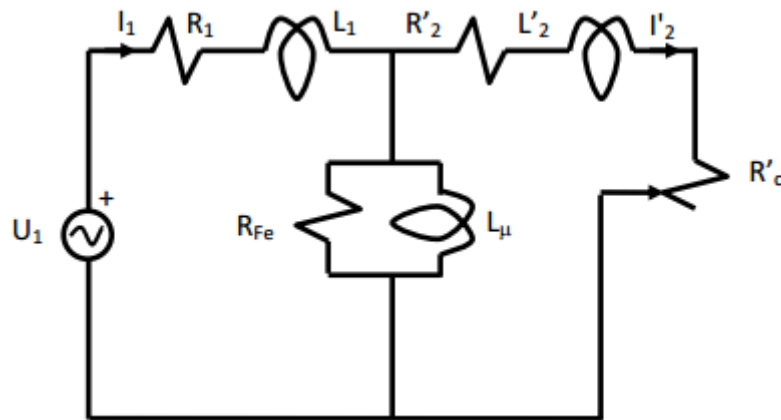


FIG 4.34 Circuito equivalente de la máquina de inducción. [4]

- U_1 es la tensión de alimentación del motor.
- I_1 es la intensidad que circula en el estator, e I'_2 es la intensidad del rotor referida al estator.
- R_1 es la resistencia equivalente del bobinado del estator, y L_1 es la inductancia equivalente del bobinado del estator.
- R'_2 es la resistencia equivalente del rotor, y L'_2 es la inductancia equivalente del rotor, ambas referidas al estator.
- R_{Fe} representa las pérdidas en el hierro, y L_μ la inductancia magnetizante de la máquina.
- R'_c es una resistencia ficticia que representa la potencia mecánica que se entrega en el eje de la máquina, y su valor depende del deslizamiento s . La expresión que nos permite obtener R'_c es:

$$R'_c = R'_2 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1 \right)$$

Ecuación 4.4

Para favorecer la comprensión del funcionamiento en régimen estacionario de la máquina asíncrona; se ha desarrollado una aplicación informática en Matlab denominada asincron.m. A través de ella podemos crear una representación gráfica de las expresiones presentadas a continuación, las cuales rigen el comportamiento de la máquina. Todo ello es obtenido de una forma fácil y sencilla a partir del modelo de circuito equivalente; por lo que podría utilizarse como una herramienta para explicar el funcionamiento de este tipo de motores.

Los valores de potencia, par, corriente, y factor de potencia, se pueden obtener fácilmente del circuito equivalente exacto de la máquina asíncrona. La expresión del par interno se deduce calculando la potencia interna desde el punto de vista eléctrico

y desde el punto de vista mecánico, e igualando ambas formulaciones. Por potencia interna de una máquina de inducción rotativa entendemos que es la potencia convertida (de eléctrica a mecánica cuando funciona como motor, o a la inversa cuando funciona como generador) prescindiendo de las pérdidas eléctricas y mecánicas (unas antes y otras después de la conversión).

La expresión de la potencia eléctrica absorbida es:

$$P_{\text{elc}} = 3 \cdot U_1 \cdot |I_1| \cdot \cos \varphi$$

Ecuación 4.5

Donde U_1 es la tensión de alimentación, I_1 es la corriente absorbida y el $\cos \varphi$ es el factor de potencia de la máquina.

La expresión de la potencia mecánica producida es:

$$P_{\text{mec}} = T \cdot n_s$$

Ecuación 4.6

Donde T es el par producido y n_s es la velocidad de sincronismo en rad/s.

La representación gráfica obtenida con la aplicación asincron.m de la potencia eléctrica y la potencia mecánica en función del deslizamiento de la máquina se muestra a continuación.

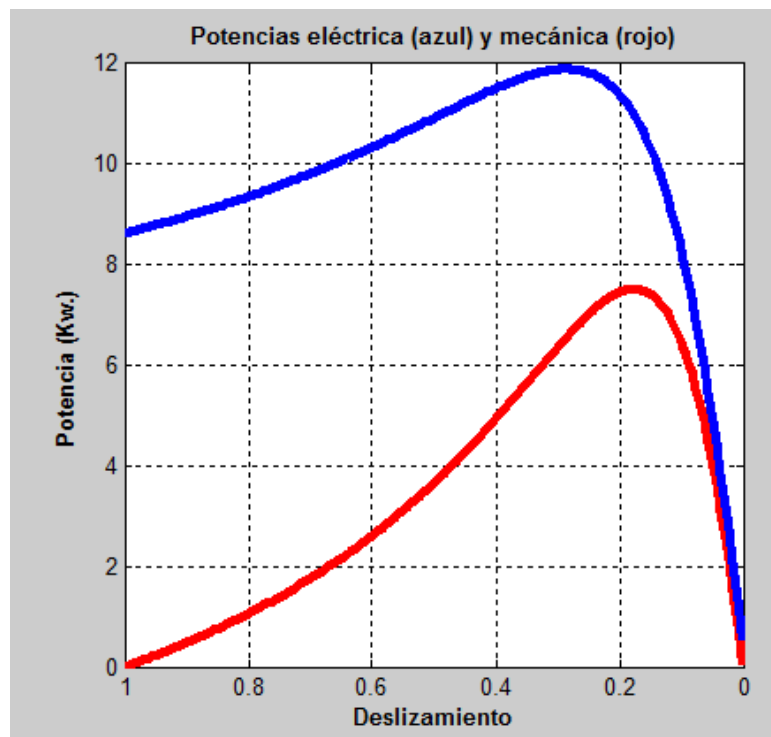


FIG 4.35 Característica de potencia del motor de inducción obtenido con la aplicación asincron.m. [elaboración propia]

Igualando la ecuación 4.5 y la ecuación 4.6, obtenemos la expresión del par interno producido por la máquina:

$$T = \frac{3R'_2 I'_2}{s n_s}$$

Ecuación 4.7

Donde T es el par, R'_2 es la resistencia del equivalente del rotor referida al estator, I'_2 es la corriente en el rotor referida al estator, s es el deslizamiento y n_s es la velocidad de sincronismo en rad/s.

La representación gráfica obtenida con la aplicación asincron.m del par motor en función del deslizamiento se muestra a continuación.

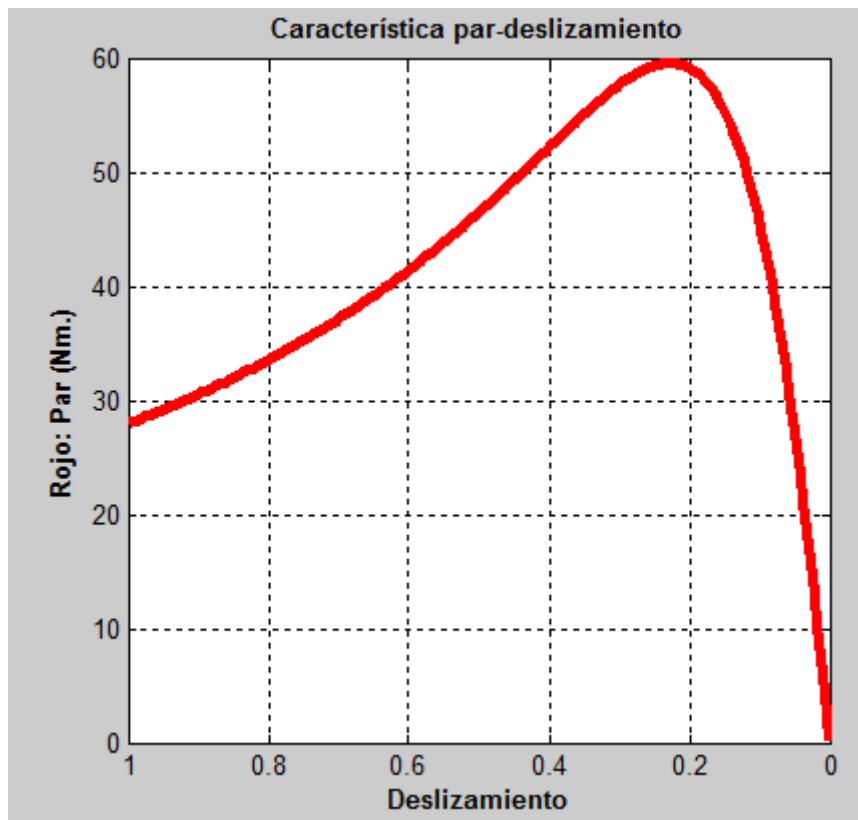


FIG 4.36 Característica de par del motor de inducción obtenida con la aplicación asincron.m. [elaboración propia]

El Rendimiento de la máquina asíncrona, se puede calcular a partir de las potencias de la ecuación 4.5 y la ecuación 4.6 y teniendo solo en cuenta las pérdidas eléctricas como:

$$\eta = 100 \cdot \frac{P_{mec}}{P_{elec}}$$

Ecuación 4.8

La representación gráfica obtenida con la aplicación asincron.m del rendimiento del motor de inducción en función del deslizamiento se muestra a continuación.

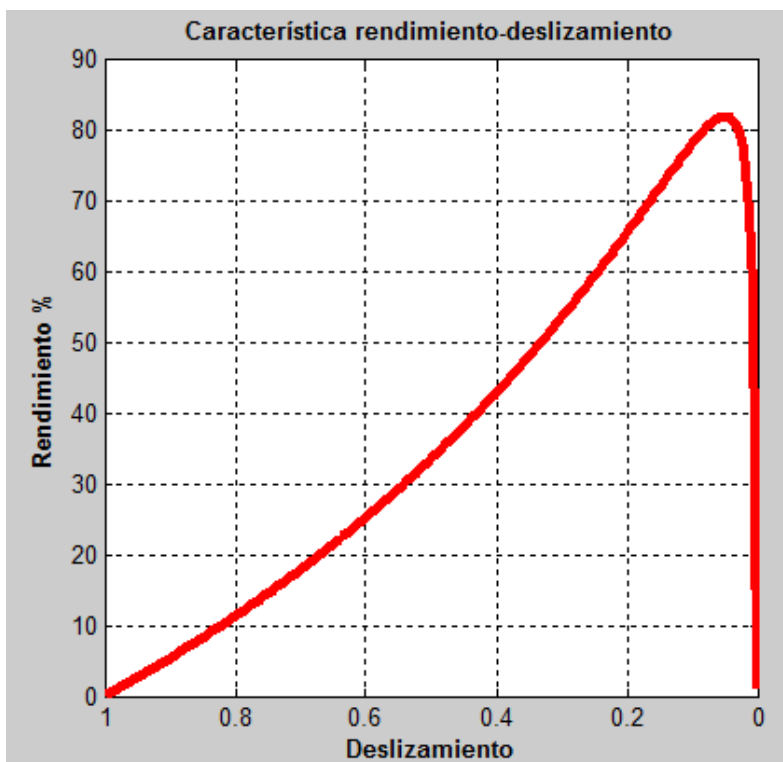


FIG 4.37 Característica rendimiento del motor de inducción obtenida con la aplicación asincron.m. [elaboración propia]

El rendimiento es grande un para cierto valor del deslizamiento que debería ser el deslizamiento nominal del motor. Esto exige un adecuado dimensionamiento de estos motores. Por ejemplo, no deben utilizarse para potencias muy inferiores a la nominal indicada por el fabricante, pues el deslizamiento se acercaría a cero y el rendimiento sería muy bajo.

4.4.4.5. Modos de operación [1,16]

El motor, para ponerse en marcha, debe desarrollar un par electromagnético que supere todos los pares resistentes en el arranque. Durante un transitorio se produce una aceleración hasta que se alcanza un punto de equilibrio en el que el par motor y el resistente son iguales y el motor alcanza un estado de funcionamiento estacionario, a una velocidad constante.

La ecuación 4.7, nos permite obtener una curva característica mecánica del motor, donde se representa el par desarrollado por la máquina en función de la velocidad o del deslizamiento manteniendo la tensión y la frecuencia constantes FIG 4.38. Los tres modos de funcionamiento posibles son:

- Funcionamiento motor: deslizamiento entre 0 y 1.
- Funcionamiento generador: deslizamiento negativo.
- Funcionamiento freno: deslizamiento superior a 1.

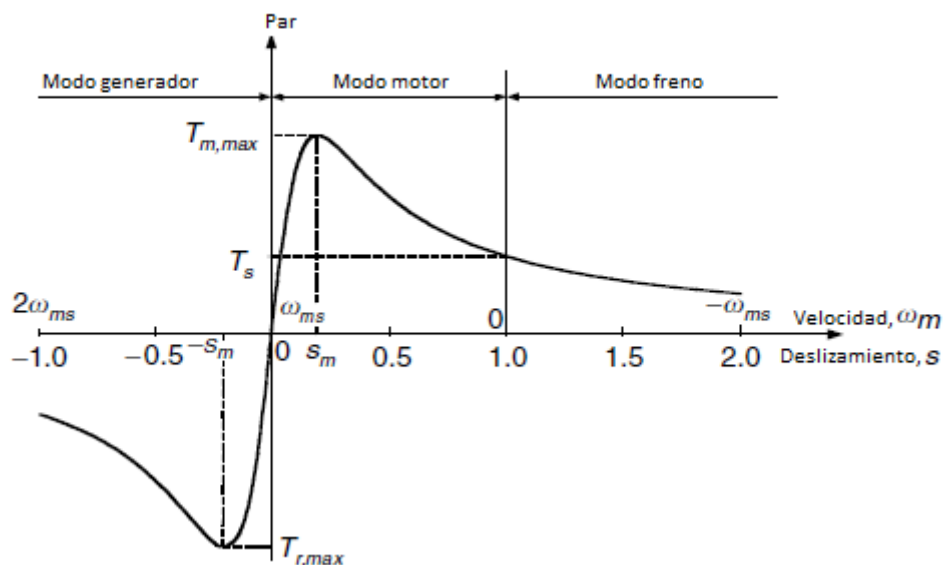


FIG 4.38 Curva par-velocidad de un motor de inducción. [16]

En la FIG 4.38 la región de $0 < s < s_m$, donde s_m es el deslizamiento nominal del motor, el par se incrementa casi linealmente con el deslizamiento, es la zona inestable de funcionamiento, hasta alcanzar su máximo $s=s_m$; después este decrece según crece el deslizamiento y esta sería la zona de funcionamiento estable hasta $s=0$. En $s=1$, la velocidad es cero y el par correspondiente es el de arranque, que es menor que su par en $s=s_m$. La región $0 < s < 1$, es la zona de modo motor. En la región $s > 1$, el par del rotor es positivo y decrece con el aumento del deslizamiento, como en la ecuación 4.7. Así en esta región la máquina funciona en modo de freno. En la región $s < 0$ esto es, cuando la velocidad del rotor es mucho mayor que la de sincronismo, la máquina produce par negativo, que sería el funcionamiento como generador que tiene la aplicación de frenado regenerativo en el vehículo eléctrico.

A esta curva característica hay que unir la curva de par resistente de la máquina accionada, que en este caso es el vehículo. El punto de intersección de ambas curvas determina el funcionamiento de la máquina. Se puede deducir fácilmente que una vez arrancado el motor, alimentado a partir de una fuente de tensión y frecuencia, no es posible alterar la velocidad de funcionamiento, que vendrá determinada por el par resistente. Para poder cambiar a voluntad la velocidad de giro es necesario poder alterar la tensión, la frecuencia, o ambas magnitudes a la vez, y de esta forma la curva característica mecánica del motor es alterada, cambiando el punto de intersección con la curva característica de la carga. Esto es lo que permite realizar el inversor o el convertidor electrónico de potencia.

La velocidad de un motor de inducción se puede variar básicamente de dos formas distintas como hemos expuesto anteriormente, bien variando la tensión o bien variando la frecuencia.

El comportamiento de la curva par-velocidad en cada caso se muestra a continuación en las siguientes figuras.

- Variando la tensión obtenemos:

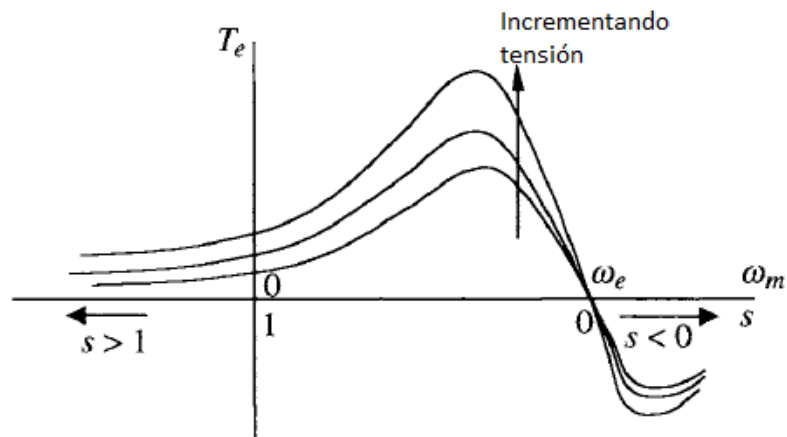


FIG 4.39 Curvas par-velocidad variando la tensión y manteniendo constante la frecuencia para un motor de inducción. [1]

- Variando la frecuencia obtenemos:

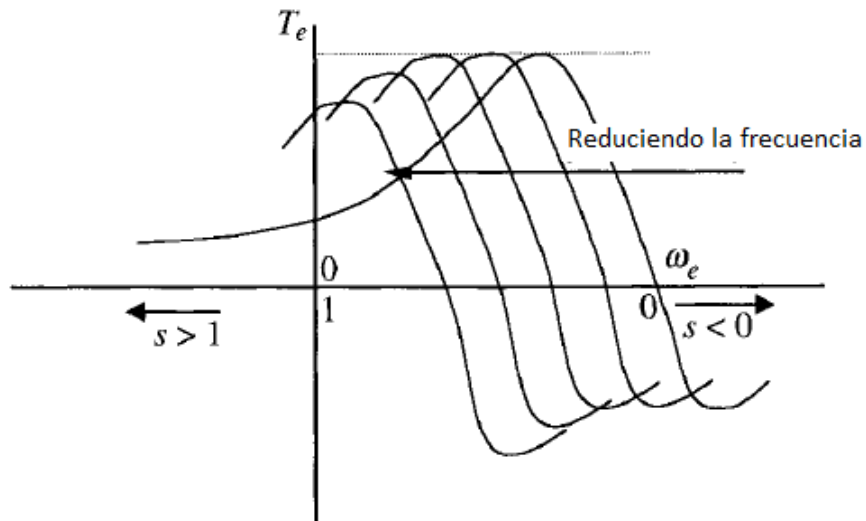


FIG 4.40 Curvas par-velocidad variando la frecuencia y manteniendo constante la tensión para un motor de inducción. [1]

La FIG 4.41 muestra la envolvente de las curvas de par-velocidad de un motor de inducción.

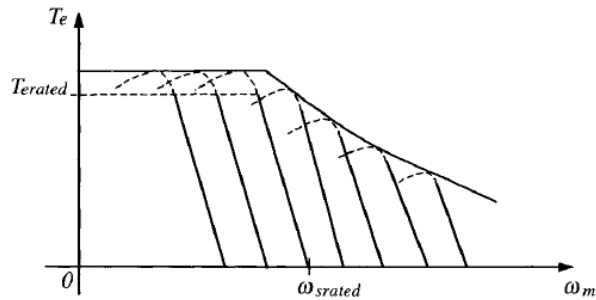


FIG 4.41 Funcionamiento sobre la envolvente de las curvas par-velocidad para un motor de inducción. [1]

Utilizando un apropiado controlador, junto con el inversor, podemos ajustar nuestras curvas a esta envolvente y aproximar la curva par-velocidad del motor de inducción en cierta medida a la que hemos presentado como ideal para la tracción en vehículos en la FIG 4.2, por lo que sería posible alcanzar potencia constante a altas velocidades, característica muy importante en los vehículos eléctricos e híbridos.

4.4.4.6. Accionamiento de un vehículo eléctrico basado en el motor de inducción

4.4.4.6.1. Misión del inversor [1,16,21]

Las condiciones de alimentación, magnitud y frecuencia de la tensión y corriente, no son constantes, deben cambiarse de forma adecuada para que el motor gire a la velocidad requerida y desarrolle el par o potencia para propulsar el vehículo de forma cómoda, fiable y segura. El encargado de llevar a cabo esta misión en los vehículos con motor eléctrico de inducción es el inversor.

El inversor es un dispositivo electrónico que realiza las funciones de interface entre la fuente de alimentación (baterías de corriente continua) y el motor de corriente alterna trifásico. Este dispositivo, con un elevado rendimiento, transforma la tensión continua que proporciona la fuente de alimentación en tensión trifásica, adecuada para alimentar al motor de inducción. La tensión de salida del inversor será de la amplitud y la frecuencia necesaria para que el motor de inducción gire a la velocidad requerida y desarrolle el par suficiente para propulsar el vehículo.

Independientemente del modo de operación y del control empleado, el inversor modifica la amplitud y frecuencia de la tensión de alimentación del motor. Esto se traduce en un desplazamiento, y también modificación, de la curva característica mecánica del motor. Se distinguen dos zonas. Una primera zona comprende el rango de velocidades entre 0 y la velocidad de sincronismo a la frecuencia base del motor. En esta zona, la magnitud de la tensión puede variar entre 0 y el valor máximo impuesto por la fuente de alimentación de corriente continua. La velocidad de giro dependerá de la frecuencia de la tensión alterna generada por el inversor, entre 0 y la frecuencia base. En esta zona la tensión y la frecuencia suelen variar manteniendo el cociente V/f constante, puesto que el par producido es proporcional a este cociente, que a su vez es proporcional al flujo. Es decir, se intenta que el motor opere

a flujo constante, por lo tanto, el motor puede desarrollar el máximo par en caso de que sea necesario. Esta zona se conoce entonces como zona de operación a par máximo constante. El punto límite de esta zona se caracteriza porque la tensión alterna generada tiene el valor máximo disponible de la amplitud de la tensión y la frecuencia base. A partir de este punto, para aumentar la velocidad de giro solo se puede actuar sobre la frecuencia y la tensión se mantiene constante. Por lo tanto, para superar la velocidad base hay que disminuir el flujo magnético, puesto que el cociente V/f baja, y el motor ya no es capaz de desarrollar su par máximo, pero sí que es capaz de desarrollar la potencia máxima. Por lo tanto, esta zona de operación del inversor se denomina a potencia constante.

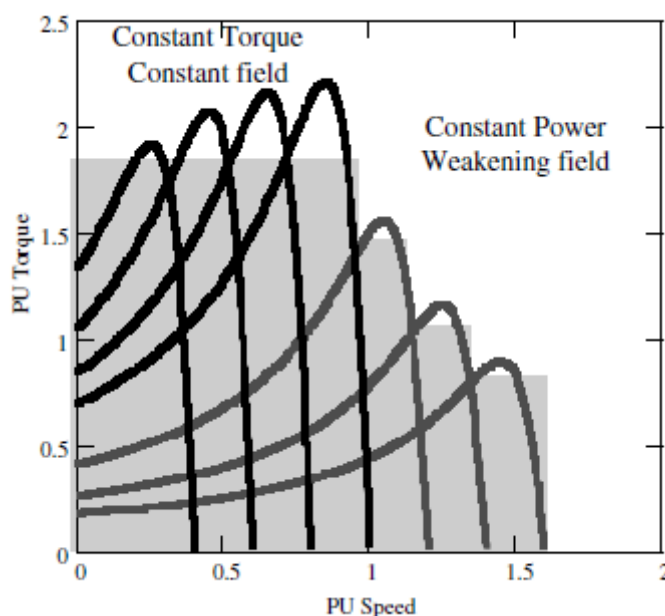


FIG 4.42 Característica par-velocidad de un motor de inducción bajo control V/f. [21]

En la FIG 4.42, se muestra la familia de curvas que se pueden obtener de un motor de inducción alimentado por un inversor bajo un control V/f, hay que observar que la característica de esta figura viene dada en valores por unidad. El par base es el nominal del motor y la velocidad base es la que separa las dos zonas.

4.4.4.6.2. Tecnología del inversor [4]

Existen dos tecnologías diferentes para realizar el inversor, MOSFET e IGBT. La tecnología MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, transistor de efecto de campo metal óxido semiconductor) trabaja en baja tensión y con potencias más reducidas, y llegó a superar en uso al transistor de unión bipolar, pero la tendencia actual en electrónica de potencia es utilizar la tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, transistor bipolar de puerta aislada), que puede operar a potencias y tensiones más elevadas, superiores a 375 V, y con corrientes medias y altas, de 10 a 1.000 A. En la FIG 4.43 se muestran los requerimientos de potencia y tensión en aplicaciones de tracción incluyendo automoción.

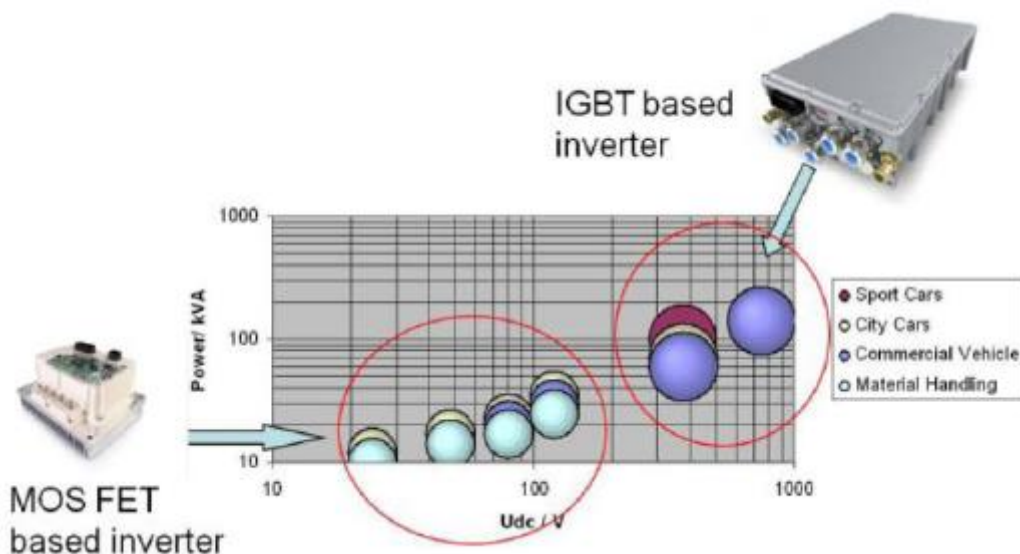


FIG 4.43 Requerimientos de potencia y tensión en aplicaciones de tracción. El diámetro de los círculos indica el ancho de banda. [4]

La tecnología de los IGBT consiste en transistores controlados por tensión provistos de tres terminales. Uno de ellos es la puerta G (gate) y, cuando se aplica una tensión en este terminal, el transistor permite el paso de la corriente. Se diferencia del MOSFET en que la conmutación es más rápida, llegando a frecuencias de conmutación de hasta 50 kHz. También tiene menores pérdidas por conducción, lo cual es importante cuando se trabaja con corrientes altas.

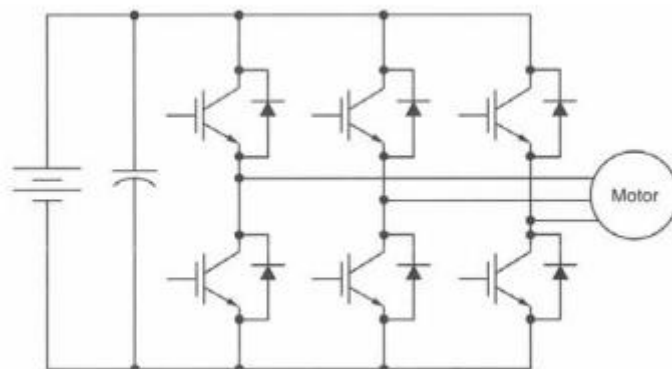


FIG 4.44 Inversor trifásico con IGBT para el accionamiento de un motor de inducción. [4]

En la FIG 4.44, se muestra un inversor con tecnología IGBT para una aplicación de automoción. Consta de tres ramas con dos IGBTs cada una. Del punto medio de cada rama sale una de las fases de alimentación del motor.

Como el motor es una carga RL, la corriente tiene un cierto retraso con respecto a la tensión y cada IGBT lleva en paralelo un diodo no controlado para permitir la circulación de corriente en ambos sentidos.

En las aplicaciones de automoción, los requerimientos de la electrónica de potencia de estas tecnologías pueden ser muy variados y específicos, pero se podrían resumir en los siguientes:

- Vida útil generalmente entre 15 y 20 años, con un número de ciclos alrededor de los 10.000 y con variaciones de temperatura alrededor de los 100K.
- Los requerimientos en relación a los ciclos de potencia son moderados.
- Los requerimientos en cuando a vibraciones (5-12 g) o choque (50-100 g) dependen de la localización del inversor en el vehículo. Se suele colocar en el compartimento del motor, pero no sobre el motor o el sistema de transmisión.
- El código IP depende también de la localización del inversor, pero nunca es inferior a IP54 (protección contra la penetración de polvo y proyecciones de agua).
- Se requiere un peso bajo y una alta densidad de potencia.

Existen diferentes modos de operación para llevar a la práctica las funciones que realiza el inversor. Los dos más empleados en automoción son el six-step y el PWM senoidal.

4.4.4.6.3. Modo de operación six-step [1]

Es el modo de operación más simple para obtener tensión alterna a partir de una tensión continua de la batería. Para explicar su funcionamiento, en la FIG 4.44 se sustituye cada IGBT con el diodo en paralelo por un interruptor ideal que permite la circulación de la corriente en ambos sentidos FIG 4.45.

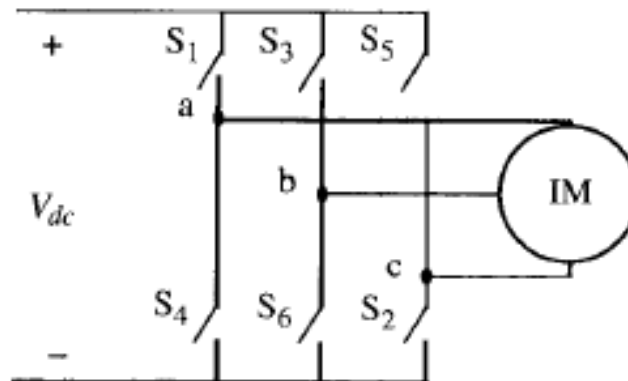


FIG 4.45 inversor ideal. [1]

En este modo de operación, cada ciclo de funcionamiento representado por 2π radianes, se divide en 6 intervalos, con una duración de $\pi/3$ radianes cada uno. En cada intervalo hay tres interruptores en ON y tres en OFF según la secuencia mostrada en la FIG 4.46.

$1 \rightarrow 0 < \omega t < \pi/3:$	$S_1 S_5 S_6$
$2 \rightarrow \pi/3 < \omega t < 2\pi/3:$	$S_1 S_2 S_6$
$3 \rightarrow 2\pi/3 < \omega t < \pi:$	$S_1 S_2 S_3$
$4 \rightarrow \pi < \omega t < 4\pi/3:$	$S_4 S_2 S_3$
$5 \rightarrow 4\pi/3 < \omega t < 5\pi/3:$	$S_4 S_5 S_3$
$6 \rightarrow 5\pi/3 < \omega t < 2\pi:$	$S_4 S_5 S_6$

FIG 4.46 Secuencia de operación de los IGBT de un inversor según el modo de operación six-step. [1]

Nunca dos interruptores de la misma rama pueden estar en ON, porque esto provocaría un cortocircuito de la fuente de corriente continua. En la FIG 4.47 (a) se muestran las señales de disparo de los interruptores con este modo de operación. En la FIG 4.47 (b) y FIG 4.47 (c), se muestra la tensión de línea y la tensión fase-neutro resultante.

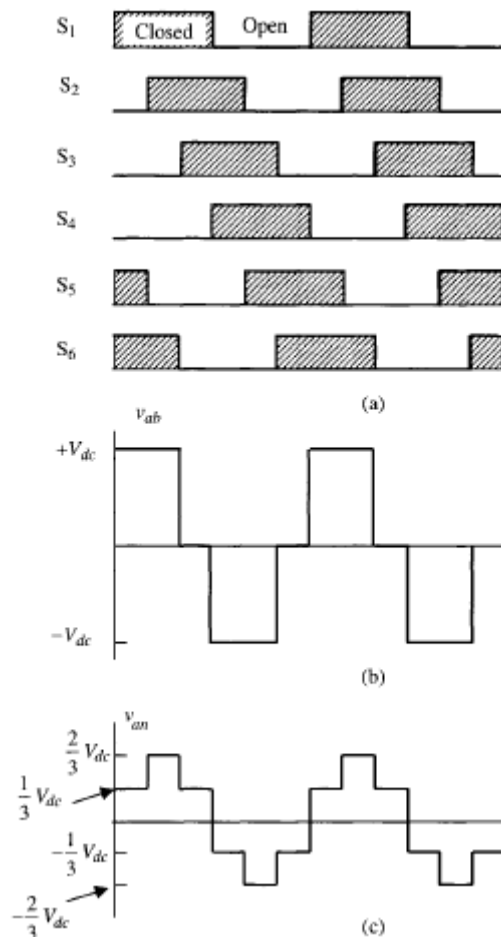


FIG 4.47 Señales de disparo y tensiones de salida en un modo de operación six-step. [1]

La tensión de salida no es senoidal, pero es una señal periódica cuya frecuencia fundamental y valor eficaz son las buscadas. La corriente suministrada al motor se parece más a una señal senoidal puesto que el motor actúa como un filtro RL.

El contenido armónico es importante, sobre todo hay armónicos a baja frecuencia, muy cercanos al fundamental. Algunos de estos componentes contribuyen a la formación del par, pero otros no, o incluso el par que producen se opone al debido a la componente fundamental. También hay componentes armónicas que producen pares pulsantes (no rotativos) que son especialmente perjudiciales a bajas velocidades. También cada componente contribuye a las pérdidas del motor, que serán mayores con una fuente puramente senoidal, elevando la temperatura de operación de la máquina.

4.4.4.6.4. Modo de operación PWM senoidal [1]

Para superar algunos de los efectos adversos del uso del modo de operación six-step, se desarrolló la técnica conocida como modulación por ancho de pulsos (conocida como PWM por sus siglas en inglés). Con esta técnica no se eliminan los armónicos, pero aparecen a frecuencias más elevadas con lo que su filtrado resulta más sencillo. Con esta técnica también resulta más sencillo controlar la amplitud de la componente fundamental.

El principio de funcionamiento básico de la operación PWM consiste en que la señal de disparo de los IGBT se obtiene por intersección de dos señales de control: una triangular de frecuencia superior llamada portadora, y otra denominada moduladora que tiene la forma de la tensión que se desea generar.

Hay muchas técnicas PWM pero la que nos ocupa en este caso es la PWM senoidal. Para generar la señales de disparo de los IGBT del inversor, su control emplea cuatro señales temporales. Se generan tres tensiones senoidales desplazadas entre sí 120° (sistema trifásico equilibrado). En la FIG 4.48 las tensiones son nombradas como V_a , V_b , V_c . Estas tres tensiones tienen la magnitud y frecuencia deseadas en la alimentación del motor. También se genera una cuarta señal, que es la onda portadora con forma triangular y de valor de pico la tensión suministrada por la fuente de alimentación de corriente continua, V_T . Normalmente tanto la magnitud como la frecuencia de esta señal son constantes. Lo que cambia es la magnitud y frecuencia de las señales senoidales de control.

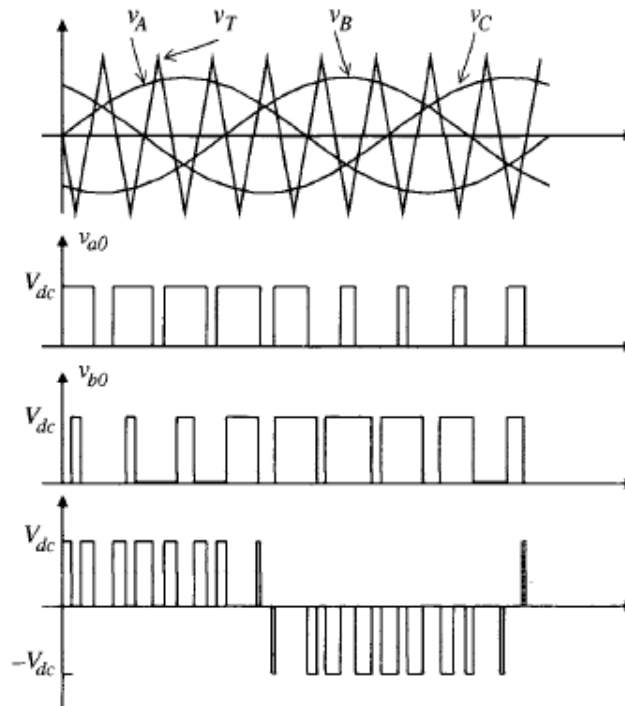


FIG 4.48 Señales empleadas en el modo de operación PWM senoidal. [1]

Las señales de disparo de los IGBT se obtienen comparando las señales de control con la señal de la onda portadora. El control de los IGBT se realiza por pares, según la FIG 4.45: S_1 y S_4 , S_2 y S_5 , S_3 y S_6 . Cuando en una rama un IGBT está abierto, inmediatamente el otro está cerrado y viceversa. La lógica de disparo de los IGBT se muestra en la FIG 4.49. Los IGBT superiores disparan cuando la onda moduladora es superior a la portadora. Los inferiores al contrario.

- S_1 se cierra cuando $v_A > v_T$
- S_2 se cierra cuando $v_C > v_T$
- S_3 se cierra cuando $v_B > v_T$
- S_4 se cierra cuando $v_A < v_T$
- S_5 se cierra cuando $v_C < v_T$
- S_6 se cierra cuando $v_B < v_T$

FIG 4.49 Modo de operación de los IGBT en un modo de control PWM senoidal. [1]

Para caracterizar el funcionamiento del PWM senoidal se definen dos valores:

- Índice de modulación:

$$m = \frac{V_{a,pico}}{V_{DC}}$$

Ecuación 4.9

- Ratio de frecuencias:

$$p = \frac{f_{\text{onda portadora}}}{f_{\text{onda moduladora}}}$$

Ecuación 4.10

El índice de modulación es menor o igual que 1 y determina el valor eficaz del primer armónico de la tensión de salida del inversor que viene dado por la expresión:

$$V_{a,1} = m \frac{V_{DC}}{2\sqrt{2}}$$

Ecuación 4.11

Dependiendo del valor de p , la modulación PWM senoidal puede ser asíncrona o síncrona. Cuando es síncrona p , suele ser múltiplo de 3, y la onda portadora es simétrica respecto a las tres tensiones de referencia. En la modulación asíncrona aparecen subarmónicos de la frecuencia fundamental y componente de corriente continua. Esto se traduce en pulsaciones de par y de la velocidad, sobre todo para valores bajos de p .

Cuando m alcanza el valor 1, la máxima amplitud que se puede obtener en la salida del inversor es un 78,5% la tensión de la batería de continua. Este valor se puede incrementar con una técnica denominada sobremodulación en la que m toma valores mayores que 1. En este caso, hay periodos donde la tensión de salida no tiene la forma característica del PWM. Adopta forma cuadrada similar al six-step. Esta técnica introduce contenido armónico de baja frecuencia.

4.4.4.6.5. Sistema de control [21]

Se trata de un controlador en el vehículo encargado de indicarle al inversor que tensión y frecuencia son necesarias para la propulsión del vehículo eléctrico en función de las señales recibidas desde el freno, el acelerador y otros sensores del vehículo. Este controlador puede estar basado en varios tipos de control (escalar, vectorial, directo de par) y actuará sobre la electrónica de potencia del inversor.

La elección del motor de inducción junto a su controlador depende de la carga a accionar, de sus características y de cómo el sistema debe ser controlado. Un vehículo eléctrico puede considerarse como una carga de gran inercia que precisa ser controlada durante los transitorios, arranque y frenado, y que demanda par constante durante la velocidad de crucero, es decir, en los estados de funcionamiento estacionario. Los arranques y frenados pueden ser además muy rápidos. Por lo tanto, el accionamiento debe diseñarse para poder operar en los cuatro cuadrantes del espacio par velocidad FIG 4.50.

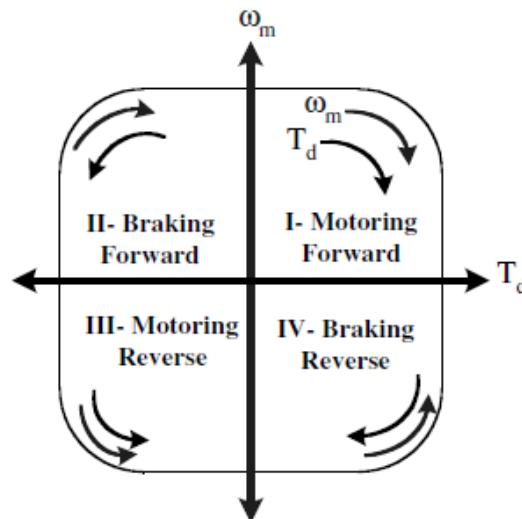


FIG 4.50 Cuadrantes del espacio par-velocidad de un motor de inducción. [21]

Los vehículos eléctricos pueden operar en el modo frenado regenerativo. La energía cinética del vehículo se emplea durante el freno para recargar la batería. El motor se hace funcionar como generador y si el inversor permite la circulación de potencia en ambos sentidos, se puede emplear para recargar la batería. Para ello se requiere de un sistema de control específico. El inversor tiene una potencia nominal que no puede superarse durante el frenado. En el caso de que durante el frenado se supere esa potencia, se desconecta el inversor y la energía eléctrica se descarga sobre una resistencia de frenado, que también puede emplearse para proteger la batería durante el frenado en caso de que sea necesario. Algunos vehículos eléctricos disponen de una batería de condensadores que son los que almacenan la energía del frenado. En cualquier caso, siempre prima la seguridad del vehículo durante el frenado, por lo que nunca se puede prescindir del sistema de frenado mecánico tradicional.

El control de un vehículo eléctrico se configura para responder a los requerimientos de par por parte del conductor. La posición del acelerador se traduce en una demanda de par en forma de fracción del par máximo que puede desarrollar el motor eléctrico. La posición del pedal de freno también fija el par de frenado regenerativo, pero también la necesidad de emplear el freno mecánico.

Por lo tanto, la posición de estos dos pedales determina el par a desarrollar por el motor. El sistema de control del motor debe incorporar un modelo del mismo que estime el par que la máquina desarrolla. El error cometido en el par desarrollado y la velocidad de giro del motor fijan la tensión de alimentación necesaria, y esto se traduce en una secuencia de disparo de los IGBT del inversor. Por lo tanto, el sistema de control en función de las demandas de conducción debe determinar la tensión o corriente de alimentación al motor, y según el modo de operación del inversor esto se traduce en una secuencia de disparo de los IGBT.

Para construir el sistema de control de un vehículo eléctrico se han adoptado diferentes técnicas provenientes tanto del sector industrial como del ferroviario como pueden ser: el control del par y/o del flujo; control escalar (en lazo cerrado o abierto) o control vectorial (control directo de par con orientación del flujo o control indirecto).

En la FIG 4.51 se muestra el diagrama de bloques de un control vectorial para un vehículo eléctrico. Se observan los diferentes bloques funcionales que configuran todo el sistema. El control del vehículo da la consigna a seguir al control del par, que además recibe información del modelo del motor sobre la estimación del par desarrollado. En este caso, a través de un control vectorial, el par a desarrollar se convierte en las señales de consigna del sistema de conmutación del inversor. Este último bloque determina los pulsos de disparo de los 6 IGBT del inversor.

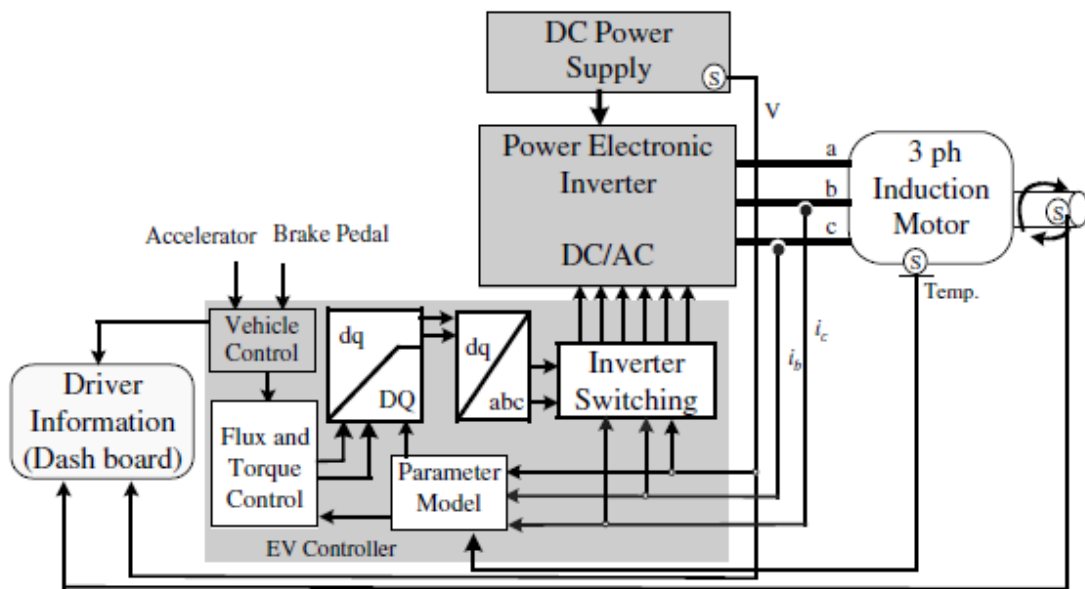


FIG 4.51 Diagrama de bloques del sistema de control de un vehículo eléctrico basado en un control directo del par. [21]

4.4.4.6.6. Soluciones comerciales de módulos de control [4,22]

En la FIG 4.52 se muestra la arquitectura básica empleada por Semikron en sus módulos SKAI para automoción. El módulo comprende el inversor, el sistema de disparo y el sistema de protección, incluyendo sensores de tensión, de corriente y de temperatura del inversor. Dispone de terminales de conexión a la batería y al motor. También incluye un DSP (digital signal processor) alimentado desde la batería auxiliar del vehículo con conexiones a los sensores del motor (temperatura, velocidad y posición angular) e interface CAN para comunicaciones donde se puede programar el control.

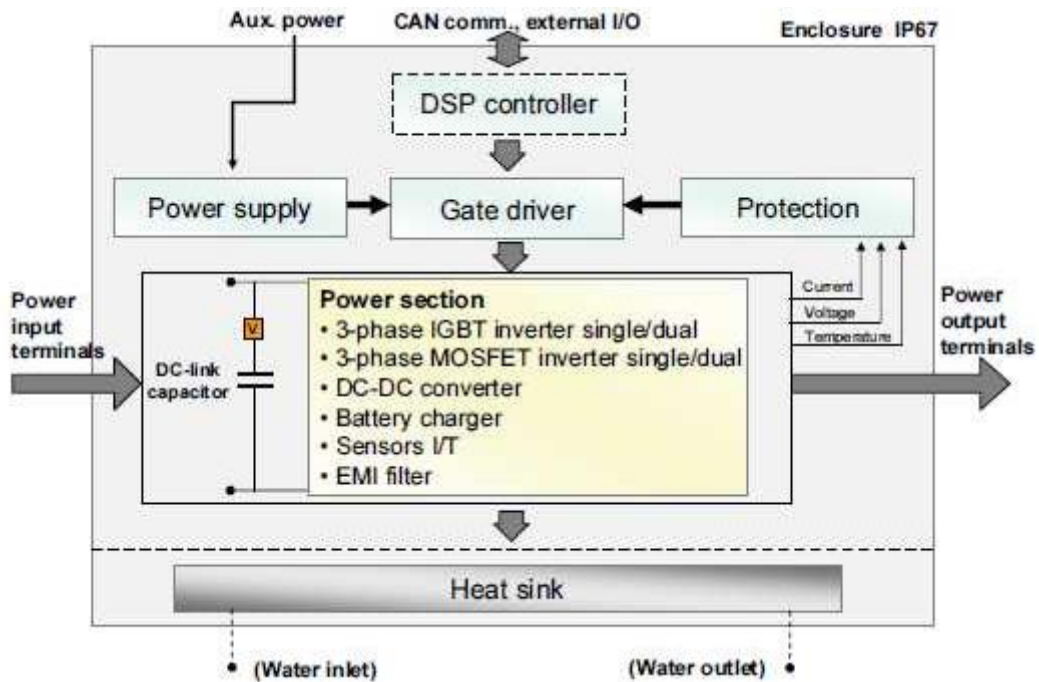


FIG 4.52 Arquitectura empleada por Semikron en sus sistemas SKAI para aplicaciones de automoción. [22]

4.5. Motores de flujo axial [4]

En los motores de flujo axial, el flujo magnético se desplaza axialmente a través del entrehierro, siendo la dirección de la corriente en los conductores radial. De este modo el flujo axial actúa sobre la corriente radial con una fuerza tangencial que hace girar al rotor.

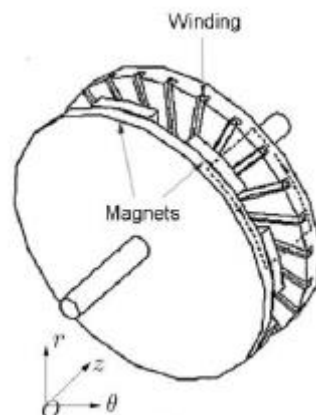


FIG 4.53 Forma típica de un motor de flujo axial. [4]

4.5.1. Motores de flujo axial de imanes permanentes

Los motores de flujo axial se descubrieron hacia 1830, antes que los motores de flujo radial. Pero cuando aparecieron estos últimos, llegaron a ser prácticamente la

única configuración utilizada en máquinas eléctricas. Los avances en electrónica de potencia y en imanes permanentes de alta energía, la sensibilización frente a los problemas medioambientales y la preocupación por el ahorro energético han dado un impulso a la investigación en máquinas eléctricas alternativas, como los motores de flujo axial de imanes permanentes, que puedan ofrecer alta densidad de potencia, alto rendimiento y ahorro en costes.

En las configuraciones con motor directamente integrado en la rueda es prácticamente imposible utilizar motores de flujo radial como los vistos anteriormente, porque su forma cilíndrica y sus dimensiones impiden que se alojen en el estrecho espacio disponible junto a las ruedas. Los motores de flujo axial, al ser finos, son apropiados para esta configuración FIG 4.54.



FIG 4.54 Motor eléctrico integrado en la rueda de la compañía Protean electric. [23]

El uso de motores de flujo axial en configuraciones directamente integradas en la rueda del vehículo presenta las siguientes ventajas:

- En algunas configuraciones hacen un uso más eficiente del volumen disponible de la máquina para la producción de par, dando densidades volumétricas de par más altas.
- Pueden tener un enfriamiento más efectivo, porque el propio rotor actúa como un ventilador radial, evitando la necesidad de un ventilador externo.
- Poseen una forma compacta y plana, que permite una integración directa y sencilla con otros componentes mecánicos. El gran momento de inercia que tienen puede permitir que el rotor de la máquina actúe como un volante de inercia. Además, pueden ser diseñados y construidos de manera modular con rotores adicionales o estatores para aumentar la potencia de salida.
- Bobinado simple.
- El par tiene poco rizado y el motor es silencioso.
- Longitud axial más corta en este tipo de máquina.

- Relación par/volumen mayor.
- El mecanismo diferencial puede ser reemplazado por un sistema diferencial electrónico.
- El sistema de accionamiento electromecánico puede simplificarse considerablemente.
- La masa de la rueda "no suspendida" del vehículo se incrementa debido a la masa del motor eléctrico, lo que resulta en más espacio a bordo y mejor controlabilidad del vehículo.

Pero también presentan desventajas:

- Fuerza de atracción axial muy fuerte entre el estator y el rotor.
- Montaje difícil.
- Fabricación más costosa.
- Problemas mecánicos en tamaños grandes debido al alto diámetro.
- Relación menor de par / masa.
- Los motores de baja velocidad pueden sufrir sobrecarga debido a que la velocidad del rotor es inferior a la que tendría con una disposición engranada.
- Los motores de baja velocidad son más grandes y más pesados que los motores de alta velocidad. El volumen de materiales activos es mayor y esto conduce también a un coste más alto.

4.5.1.1. Topologías y geometrías

La versatilidad y modularidad de estas máquinas las convierten en un candidato a tener en cuenta para aplicaciones de tracción en vehículos eléctricos. En un solo diseño se puede utilizar diferentes configuraciones. Incluso, la potencia de salida se puede doblar, al realizar una conexión de dos motores de lado a lado en el mismo eje (máquinas de múltiples etapas). En la fase de diseño esto supone una clara ventaja porque ofrece al diseñador una amplia gama de opciones; por lo que será más fácil encontrar la configuración de diseño más óptima adaptada a cualquier aplicación específica.

A continuación, se presentarán las diferentes topologías y geometrías disponibles en motores de flujo axial de imanes permanentes, según diferentes criterios. Los principales criterios son los siguientes.

Según la topología del motor:

- De un solo entrehierro FIG 4.55 (a). Son los más simples, pero la fuerza magnética de atracción entre el estator y el rotor está descompensada.
- De dos entrehierros. Compensan la fuerza magnética de atracción entre el estator y el rotor y suministran el doble de par. Hay dos tipos:

- Con un rotor interior FIG 4.55 (b). El rotor está protegido y se facilita la ventilación de los estatores porque son exteriores. Pero se necesita un eje para transmitir la rotación a la rueda.
- Con dos rotores exteriores FIG 4.55 (c). No precisan eje, pero la ventilación del estator se complica.
- De múltiples entrehierros FIG 4.55 (d).

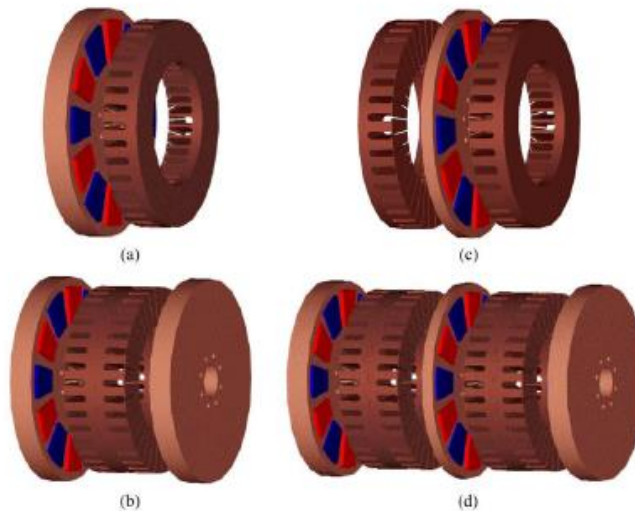


FIG 4.55 Formas constructivas de los motores de flujo axial de imanes permanentes. [4]

Según la forma del estator

- Estator con ranuras, para alojar las bobinas. El mecanizado de las ranuras encarece la fabricación. Aunque puede conseguirse un entrehierro más pequeño, el dentado del estator es causa de la saturación del material magnético, y eso aumenta las pérdidas en el hierro. Las ranuras producen ruido acústico y rizado en el par. Este rizado puede reducirse con un diseño adecuado.
- Estator sin ranuras. El entrehierro debe ser lo suficientemente grande para alojar el conductor eléctrico más una tolerancia mecánica. Eso obliga a equipar la máquina con más cantidad de imanes permanentes. Por otro lado, se elimina la saturación y se minimizan las pérdidas en el hierro. También se suprime el ruido acústico y el rizado en el par.
- Estator sin núcleo. Con este diseño se elimina el material ferromagnético del estator. Desaparecen las corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis y se hace cero la fuerza magnética entre el rotor y el estator. No obstante, aparecen otras corrientes parásitas en los conductores, al estar expuestos directamente al flujo magnético pulsante producido por los imanes permanentes, y se aumentan las pérdidas en el cobre.

Según la configuración de los imanes permanentes del rotor:

- Montados en la superficie. Los imanes se fijan sobre el disco del rotor. Esta variante consigue que el rotor sea muy simple y delgado. Pero para obtener una buena densidad de flujo magnético en el entrehierro se necesitan imanes permanentes con mucho campo remanente.
- Incrustados en el rotor. Esta opción hace que el rotor sea más grueso y complicado. La dispersión de flujo magnético en los extremos de los imanes es mayor que en el caso anterior porque dichos imanes están rodeados de material ferromagnético. Pero los imanes están más protegidos frente a impactos, desgaste y corrosión. Además, puede conseguirse una buena densidad de flujo magnético en el entrehierro a base de incrustar gran cantidad de imanes con poco campo remanente, que es el caso de las ferritas.

Según los devanados del estator:

- Concentrados, en los que cada bobina ocupa una sola ranura. Su construcción puede automatizarse con facilidad, tienen menores pérdidas en el cobre, en igualdad de condiciones se obtiene mayor campo magnético, y presentan mejor aislamiento eléctrico entre las fases.
- Distribuidos, en los que una bobina se reparte entre varias ranuras. Producen muchos menos armónicos.

4.6. Motores de flujo transversal [4]

Los motores de flujo transversal tienen núcleos que se utilizan para guiar el flujo magnético. Este flujo se desplaza en la dirección radial a través del entrehierro y se cierra axialmente a lo largo de los núcleos. Los devanados se encuentran en la dirección del movimiento. Estos motores se denominan de flujo transversal porque el recorrido del flujo es transversal a la velocidad del motor.

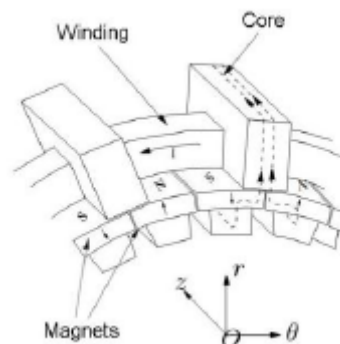


FIG 4.56 Forma típica de un motor de flujo transversal. [4]

4.6.1. Motor de flujo transversal de imanes permanentes

Los motores de flujo transversal son otra alternativa a los motores de flujo axial debido a su forma compacta, siendo muy adecuados para la aplicación de motor integrado en la rueda. Los motores de flujo transversal tienen las siguientes ventajas:

- Se pueden conseguir secciones transversales de bobinas más grandes.
- La longitud de los conductores es relativamente pequeña y se reduce a la dimensión circunferencial.
- Dado que hay menos interacción entre las fases, el fallo en una fase permite que la máquina se mantenga en funcionamiento, pero se generaría menos par y una mayor ondulación en el mismo.
- La relación entre el diámetro del entrehierro y el diámetro exterior de la máquina es mayor porque el rotor es más delgado que el estator. Esto da como resultado un par de torsión grande para el mismo volumen del motor.

Pero también presentan las siguientes desventajas:

- La máquina es más adecuada para velocidades bajas y moderadas.
- El factor de potencia es generalmente bajo debido a un flujo de dispersión alto.
- Los componentes activos del rotor están soportados en una disposición en voladizo, que parece difícil de construir y tiende a ser débil mecánicamente a menos que se tomen medidas para fortalecer el diseño.
- Existen diferentes topologías en los motores de flujo transversal. Las topologías que tienen un par y un factor de potencia menor son más fáciles de construir y son mecánicamente más robustas. Mientras que las topologías con mayor densidad de par y mayor factor de potencia son más difíciles de construir y pueden ser más débiles mecánicamente.

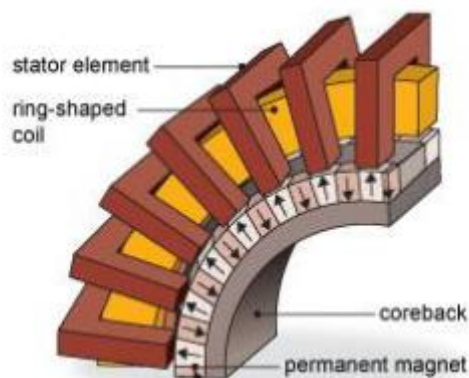


FIG 4.57 Componentes de un motor de flujo transversal. [4]

4.7. Criterios de selección de los motores [14,15]

Parece claro que la selección del motor, para una determinada aplicación, debería ser la de mayor rendimiento, sin embargo, otros factores como el peso reducido (alta densidad de potencia), bajo coste, mínimo mantenimiento, fácil control y bajo ruido influyen de un modo determinante.

La definición de rendimiento de un motor eléctrico no es fácil, ya que en ella influyen otros factores de tipo específicamente comercial, por lo que no facilita la expresión de un método internacionalmente aceptado. No obstante, es posible exponer algunos puntos generales sobre el rendimiento de los motores eléctricos y su comportamiento con el tamaño.

- Los motores eléctricos mejoran su rendimiento con el tamaño. La tabla 4.1 muestra el rendimiento de un rango de motores de inducción de 4 polos. Mientras que estas cantidades son para motores de inducción, una tendencia similar se obtiene para motores de imanes permanentes y de reluctancia conmutada, aunque con una mejora entre un 1-2% (ya que tienen menores pérdidas en el rotor).

Potencia (KW)	Mínimo Rendimiento (%)
1,1	83,8
2,2	86,4
4	88,3
7,5	90,1
15	91,8
30	93,2
55	94,4
90	95,5

Tabla 4.1 Rendimiento mínimo en motores de inducción trifásicos de 4 polos. [15]

- Los motores con mayores regímenes de giro tienen mejor rendimiento que los de menor. La razón estriba en que las pérdidas más importantes están relacionadas con el par, más que con la potencia, por lo que bajos regímenes de giro tendrán mayor par para la misma potencia y, por tanto, mayores pérdidas.
- Los motores refrigerados por líquido funcionan a temperaturas más bajas, reduce la resistencia de los devanados y, mejora el rendimiento en torno al 1%.
- El rendimiento de un motor puede ser muy diferente al dado en las especificaciones, si este funciona en otros puntos diferentes al de par y régimen óptimos. En algunas ocasiones es posible disponer de un mapa de curvas características basados en el funcionamiento en modo motor como el de la FIG 4.58 (motor de imanes permanentes). El máximo rendimiento es de 94% pero dicha condición se obtiene en una franja muy estrecha de

funcionamiento. Se observa que el motor puede funcionar también por debajo del rendimiento del 90%.

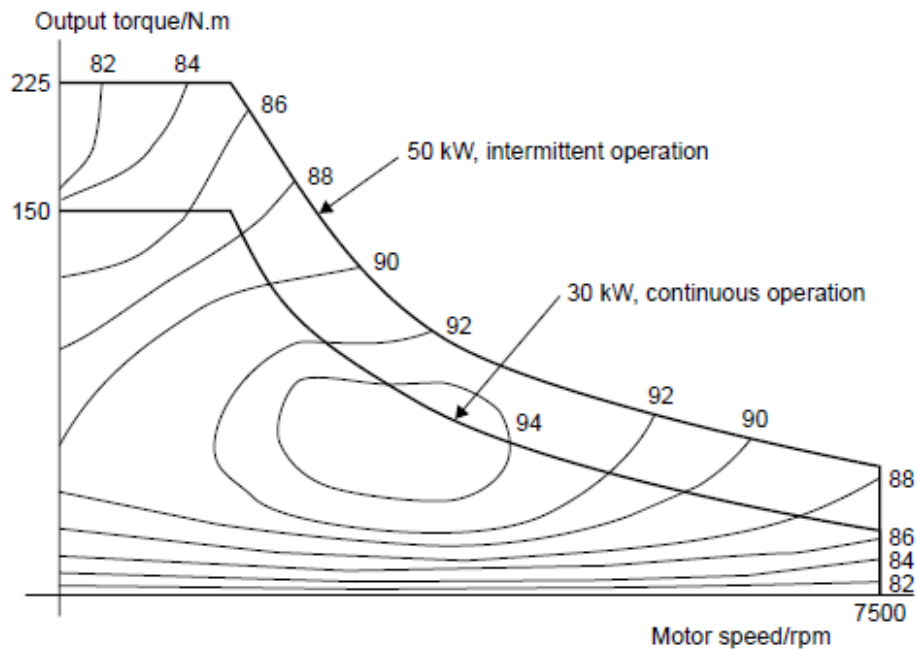


FIG 4.58 Mapa de eficiencia para un motor de imanes permanentes de 30KW. [15]

En el caso del motor de inducción el mapa de iso-rendimiento FIG 4.59 muestra el funcionamiento en modo motor (primer cuadrante) y el funcionamiento modo generador (cuarto cuadrante). El máximo rendimiento es de 90% obtenido también en una franja de funcionamiento muy estrecha. El motor podría funcionar hasta un rendimiento del 80%.

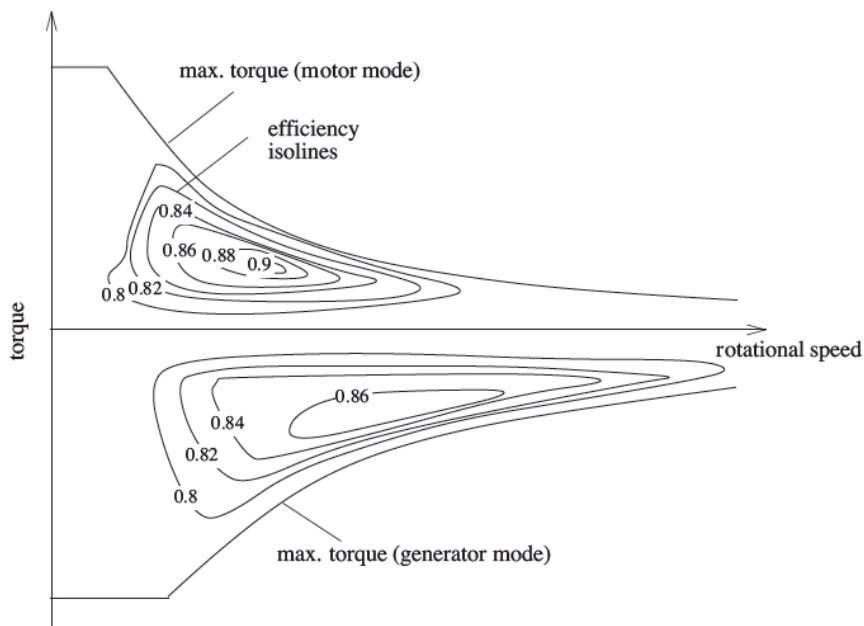


FIG 4.59 Mapa de eficiencia medido en dos cuadrantes para un motor típico de inducción en aplicaciones de tracción. [4]

Un motor eléctrico debería ser, generalmente, lo más pequeño y ligero posible compatible con la potencia requerida. Como en el caso del rendimiento, el tipo de motor seleccionado es mucho menos importante que otros factores cuando se hace referencia a la energía específica y a la densidad de potencia. La FIG 4.60 muestra un mapa de potencias específicas de diferentes motores a distintas potencias. Tomando como ejemplo el motor de imanes permanentes, se puede observar que el método de refrigeración utilizado marca importantes diferencias. La razón es que el tamaño del motor tiene que ser lo suficientemente grande para disponer de calor perdido. Si el motor está refrigerado por líquido, entonces el mismo calor perdido se puede extraer de un motor más pequeño.

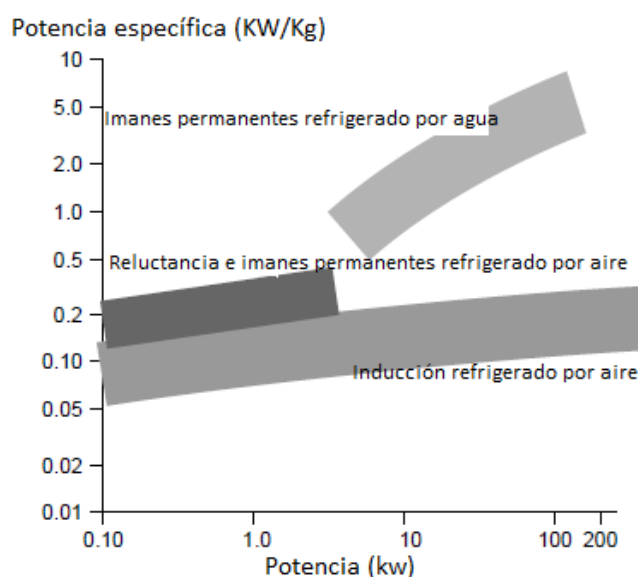


FIG 4.60 Mapa de potencias específicas de diferentes motores en distintas potencias. Escala logarítmica. [15]

Se podría esperar que el rendimiento fuera un factor importante. Un motor más pequeño debería ser más eficiente ya que disipa menos calor. Esto es verdaderamente el caso, y como resultado todos los factores que producen más rendimiento, conducen a una mayor potencia específica. Los más importantes de estos son los siguientes:

- Mayores potencias conducen a mayores rendimientos y, por tanto, mayor potencia específica (Ver en la FIG 4.60, aunque debido a la escala logarítmica se suaviza algo esta tendencia).
- Mayores regímenes de giro conducen a mayores densidades de potencia. El tamaño del motor está más influenciado por el par que por la potencia. La consecuencia es que un motor con un régimen de giro alto y poco par es más pequeño.
- Los motores de mayor rendimiento como los de imanes permanentes y reluctancia conmutada, tienen mayor densidad de potencia que los de inducción.

5. Fundamentos de propulsión en vehículos eléctricos

En este capítulo nos centraremos inicialmente en dar una aproximación conceptual al término tren de potencia o tren propulsor, explicando en que consiste, de que partes se compone, cuál es la función de cada una de ellas, y de qué manera operan en un vehículo eléctrico. Adicionalmente también se presenta una clasificación de los tipos de configuraciones de trenes de potencia presentes en vehículos eléctricos, así como se incluirá también algún ejemplo de la solución adoptada por alguno de los fabricantes existentes.

Posteriormente se realizará un estudio de la propulsión basado en el estudio dinámico del movimiento del vehículo en una sola dimensión espacial más la dimensión temporal. A través de dicho estudio podremos llegar a conocer las prestaciones máximas del vehículo eléctrico; entendiendo por prestaciones la velocidad máxima que puede alcanzar, así como su aceleración. Estas prestaciones máximas van a influir en el diseño del tren propulsor, y han sido simuladas mediante la realización de unos programas en Matlab sobre ejemplos de modelos concretos de vehículos eléctricos como veremos más adelante.

Para finalizar el capítulo, partiendo del modelado del funcionamiento de los componentes en el interior del vehículo eléctrico; se ha obtenido la autonomía teórica de los modelos de vehículo eléctrico simulados; ya que la autonomía es una especificación esencial a la hora de diseñar el tren propulsor. Para ello se ha realizado también unos programas en Matlab que nos imprimirán los resultados de la autonomía teórica que poseen estos vehículos funcionando bajo ciertos ciclos de conducción y de esta manera obtendremos un resultado muy aproximado y fiable de la autonomía nominal dada por el fabricante de estos vehículos eléctricos.

5.1. Configuraciones del tren de potencia [14,16]

Un sistema propulsor o tren de potencia es un mecanismo integrado que se encarga de transmitir la potencia desarrollada por el motor a las ruedas para el movimiento de un vehículo.

En la FIG 5.1 se muestra un tren de potencia conceptual válido tanto para un vehículo eléctrico como un vehículo con motor térmico. Está compuesto por el motor, un embrague (en transmisión manual) o un convertidor de par (en transmisión automática), la transmisión, el accionamiento final (o reductora), el diferencial, el eje de transmisión y las ruedas motrices.

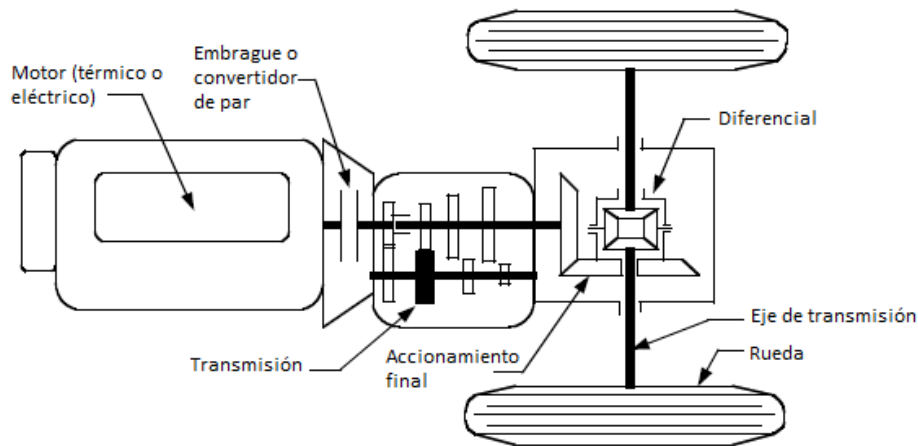


FIG 5.1 Tren de potencia conceptual para un automóvil. [16]

El par y la velocidad de rotación del eje de salida del motor se transmite a las ruedas motrices a través de la acción conjunta del embrague o convertidor de par, transmisión, accionamiento final, diferencial y eje de transmisión. El embrague se utiliza en la transmisión manual para acoplar la transmisión o desacoplarla del motor. El convertidor de par en transmisión automática es un dispositivo hidrodinámico que funciona como un embrague en transmisión manual con una relación de transmisión continuamente variable. La transmisión suministra unas pocas relaciones de marchas desde su eje de entrada hasta su eje de salida para el perfil de velocidad de torsión que se exige al motor para adaptarse a los requisitos de la carga. El accionamiento final suele ser un par de engranajes que suministran una reducción de velocidad adicional y distribuyen el par a cada rueda a través del diferencial.

Inicialmente se venía transformando vehículos convencionales con motor de combustión interna a vehículos eléctricos. Esta conversión consiste en cambiar el motor térmico por el motor eléctrico y el tanque de gasolina por las baterías, mientras se mantenía el resto de componentes del vehículo. Pero debido a los inconvenientes que sufría esta configuración como el elevado peso, disponibilidad de espacio y la baja flexibilidad en el funcionamiento ha causado que este tipo de configuración tenga restringido su aplicación. En su lugar los vehículos eléctricos se diseñan a propósito, con su estructura y chasis originales específicos.

Actualmente existen una variedad de configuraciones en vehículos eléctricos debido a las variaciones de las características de la propulsión eléctrica y fuentes de energía, como se puede observar en la FIG 5.2.

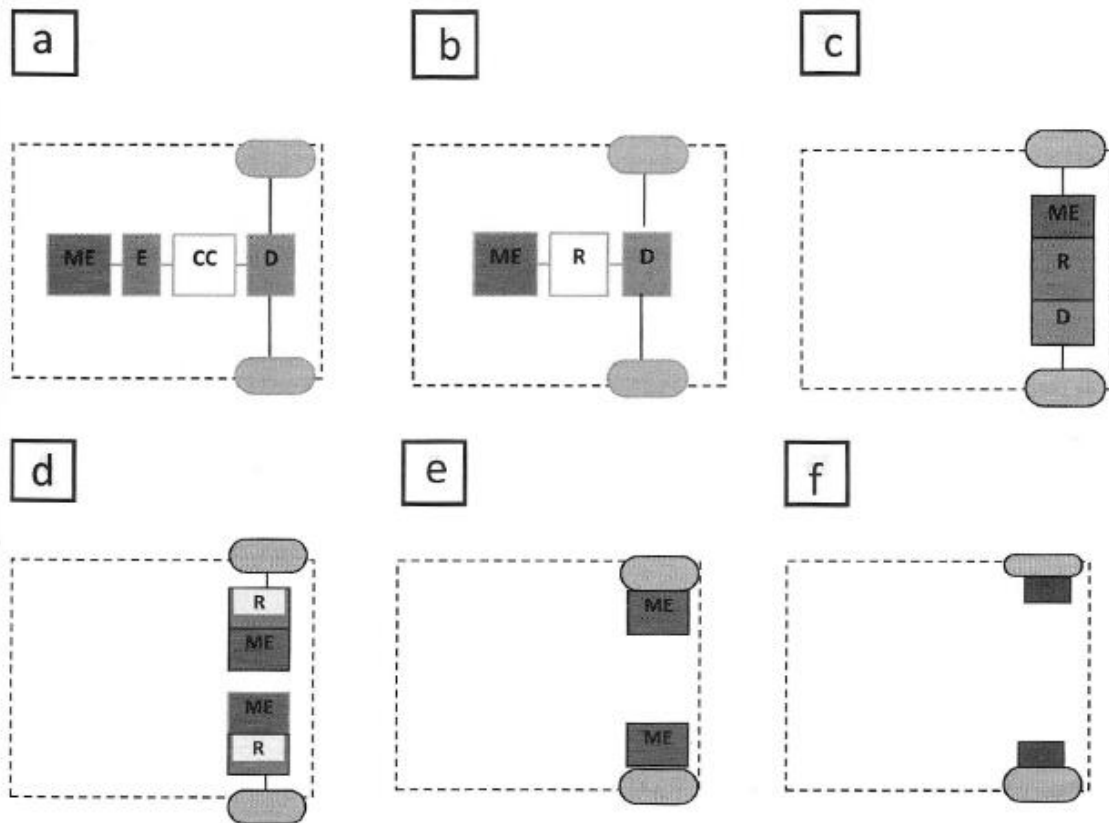


FIG 5.2 Posibles configuraciones del tren de potencia en un vehículo eléctrico. ME: motor eléctrico; E: embrague; CC: caja de cambios; R: reductora; D: diferencial. [14]

- Configuración a: Es la primera alternativa en la que se cambia el motor térmico por un motor eléctrico. Consta de un motor eléctrico, el embrague, la caja de cambios y el diferencial. El embrague y la caja de cambios se pueden sustituir por una caja automática.
- Configuración b: Con un motor eléctrico con potencia constante en un amplio de régimen de giro, la caja de cambios se puede sustituir por una caja reductora, eliminando la necesidad de un embrague. Esta configuración reduce el tamaño y peso de la transmisión y simplifica el control de la conducción ya que no es necesario el cambio de velocidades.
- Configuración c: Similar a la configuración anterior, pero en este caso integrado en el eje de tracción con los ejes acoplados a ambas ruedas. El tren de potencia se simplifica y es más compacto.
- Configuración d: El diferencial se sustituye por dos motores en rueda. Cada uno de ellos acciona la rueda a diferentes velocidades cuando el vehículo gira en curva.
- Configuración e: Con relación a una mayor simplificación del tren propulsor, el motor eléctrico se puede colocar dentro de la rueda. Esta disposición se conoce como motor de rueda. Se utiliza un pequeño tren planetario para reducir la velocidad del motor y reforzar el par del mismo.

- Configuración f: La conexión entre motor eléctrico y rueda es directa sin caja reductora. El control de velocidad del motor eléctrico es equivalente al control de velocidad de la rueda y, por tanto, de la velocidad del vehículo. Sin embargo, esta disposición requiere que el motor eléctrico tenga un elevado par para arrancar y acelerar el vehículo.

Se presenta a continuación imágenes de algunos ejemplos de disposiciones del tren de potencia utilizados en modelos comerciales de vehículos como el General Motors EV1 FIG 5.3, el Audi A6 hybrid en la FIG 5.4 y el Mercedes Benz SLS AMG E-CELL en la FIG 5.5.

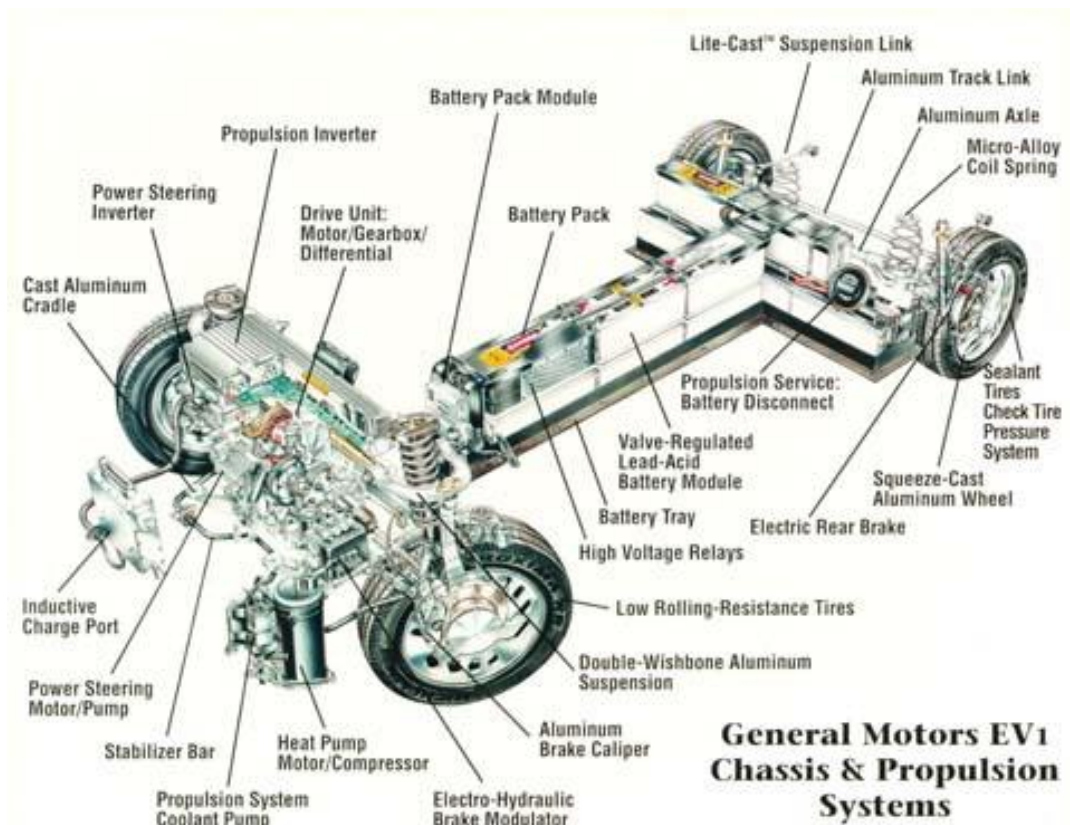


FIG 5.3 Tren de potencia General Motors EV1. [24]

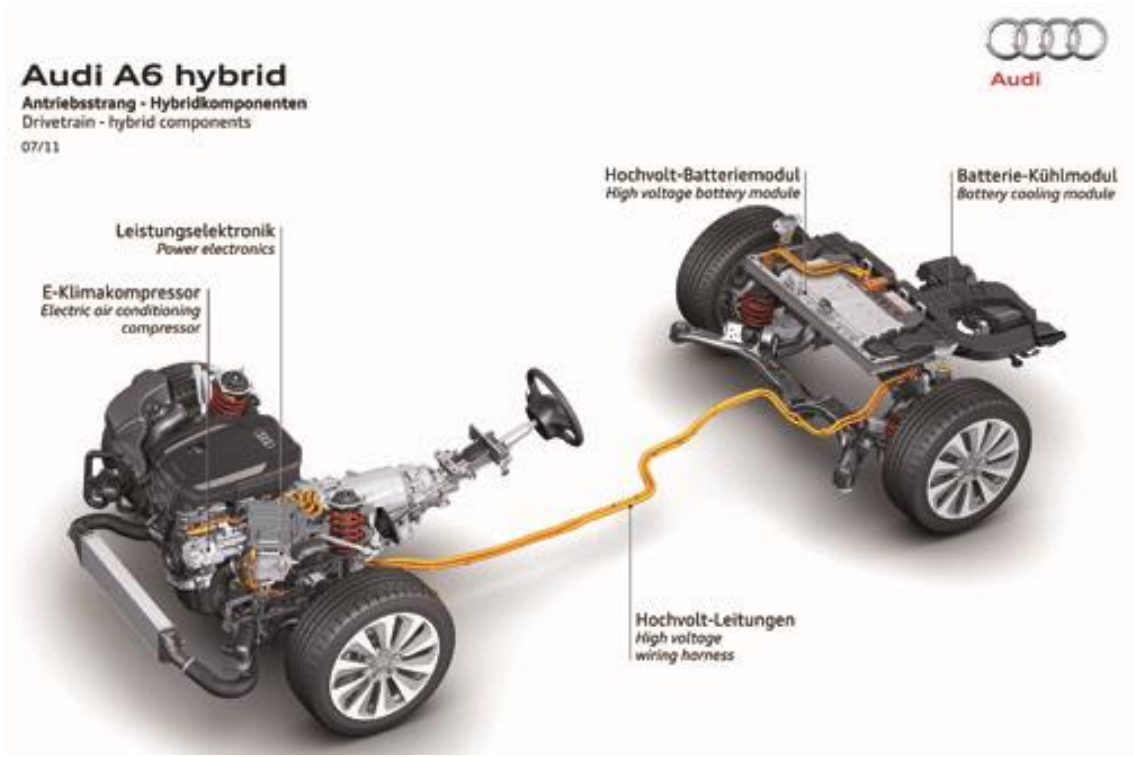


FIG 5.4 Tren de potencia de Audi A6 hybrid. [25]

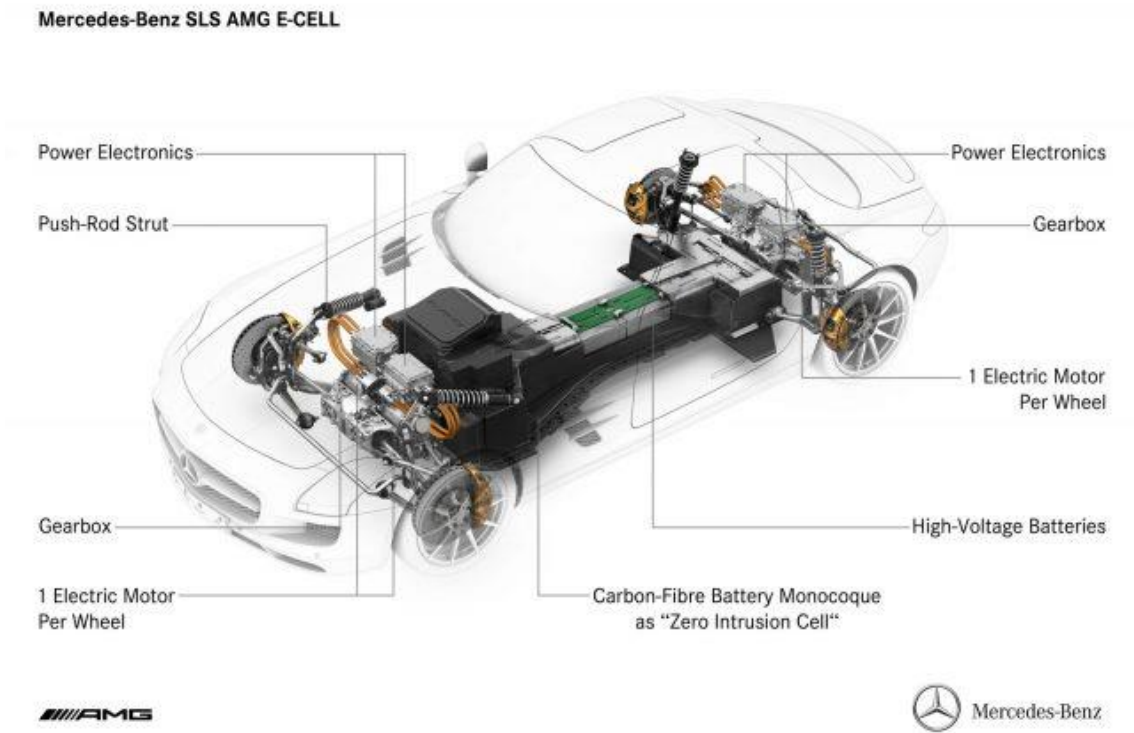


FIG 5.5 Tren de potencia Mercedes-Benz SLS AMG E-CELL. [26]

5.2. Fuerza de tracción [15]

La fuerza de tracción F_{te} es la que impulsa al vehículo hacia adelante y se transmite al suelo a través de las ruedas motrices. Su expresión se obtiene aplicando la segunda Ley de Newton, por lo que es necesario identificar las fuerzas que actúan sobre el vehículo eléctrico. Supongamos un vehículo de masa m , a una velocidad v , y que ψ es la pendiente de la calzada como se muestra en la FIG 5.6.

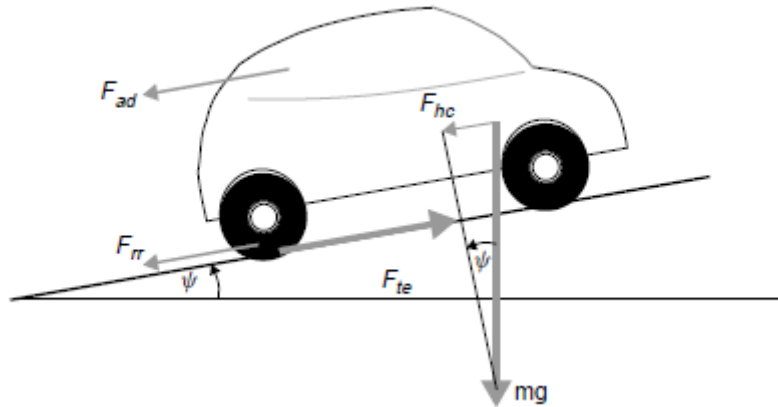


FIG 5.6 Fuerzas que actúan sobre un vehículo ascendiendo por una pendiente. [15]

Para que el vehículo se propulse hacia adelante la fuerza de tracción tiene que lograr lo siguiente:

- Superar la resistencia a la rodadura.
- Superar la resistencia aerodinámica.
- Proporcionar la fuerza necesaria para superar la componente del peso del vehículo en la dirección de la pendiente.
- Acelerar el vehículo y sus órganos giratorios, si la velocidad no es constante.

Consideraremos cada una de estas fuerzas actuando a la vez sobre el vehículo.

5.2.1. Resistencia a la rodadura.

La resistencia a la rodadura se debe principalmente a la fricción del neumático del vehículo con la carretera. Es aproximadamente constante y apenas depende de la velocidad del vehículo siendo además proporcional al peso del mismo. Su expresión viene dada por la siguiente ecuación:

$$F_{rr} = \mu_{rr} mg$$

Ecuación 5.1

Donde μ_{rr} es el coeficiente de resistencia a la rodadura, que depende del tipo de neumático y de su presión. Los valores típicos del coeficiente de rodadura van desde 0,005 hasta 0,015.

5.2.2. Resistencia aerodinámica

Es debida a la fricción de la carrocería del vehículo que se mueve a través del aire. Depende del área frontal, de la forma del vehículo, de las partes salientes de la carrocería como pueden ser los espejos laterales, conductos y pasajes de aire, spoilers, y muchos otros factores. Su expresión es la siguiente:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2$$

Ecuación 5.2

Donde ρ es la densidad del aire (1,25 kg/ m³, a nivel del mar). A es el área frontal, y v es la velocidad. C_d es una constante llamada coeficiente de resistencia aerodinámica.

El coeficiente de arrastre C_d puede reducirse mediante un buen diseño del vehículo. Un valor típico para un turismo podría ser 0,3, pero algunos diseños del vehículo eléctrico han alcanzado los valores más bajos como 0,19; debido hay que su diseño permite más flexibilidad en la ubicación de los componentes principales. Sin embargo, algunos vehículos, como las motocicletas o autobuses, tendrán inevitablemente valores mucho mayores del C_d , situándose alrededor del 0,7.

5.2.3. Fuerza de ascenso en pendiente

Se trata de la componente del peso del vehículo que actúa a lo largo de la pendiente. Su expresión se reduce a lo siguiente:

$$F_{hc} = m g \sin \psi$$

Ecuación 5.3

5.2.4. Fuerza de aceleración

Esta fuerza proporcionará la aceleración lineal del vehículo y viene dada por la conocida ecuación derivada de la segunda ley de Newton:

$$F_{la} = m a$$

Ecuación 5.4

Sin embargo, para obtener una expresión más precisa de la fuerza necesaria para acelerar el vehículo, también debemos considerar la fuerza derivada de la aceleración angular de los órganos giratorios del vehículo. Es decir, tenemos que considerar tanto la aceleración lineal, como la aceleración rotacional. Para ello se considera una transmisión simple actuando como entrada el par del motor y como salida la fuerza de tracción en los neumáticos FIG 5.7.

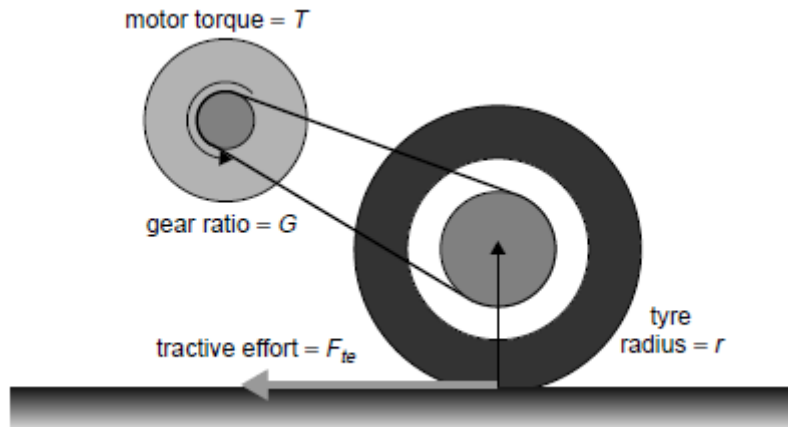


FIG 5.7 Representación de la transmisión del vehículo eléctrico. [15]

La expresión que nos sirve para modelar esta transmisión simple sería:

$$F_{te} = \frac{G}{r} \eta_g T$$

Ecuación 5.5

Donde \$r\$ es el radio del neumático, \$G\$ es la relación de transmisión, \$\eta_g\$ es el rendimiento de la transmisión y \$T\$ es el par. La ecuación 5.5 relaciona la fuerza de tracción del vehículo (traction effort, \$F_{te}\$) y el par motor (torque, \$T\$). Con ella es posible calcular el par necesario para mover el vehículo eléctrico a partir de la fuerza de tracción.

Análogamente a la ecuación 5.5 se obtiene la relación de la fuerza necesaria para la aceleración angular de los órganos giratorios del vehículo; solo que este caso el par es el debido a la aceleración angular y viene dado como:

$$T_{wa} = I G \frac{a}{r}$$

Ecuación 5.6

Donde \$T_{wa}\$ es el par rotacional, \$I\$ es el momento de inercia de los órganos giratorios del vehículo, \$G\$ es la relación de transmisión, \$a\$ es la aceleración y \$r\$ es el radio de las ruedas.

Por lo tanto, en este caso la fuerza rotacional (F_{wa}) se obtendría de la siguiente forma:

$$F_{wa} = I \frac{G}{r} \eta_g T_{wa} = I \frac{G^2}{r^2} \eta_g a$$

Ecuación 5.7

Para unos valores típicos de un motor eléctrico de 30 kW y 7000 rpm en un vehículo de 800 kg de masa a 60 km/h con $G/r=40$, $\eta_g=1$ e $I=0,025$ kg m² se tiene la siguiente relación entre la F_{wa} y la F_{la} :

$$\frac{F_{wa}}{F_{la}} = \frac{\frac{G^2}{r^2} \eta_g I a}{m a} = \frac{40}{800} = 0,05 = 5\%$$

Ecuación 5.8

Por lo que podríamos decir la fuerza de aceleración lineal es mucho mayor que la rotacional normalmente. En muchos casos para simplificar se acostumbra a incrementar la masa en un 5% (masa revisada) para englobar la F_{wa} en F_{la} . Se denomina factor de inercia δ a este coeficiente.

5.2.5. Fuerza de tracción total

La fuerza de tracción total es la suma de todas las fuerzas anteriores:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{wa}$$

Ecuación 5.9

Donde:

- F_{rr} es la fuerza de resistencia a la rodadura, dada por la ecuación 5.1.
- F_{ad} es la fuerza de la resistencia aerodinámica dada por la ecuación 5.2.
- F_{hc} es la fuerza de ascenso en pendiente dada por la ecuación 5.3.
- F_{la} es la fuerza de aceleración lineal dada por la ecuación 5.4.
- F_{wa} es la fuerza de aceleración rotacional dada por la ecuación 5.7

Tanto F_{la} como F_{wa} pueden ser negativas si el vehículo está decelerando, y F_{hc} también podría ser negativa en el caso de que el vehículo descendiera.

5.3. Prestaciones del vehículo eléctrico [15]

El tiempo de aceleración hasta una determinada velocidad se considera generalmente como uno de los datos característicos que definen las prestaciones de un vehículo eléctrico, aunque no se ha normalizado la forma de medirlo ni la manera

de expresarlo. Otro de los datos característicos que definen las prestaciones de un vehículo eléctrico sería la velocidad máxima de crucero. Como se supone que la capacidad de adherencia de los neumáticos a la calzada es la suficiente, el dato de velocidad máxima es independiente de esta circunstancia.

Tanto la aceleración como la velocidad máxima, se pueden calcular de forma teórica o también medirlas experimentalmente probando el vehículo eléctrico. Los vehículos de combustión interna se prueban a máxima potencia, es decir, a máxima aceleración (wide open throttle, WOT).

Si el vehículo es eléctrico se le hace funcionar desarrollando el motor su par máximo. Como ya hemos visto anteriormente en un motor eléctrico el par máximo se mantiene constante hasta la velocidad base o crítica. Por encima de ella el par máximo es función de la velocidad. En el caso del motor asíncrono disminuye de forma hiperbólica manteniendo la potencia constante; y para el caso de un motor de continua la disminución es de manera lineal.

Por lo tanto, tendremos dos situaciones diferentes:

- Una donde la velocidad de giro del motor es menor que la velocidad base, donde se cumplirá que el par en el eje del motor es el par máximo.
- Otra donde la velocidad de giro del motor es mayor que la velocidad base, donde se cumplirá que para un motor de continua sin escobillas el par responde a una expresión donde va disminuyendo de forma lineal; y en el caso del motor asíncrono el par se va reduciendo hiperbólicamente. Ambas expresiones manteniendo la potencia constante en ese tramo.

Partiendo de la ecuación 5.9 de la fuerza de tracción total, sustituyendo cada una de las expresiones de las fuerzas que intervienen en ella, se obtendría una expresión de la que podríamos obtener la aceleración del vehículo, así como su velocidad máxima. Para ello suponemos que la prueba se realiza en llano por lo tanto $F_{hc} = 0$. También suponemos que se realiza a nivel del mar por lo que la densidad es la del aire en estas condiciones. Si además se sustituye a como dv/dt en la ecuación 5.9, está nos quedará como:

$$\frac{G}{r} \eta_g T = \mu_{rr} m g + 0,625 A C_d v^2 + \left(m + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} \right) \frac{dv}{dt}$$

Ecuación 5.10

Obtenemos por lo tanto una ecuación diferencial de primer orden para la velocidad cuya solución se puede obtener numéricamente. Para ello hemos implementado sendos programas en Matlab que resolverán dicha ecuación y nos proporcionarán unos resultados gráficos muy útiles. Dichos programas son ScootA.m que simula la aceleración de un scooter eléctrico como es el modelo Scoot'Elec de Peugeot; y

GmEv1.m que simula la aceleración del coche eléctrico GM EV1 de General Motors. Los datos para su simulación en ambos casos han sido obtenidos de [15].

Datos para la simulación del Scoot'Elec de Peugeot:

- Relación de transmisión $G = 2$.
- Radio de las ruedas $r = 0,21$ m.
- Rendimiento de la transmisión $\eta_g = 0,98$.
- Curva característica mecánica $T = 153 - 1,16w$. Donde w es la velocidad de giro del motor. La ecuación se aplicará cuando la velocidad de giro del motor sea mayor que la velocidad base.
- Coeficiente de rodadura $\mu_{rr} = 0,007$.
- La masa del scooter es de 115 kg. La masa del pasajero se considera 70 kg. En total 185 kg. Para no utilizar el momento de inercia, se toma una masa revisada de $185 \cdot (1+0,05) = 194$ kg.
- Área frontal del vehículo $A = 0,6$ m².
- Coeficiente de resistencia aerodinámica $C_d = 0,75$.
- Motor de continua sin escobillas o Brushless:
 - Tensión de alimentación 18 V.
 - Corriente máxima 250 A.
 - Par máximo 34 Nm.
- Velocidad máxima 50 Km/h.
- Velocidad base (crítica) 38,9 Km/h.

Sustituyendo los datos en la ecuación 5.10 obtenemos la ecuación diferencial válida hasta la velocidad base (tomando el par máximo):

$$\frac{dv}{dt} = 1,57 - 0,00145 v^2$$

Ecuación 5.11

Sustituyendo los datos en la ecuación 5.10 obtenemos también la ecuación diferencial válida por encima de la velocidad base (tomando la expresión de la curva característica mecánica de este motor):

$$\frac{dv}{dt} = 7,3 - 0,53 - 0,00145 v^2$$

Ecuación 5.12

A través del programa ScootA.m hemos resuelto las ecuaciones diferenciales transformando las derivadas en diferencias entre dos valores consecutivos, obteniendo las siguientes gráficas de aceleración del modelo Scoot'Elec de Peugeot.

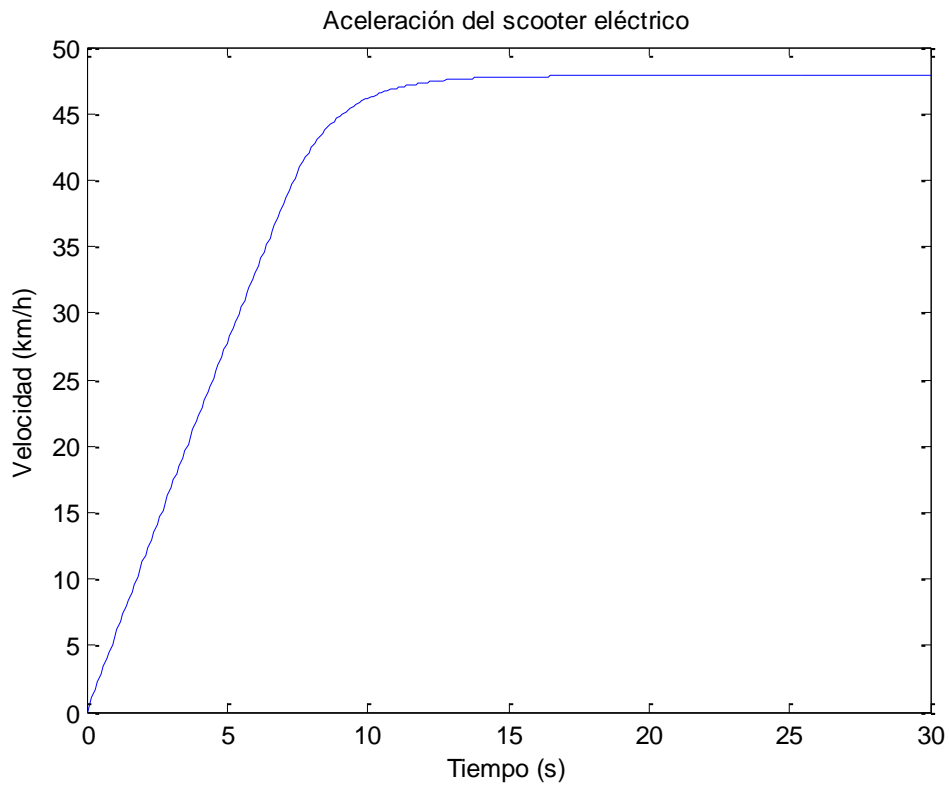


FIG 5.8 Gráfica Velocidad/Tiempo del Scoot'Elec de Peugeot implementado en ScootA.m. [elaboración propia]

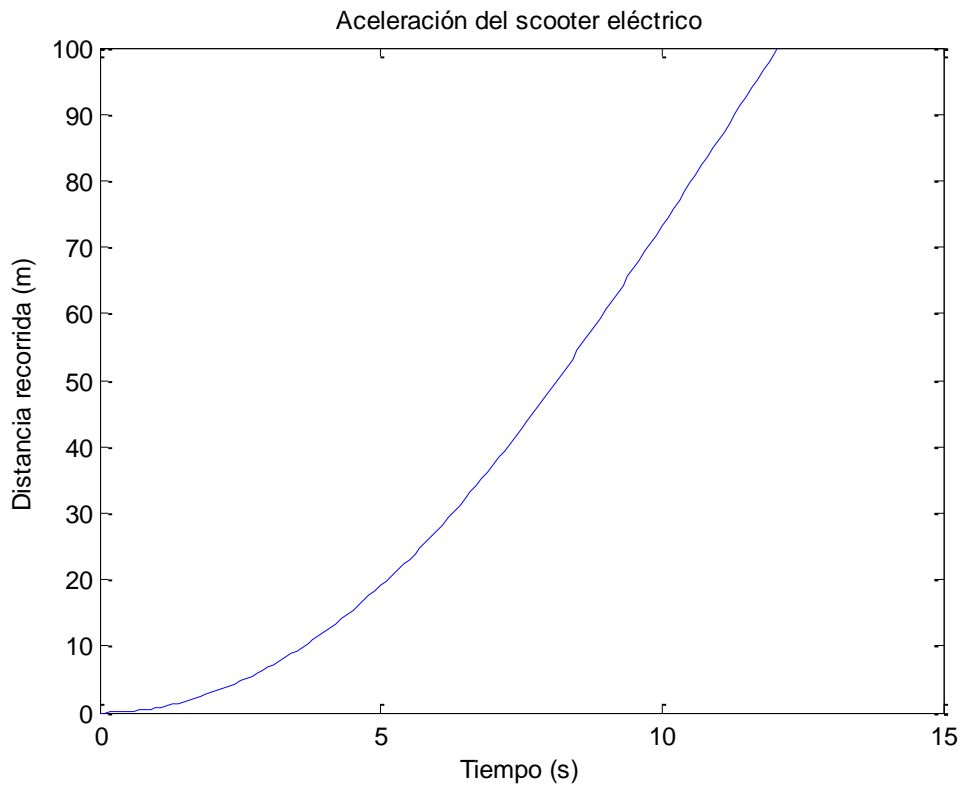


FIG 5.9 Gráfica Distancia/Tiempo del Scoot'Elec de Peugeot implementado en ScootA.m. [elaboración propia]

Desde parado y en llano tardaría en recorrer 10 m 3,2 s; y en llegar a los 100 m tardaría 12 s. La velocidad máxima alcanzada se obtiene a los 9 s de aceleración y sería en torno a los 48 km/h. Como se aprecia el resultado de la simulación a tenor de los datos obtenidos, podríamos decir que es el que cabría esperarse de un motor de potencia relativamente baja utilizado típicamente en un scooter eléctrico. Su aceleración y velocidad máxima son más que suficientes para atender a las necesidades de conducción en un entorno urbano.

De forma análoga a como ha sido realizado ScootA.m se ha realizado también en Matlab el programa GmEV1.m que simula la aceleración del modelo de vehículo eléctrico EV1 de la compañía General Motors. Los datos necesarios para realizar su simulación son los que se recogen a continuación:

- Relación de transmisión $G = 11$.
- Radio de las ruedas $r = 0,3$ m.
- Rendimiento de la transmisión $\eta_g = 0,95$.
- Curva característica mecánica $T = 2756/v$. Donde v es la velocidad del vehículo. La ecuación se aplicará cuando la velocidad de giro del motor sea mayor que la velocidad base o crítica.
- Coeficiente de rodadura $\mu_{rr} = 0,0048$.
- La masa del vehículo es de 1400 kg. Se consideran 2 pasajeros con masa de 70 kg cada uno. En total 1540 kg. Para no utilizar el momento de inercia, se toma una masa revisada de $1540 \cdot (1+0,05) = 1617$ kg.
- Área frontal del vehículo $A = 1,8$ m².
- Coeficiente de resistencia aerodinámica $C_d = 0,19$.
- Motor de inducción:
 - Par máximo 140 Nm.
- Velocidad máxima 130 Km/h.
- Velocidad base (crítica) 72 Km/h.

Sustituyendo los datos en la ecuación 5.10 obtenemos la ecuación diferencial válida hasta la velocidad base (tomando el par máximo):

$$\frac{dv}{dt} = 3,11 - 0,000137 v^2$$

Ecuación 5.13

Sustituyendo los datos en la ecuación 5.10 obtenemos también la ecuación diferencial válida por encima de la velocidad base (tomando la expresión de la curva característica mecánica de este motor):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{62,1}{v} - 0,046 - 0,000137 v^2$$

Ecuación 5.14

Los resultados de la resolución numérica se recogen en el programa GmEv1.m y son los presentados a continuación.

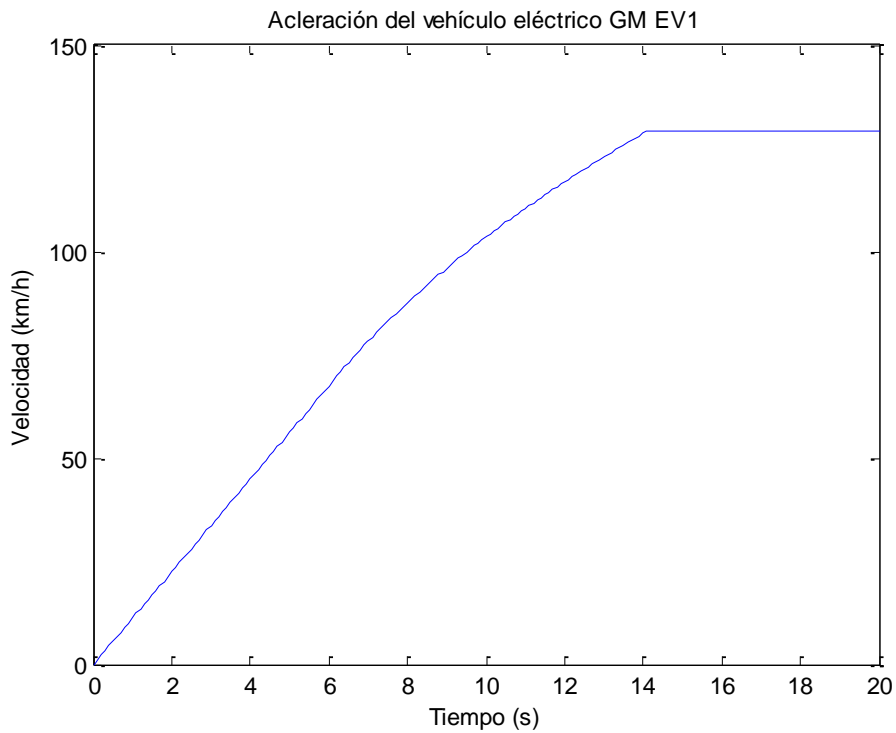


FIG 5.10 Gráfica Velocidad/Tiempo del GM EV1 implementado en GmEv1.m. [elaboración propia]

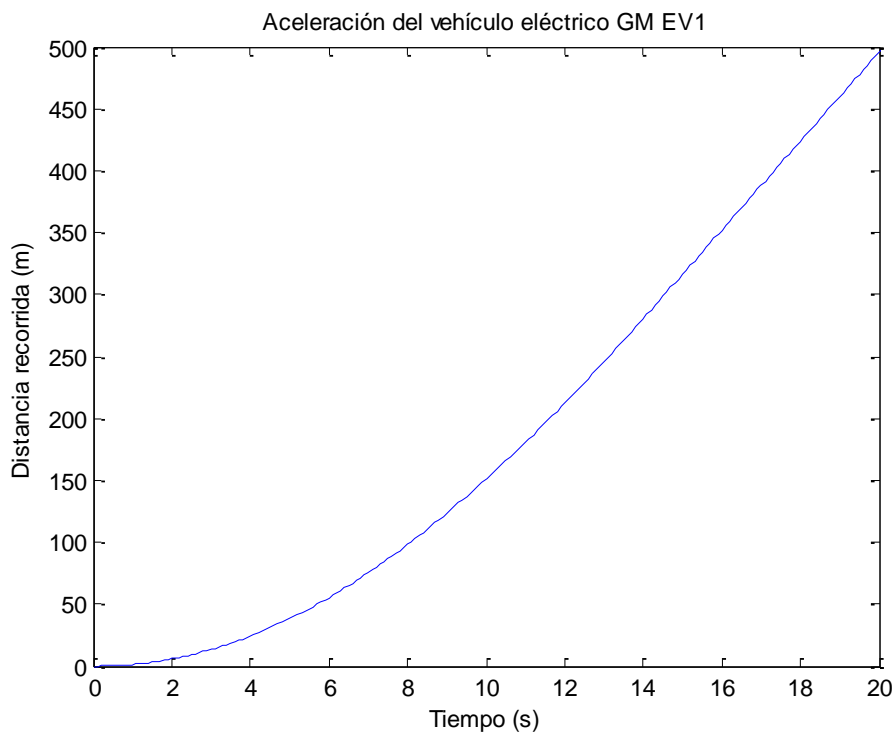


FIG 5.11 Gráfica Distancia/Tiempo del GM EV1 implementado en GmEv1.m. [elaboración propia]

Desde parado y en llano tardaría en recorrer 100 m 8,1 s. El tiempo para alcanzar los 100km/h es de 9 s. La velocidad máxima alcanzada se obtiene a los 14 s de aceleración y sería en torno a los 130 km/h; el motor podría seguir acelerando más pero el controlador del vehículo limita la velocidad para que no lo haga ya que esto podría dañar el motor. Con estos datos de simulación de aceleración y velocidad máxima podríamos concluir que este vehículo se adapta perfectamente a los requerimientos necesarios de conducción en las ciudades, así como podría ser usado también en desplazamientos interurbanos ya que su velocidad de cruce es aceptable siempre que la autonomía del mismo nos lo permita.

5.4. Ciclos de conducción y autonomía [15]

Los parámetros que definen las prestaciones del vehículo vistos hasta ahora presentan las capacidades máximas del vehículo frente a velocidad y aceleración. Sin embargo, estas prestaciones máximas se determinan en unas condiciones que no son las ordinarias de circulación. Durante la mayor parte del funcionamiento en condiciones reales el tren de potencia del vehículo trabaja a carga parcial. Esto se debe a que en el comportamiento del vehículo influyen circunstancias como el tipo de vía (urbana, carretera o autovía), la climatología o el estado del tráfico.

Cuando se desea estudiar otros parámetros como puede ser la autonomía hay que tener en cuenta estas contingencias. Para estandarizarlos, en la medida de lo posible, se definen los ciclos de conducción que son escenarios que normalizan situaciones de conducción típicas.

Los ciclos de conducción por lo tanto son planos representativos que se han desarrollado para emular las condiciones reales del tráfico. En ellos se representan las velocidades del vehículo frente a tiempo en carretera plana. Existe un gran número de ciclos de conducción que se han desarrollado mediante la observación de los patrones de conducción que intentan representar los perfiles de velocidad reales en diferentes condiciones.

Debido a que en los ciclos de conducción la velocidad del vehículo está cambiando casi constantemente, los cálculos se hacen algo más complejos. Pero a través del uso de unos programas creados con Matlab hemos podido realizar estos cálculos reduciendo la complejidad del problema. Para ello partimos de los datos del vehículo seleccionado, que en nuestro caso serán el scooter Scoot'Elec de Peugeot o el coche eléctrico GM EV1 de General Motors y aplicando un método de funcionamiento determinado en el ciclo de conducción seleccionado obtendríamos la autonomía para cada caso.

Los ciclos de conducción seleccionados para las simulaciones serán los presentados a continuación.

SFUDS (Simplified Federal Urban Driving Schedule): Es un ciclo de conducción desarrollado en Estados Unidos con una duración de 360 segundos destinado al ámbito de la conducción urbana. En él, la velocidad se especifica para cada segundo de duración. El perfil de velocidad de este ciclo obtenido con Matlab se representa en la FIG 5.12. Los datos de velocidad se han extraído de [15].

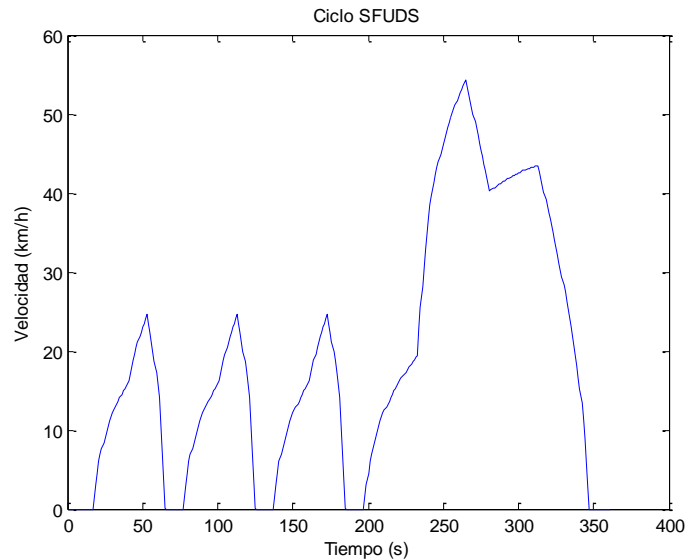


FIG 5.12 Ciclo de conducción SFUDS obtenido de Gmev1_sfuds.m. [elaboración propia]

HWFET (Hiwhgay Fuel Economy Test): También fue desarrollado en Estados Unidos, pero en este caso el ciclo representa una conducción extraurbana por carretera que no supera los 100 km/h. La velocidad se especifica en cada momento durante su duración que es de 765 s. Su perfil de velocidad se ha obtenido con Matlab en la FIG 5.13. Los datos de su velocidad han sido extraídos de [27].

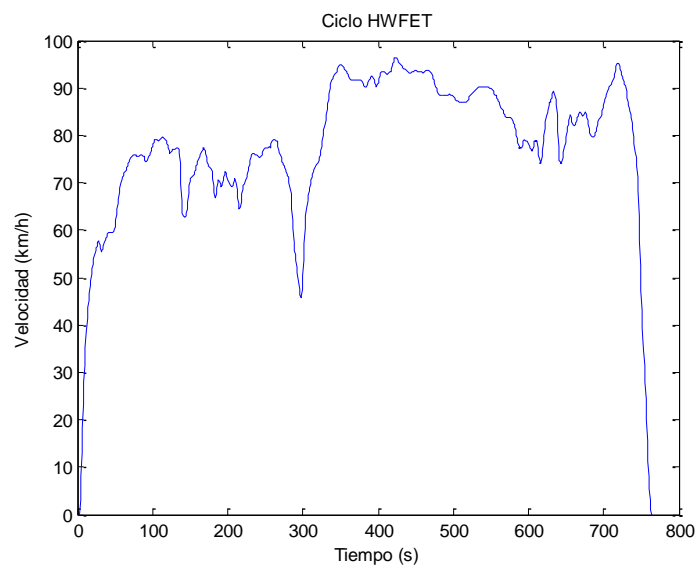


FIG 5.13 Ciclo de conducción HWFET obtenido de Gmev1_HWFET.m. [elaboración propia]

US06: Desarrollado en Estados Unidos está destinado a la conducción extraurbana por carretera con paradas y elevadas aceleraciones hasta altas velocidades. Es más agresivo que los anteriores y exige una alta carga al motor. Dura 600 s y se especifica la velocidad en cada uno de ellos. Su perfil de velocidad se ha obtenido con Matlab y es el que se muestra en la FIG 5.14. Los datos de velocidad se han extraído de [27].

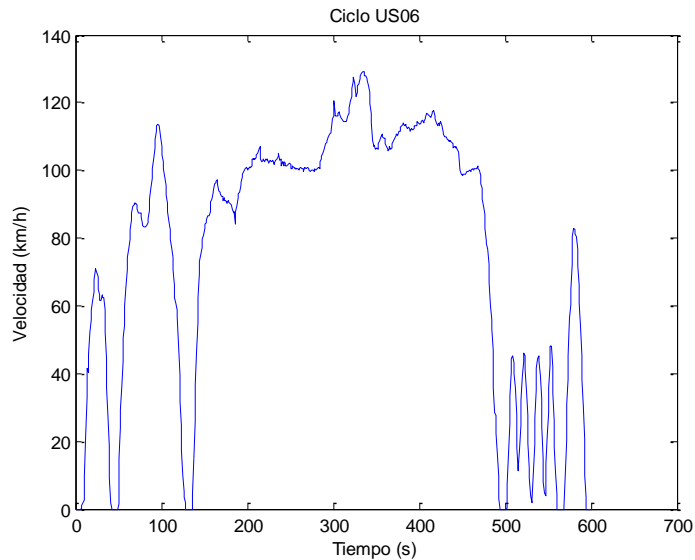


FIG 5.14 Ciclo de conducción US06 obtenido de Gmev1_US06.m. [elaboración propia]

ECE-15: Ciclo de conducción europeo que representa la conducción urbana con una duración de 195 s. Los ciclos europeos son más simples que los de Estados Unidos, ya que tiene periodos de aceleración, deceleración y velocidad constantes. En él, la velocidad del vehículo no excede los 50 km/h. El perfil de velocidad con Matlab es el de la FIG 5.15. Los datos de velocidad se han extraído de [27].

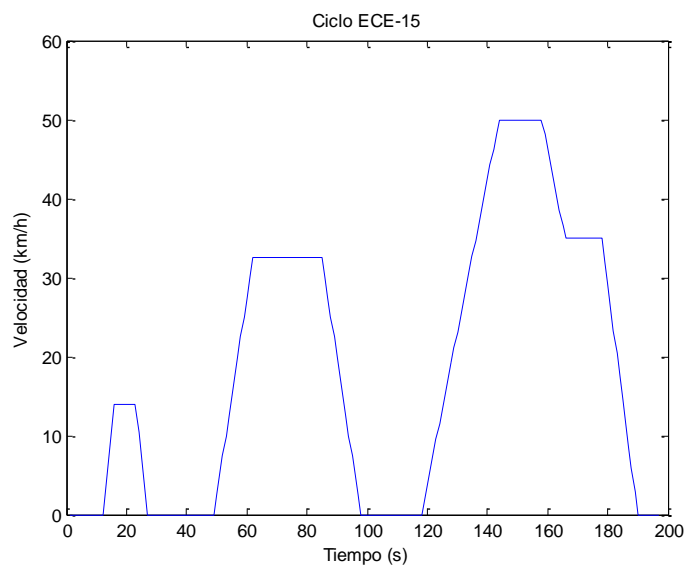


FIG 5.15 Ciclo de conducción ECE-15 obtenido de Gmev1_ECE.15.m. [elaboración propia]

EUDC: Es un ciclo de conducción europeo que representa una conducción extraurbana. Su duración es de 365 s y tanto la aceleración como la velocidad son mayores que en el ciclo anterior llegando a alcanzar los 120 km/h. El perfil de velocidad con Matlab es el de la FIG 5.16. Los datos de velocidad se han extraído de [27].

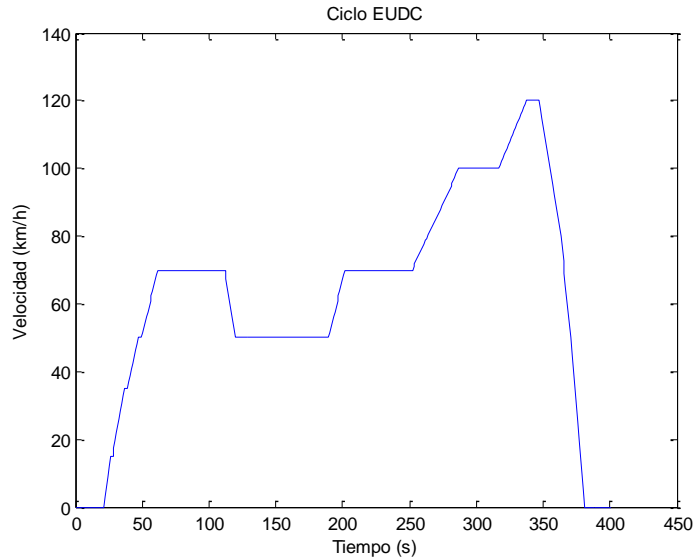


FIG 5.16 Ciclo de conducción EUDC obtenido de Gmev1_EUDC.m. [elaboración propia]

ECE-47: Ciclo de conducción europeo de ámbito urbano, destinado a vehículos de baja velocidad como los scooters eléctricos. Inicialmente el vehículo acelera al máximo desde parado, y luego mantiene la velocidad durante un tiempo, para después decelerar progresivamente hasta pararse. El perfil de velocidad con Matlab es el de la FIG 5.17. Los datos de velocidad se han extraído de [15].

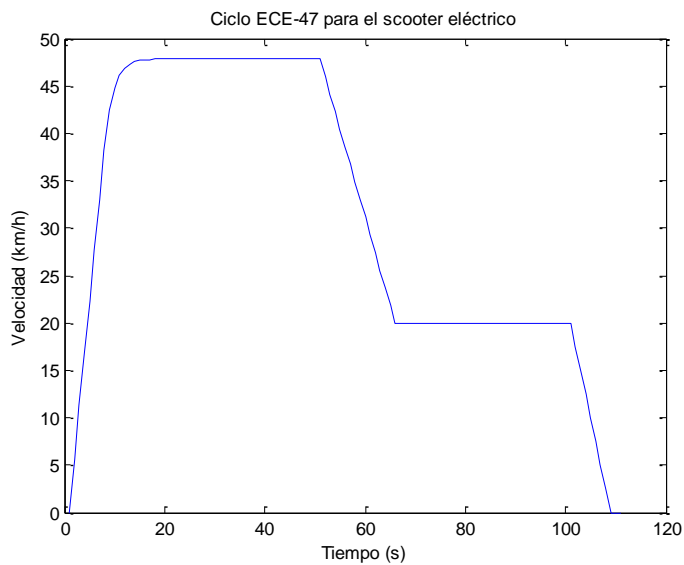


FIG 5.17 Ciclo de conducción ECE-47 obtenido de Scooter_Ece47.m. [elaboración propia]

Se recoge también una tabla comparativa de los ciclos de conducción simulados.

Parámetros característicos de los ciclos de conducción						
	SFUDS	HWFET	US06	ECE-15	EUDC	ECE-47
Duración (s)	360	765	600	195	365	110
Distancia recorrida por ciclo (km)	7,095	16,503	12,893	0,995	6,955	0,954
Velocidad media (km/h)	19,2	77,7	78	18,4	62,6	31,22
Velocidad máxima (km/h)	54	96	129	50	120	48

Tabla 5.1 Parámetros característicos de los ciclos de conducción. [15,27]

A continuación, se explicará el plan de funcionamiento seguido durante la simulación implementado en los programas Matlab que hacen funcionar las simulaciones tanto del GM EV1 como del Scoot'Elec, y que nos permiten obtener la autonomía del vehículo eléctrico en un ciclo de conducción modelando sus diferentes partes.

Para predecir la autonomía del vehículo eléctrico, es necesario conocer que flujos de potencias que se transmiten en el interior del vehículo eléctrico. En la FIG 5.18 se muestran estos flujos de potencia junto con los rendimientos asociados. Es decir, en cada componente habrá unas pérdidas de eficiencia consideradas que provocan que la potencia entregada a las ruedas sea algo inferior a la extraída de sus baterías. Lo que se hace es calcular la potencia requerida para mover el vehículo en cada segundo del ciclo de conducción teniendo en cuenta estas ineficiencias. Este proceso se repite hasta que la batería esta descargada.

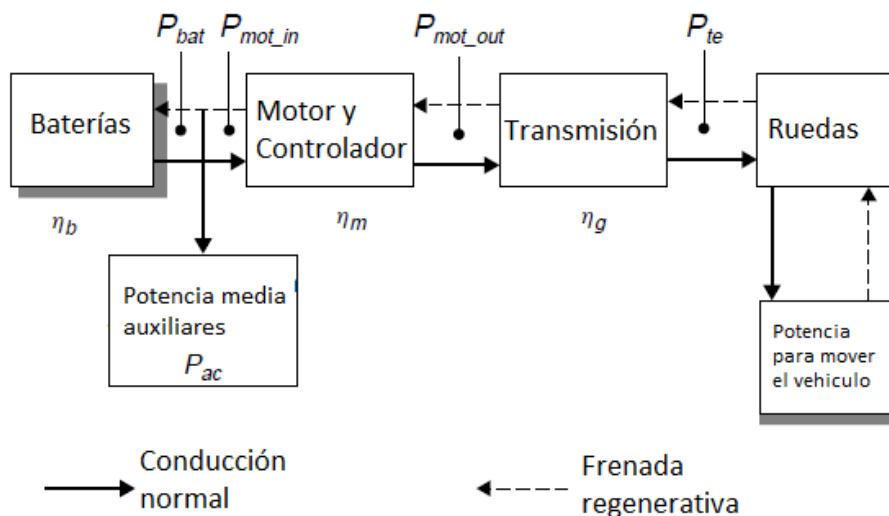


FIG 5.18 -Esquema del flujo de potencias en un vehículo eléctrico. [14]

En un vehículo eléctrico el flujo de potencias como se ve en la FIG 5.18 comienza en las baterías. La potencia de salida de las baterías es la potencia consumida en el vehículo eléctrico. Esta potencia llega al motor a través del convertidor electrónico de potencia. El motor transforma la potencia eléctrica en potencia mecánica en el eje. Termina en la fuerza de tracción que se transmite a la calzada a través de las ruedas.

Por lo tanto, partiendo del esfuerzo de tracción necesario para mover el vehículo de la ecuación 5.9 y calculando las diferentes eficiencias presentadas en la FIG 5.18 se calculará la potencia requerida para mover el vehículo como:

$$P_{te} = F_{te} \times v$$

Ecuación 5.15

Donde P_{te} es la potencia de tracción necesaria para mover el vehículo, F_{te} es el esfuerzo de tracción y v es la velocidad del vehículo.

Las eficiencias a considerar mostradas en la FIG 5.18 son las de la batería, el sistema de transmisión que se asume como constante y bastante alta ya que los vehículos eléctricos normalmente suelen tener una única marcha, y las del motor y controlador que se consideran ambas normalmente juntas para su cálculo. Esta última podría modelarse bastante bien de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\eta_m = \frac{T w}{T w + k_c T^2 + k_i w + k_w w^3 + C}$$

Ecuación 5.16

Donde η_m es el rendimiento combinado del motor y controlador, T es el par, w es la velocidad del motor, k_c es el coeficiente de pérdidas del cobre, k_i es el coeficiente de pérdidas del hierro, k_w es el coeficiente de pérdidas del devanado y C es un coeficiente de pérdidas constantes que se aplica en cada velocidad.

Teniendo en cuenta las ineficiencias se puede deducir que la potencia de tracción proporcionada a las ruedas es inferior a la suministrada por el motor a su salida.

$$P_{mot_out} = \frac{P_{te}}{\eta_g}$$

Ecuación 5.17

Donde P_{mot_out} es la potencia de salida del motor, P_{te} es la potencia de tracción a proporcionada a las ruedas y η_g es el rendimiento de la transmisión.

De la misma manera que esta potencia del motor en su salida será inferior a la potencia de alimentación al motor en su entrada.

$$P_{\text{mot_in}} = \frac{P_{\text{mot_out}}}{\eta_m}$$

Ecuación 5.18

Donde $P_{\text{mot_in}}$ es la potencia de alimentación de entrada al motor, $P_{\text{mot_out}}$ es la potencia de salida del motor y η_m es el rendimiento de motor y controlador.

Las ecuaciones 5.17 y 5.18 son válidas si el vehículo está funcionando en conducción normal. Sin embargo, si el motor está realizando un frenado regenerativo se verán modificadas de la siguiente manera:

$$P_{\text{mot_in}} = P_{\text{mot_out}} \times \eta_m$$

Ecuación 5.19

$$P_{\text{mot_out}} = P_{\text{te}} \times \eta_g$$

Ecuación 5.20

También se ha considerado los sistemas auxiliares del vehículo tales como las luces, los indicadores, accesorios, la radio o el sistema de calefacción. Se estima una potencia media para dichos sistemas y esta se añade a la potencia de alimentación al motor para dar la potencia total requerida de las baterías. En caso de frenado regenerativo la potencia del motor será negativa.

$$P_{\text{bat}} = P_{\text{mot_in}} + P_{\text{ac}}$$

Ecuación 5.21

Donde P_{bat} es la potencia suministrada por las baterías del vehículo, $P_{\text{mot_in}}$ es la potencia de alimentación de entrada del motor y P_{ac} es la potencia de los sistemas auxiliares del vehículo.

Una vez hemos realizado el cálculo de estas potencias el comportamiento de la batería se modelaría de la forma vista en el capítulo 3.1.5. Lo recogemos a continuación resumido para que quede más claro.

- Calculamos las tensiones de circuito abierto.
- Calculamos la corriente por la batería.
- Calculamos la capacidad.
- Actualizamos el nivel de descarga.

A condición de que la batería no está descargada, todo el proceso debe de ser repetido en el siguiente segundo de tiempo del ciclo de conducción con su correspondiente velocidad.

Hasta ahora hemos visto cómo se pueden utilizar las diversas ecuaciones que modelan el cálculo de lo que ocurre en el interior del vehículo. Para obtener la autonomía del mismo antes de que la batería se descargue por completo realizamos una simulación paso a paso a través del ciclo de conducción seleccionado con el programa de Matlab unciclo.m. La forma en que se realiza este proceso se presenta en el diagrama de flujo de la FIG 5.19.

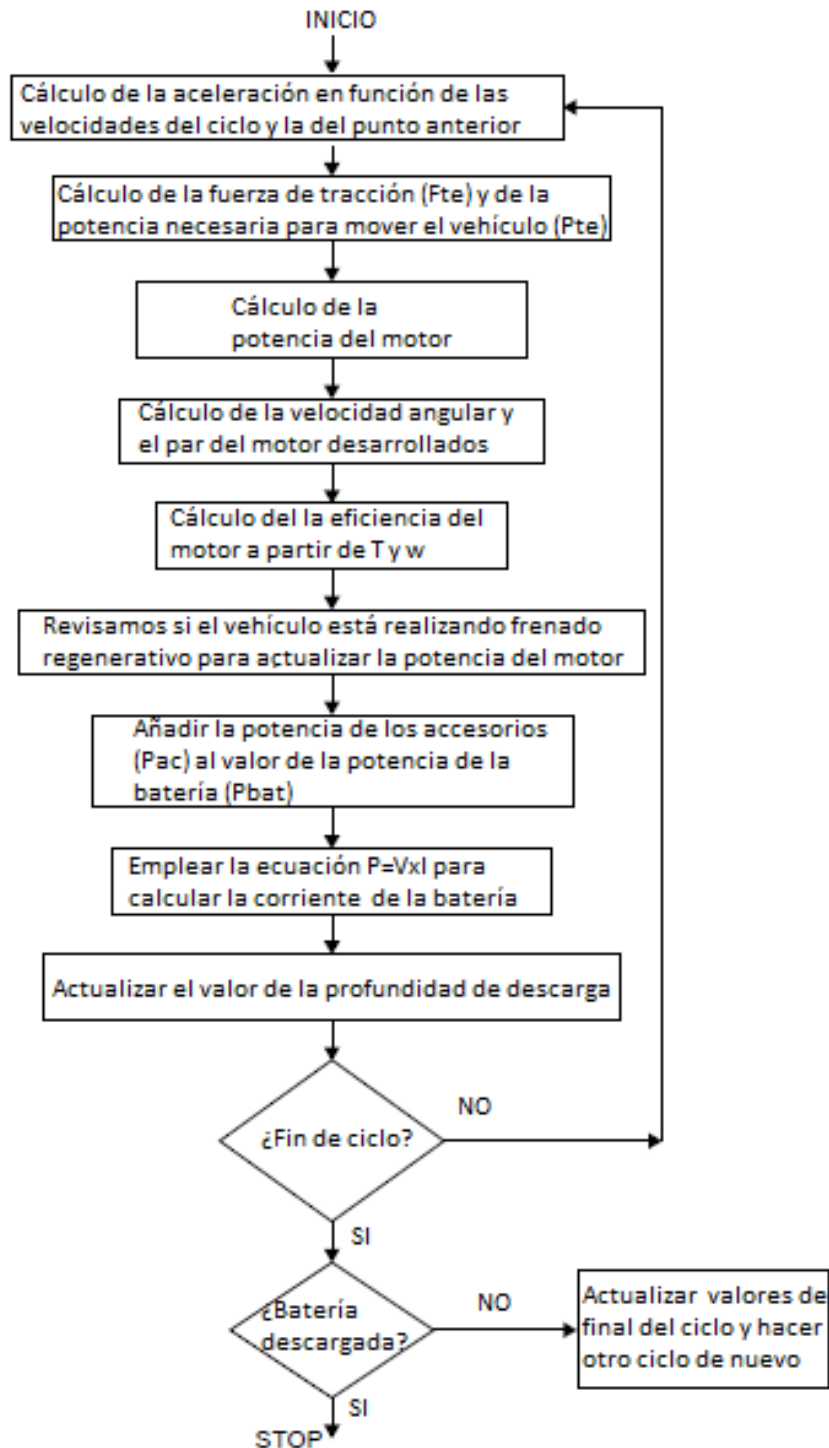


FIG 5.19 Diagrama de flujo para la simulación de la autonomía de un vehículo eléctrico. [15]

La primera etapa es cargar los datos de velocidad para el ciclo de conducción que se utilizará. Esto lo hemos realizado de forma separada en archivos de Matlab cada uno con el nombre del ciclo de conducción correspondiente, que contendrán estos datos de velocidad. Lo siguiente, sería configurar los parámetros del vehículo seleccionado vistos en el capítulo anterior. La potencia eléctrica de los accesorios debe fijarse también en este punto.

Una vez hecho esto, se deben crear unos vectores para almacenar los datos al final de cada ciclo. Estos datos serían la profundidad de descarga, la carga sustraída de la batería y la distancia recorrida. La siguiente etapa, es crear otros vectores que almacenen los datos de profundidad de descarga, carga sustraída y distancia recorrida para que se puedan actualizar conforme avanza la simulación en el ciclo.

Tras configurar todo este sistema, el vehículo seleccionado se somete a un ciclo de conducción a través de la ejecución de los archivos de Matlab pertinentes que están nombrados con el nombre del vehículo seguido del nombre del ciclo de conducción que se le aplica. Utilizando las velocidades de los ciclos de conducción cargadas en los archivos de Matlab con el nombre propio de los ciclos se calcularía la aceleración, y posteriormente el esfuerzo de tracción, la potencia del motor a su salida y su par junto con su velocidad angular. Así, luego podríamos calcular la eficiencia del motor que nos serviría para calcular la potencia eléctrica a la entrada del motor, y combinándola junto con la potencia de los accesorios o servicios auxiliares obtendríamos la corriente de la batería. A continuación, no habría más que recalculer el estado de carga de la batería y el proceso se repetiría en pasos segundo a segundo hasta el final del ciclo y hasta que se considere descargada la batería (esto se da cuando se supera el 90% en la profundidad de descarga). De esta manera podremos obtener la autonomía teórica del vehículo eléctrico funcionando en un ciclo de conducción.

Los resultados obtenidos a través de los programas realizados con Matlab que simulan la autonomía del vehículo eléctrico seleccionado funcionando en un ciclo de conducción determinado se presentan todos ellos a continuación. A través de los mismos, se puede obtener la autonomía del vehículo eléctrico funcionando en el ciclo de conducción seleccionado. Estos programas al ser ejecutados, además de representar el ciclo de conducción al que se somete, como hemos visto anteriormente, proporcionan también como resultado final una representación gráfica de la profundidad de descarga (DOD) frente a la distancia recorrida (en kilómetros), imprimiendo un aspa (+) por cada vuelta completa que se realiza en el ciclo (es decir por cada ciclo completado dentro del propio ciclo de conducción), siendo la última de todas ellas la que nos proporcionará el dato final de la autonomía de ese vehículo funcionando en ese ciclo de conducción.

Para el modelo Scoot'Elec scooter eléctrico de Peugeot bajo un ciclo de conducción ECE-47 simulado en el programa de Matlab Scooter_Ece47.m obtenemos la siguiente autonomía FIG 5.20.

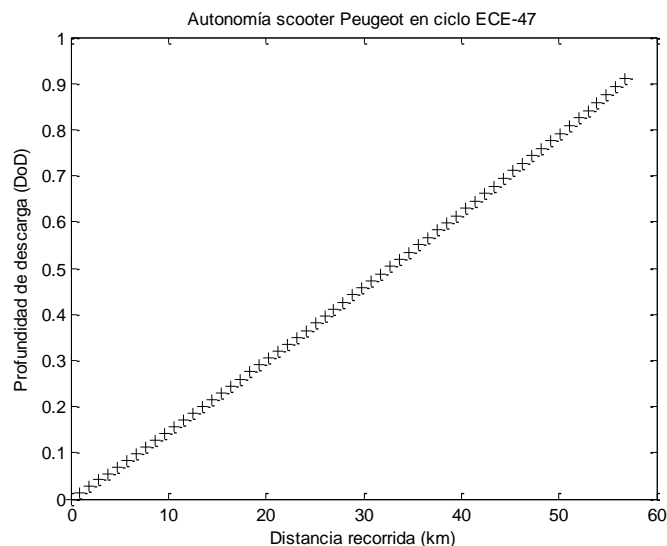


FIG 5.20 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Scooter_Ece47.m. [elaboración propia]

Al tratarse de un scooter eléctrico solo ha sido posible encontrar un ciclo de conducción que se adaptara bastante bien a las prestaciones de este tipo de vehículos. Con el ciclo de conducción europeo ECE-47 simulamos una conducción en ciudad del scooter eléctrico modelo Scoot'Elec. Inicialmente el scooter acelera constantemente al máximo desde parado y luego mantiene la velocidad (48 km/h) durante un tiempo para después decelerar progresivamente hasta pararse. Se ha obtenido una autonomía de unos 56 km. Esta autonomía será mayor en el coche eléctrico como veremos a continuación con el GM EV1, ya que estos vehículos dispondrán de un mayor espacio para situar una batería de mayor capacidad. Aun así, la autonomía cumple con las necesidades que esperamos de un scooter eléctrico para su uso en ciudad.

Pasamos ahora a ver los resultados del modelo GM EV1 obtenidos con Matlab. En este caso si ha sido posible encontrar varios ciclos de conducción que pudieran adaptarse a las prestaciones de este vehículo eléctrico.

La autonomía del GM EV1 en un ciclo de conducción SFUDS ha sido obtenida mediante el programa en Matlab Gmev1_sfuds.m y es la que se muestra en la FIG 5.21. El ciclo de conducción SFUDS simula la conducción en el ámbito urbano. Este ciclo fue desarrollado en Estados Unidos y en él la velocidad no sobrepasa los 54 km/h. La autonomía obtenida del GM EV1 funcionando bajo el ciclo de conducción SFUDS ha sido de 168 km.

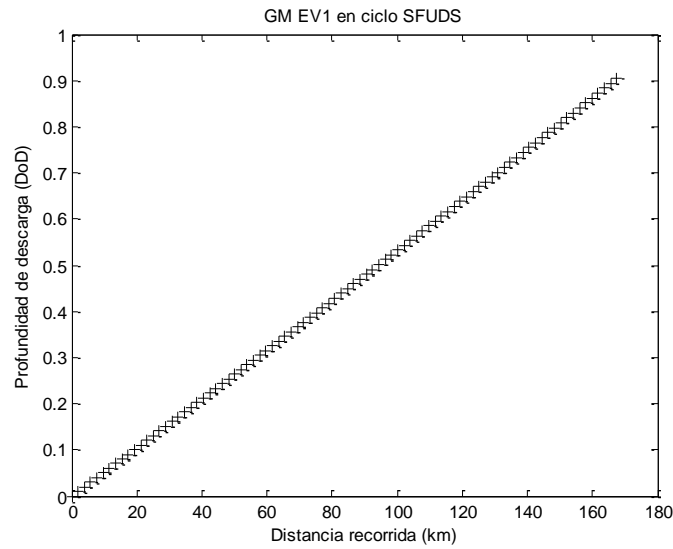


FIG 5.21 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_sfuds.m. [elaboración propia]

El ciclo de conducción HWFET simula una conducción extraurbana por carretera. En este ciclo, desarrollado también en Estados Unidos, la velocidad no sobrepasa los 96 km/h. Por lo tanto, la autonomía que obtendremos será menor que en el anterior caso con el ciclo de conducción SFUDS ya que este último está destinado al ámbito urbano y por lo tanto su autonomía será mayor al no exigir tanta carga al motor. El resultado de la autonomía obtenida del GM EV1 como se puede ver en la gráfica de la FIG 5.22 funcionando en ciclo de conducción HWFET ha sido de 132 km.

La autonomía del GM EV1 en un ciclo de conducción HWFET ha sido obtenida mediante el programa en Matlab Gmev1_HWFET.m y se muestra en la FIG 5.22.

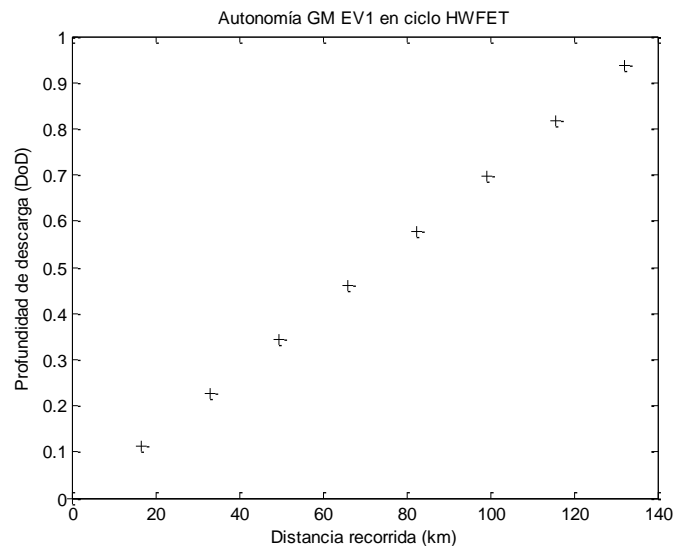


FIG 5.22 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_HWFET.m. [elaboración propia]

Si se aplica un ciclo de conducción muy agresivo como es el US06 con frecuentes paradas y aceleraciones hasta velocidad más altas y destinado a la simulación de la conducción por carretera la autonomía se ve drásticamente reducida. La autonomía del GM EV1 funcionando en el ciclo de conducción US06 es de 65 km. Ha sido obtenida mediante el programa en Matlab Gmev1_US06.m y su resultado gráfico se muestra en la FIG 5.23.

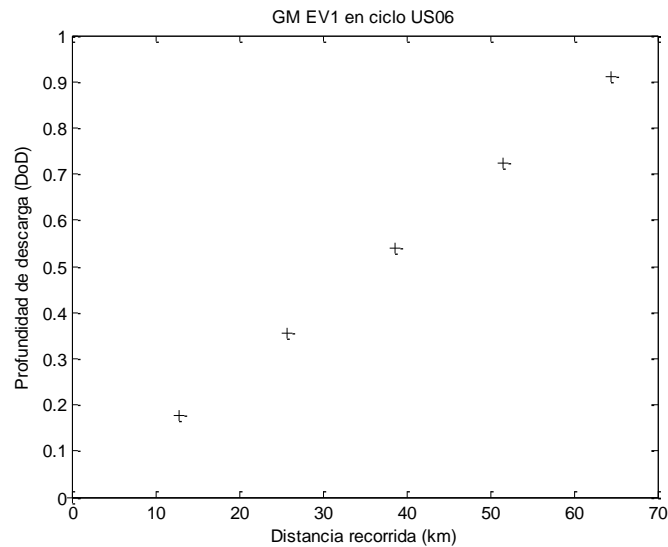


FIG 5.23 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_US06.m. [elaboración propia]

Con el ciclo de conducción europeo ECE-15 se simula una conducción urbana cuya velocidad no supera los 50 km/h. Se caracterizan por tener periodos de aceleración, deceleración y velocidad constantes. La autonomía del GM EV1 obtenida funcionando bajo el ciclo de conducción ECE-15 ha sido de 128 km como puede verse en la FIG 5.24 obtenida con el programa de Matlab Gmev1_ECE15.m.

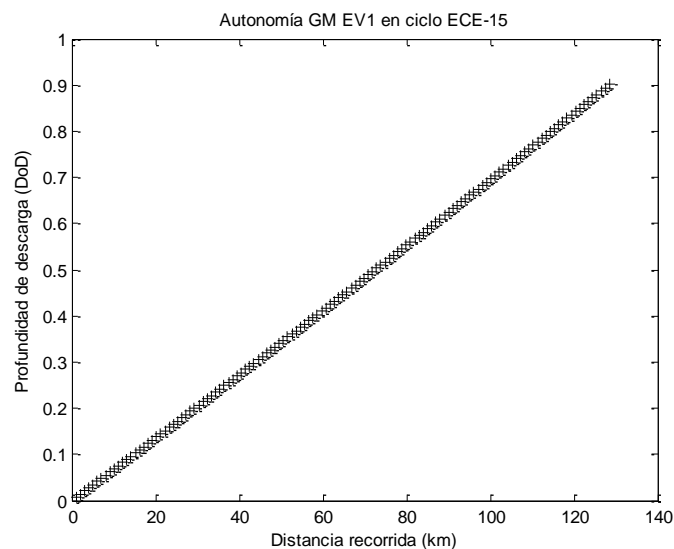


FIG 5.24 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_ECE15.m. [elaboración propia]

Por último, se ha simulado el ciclo de conducción europeo EUDC destinado a la conducción extraurbana hasta velocidades no superiores a los 120 km/h. Al igual que el anterior ciclo de conducción ECE-15 está caracterizado por tener periodos de aceleración, deceleración y velocidad constantes. Pero en este caso la autonomía que se obtiene es menor al ser un ciclo de conducción por carretera. El resultado de la autonomía del GM EV1 funcionando bajo el ciclo de conducción EUDC ha sido de 110 km. Su resultado se ha obtenido mediante el programa de Matlab Gmev1_EUDC.m y el gráfico que proporciona es el de la FIG 5.25.

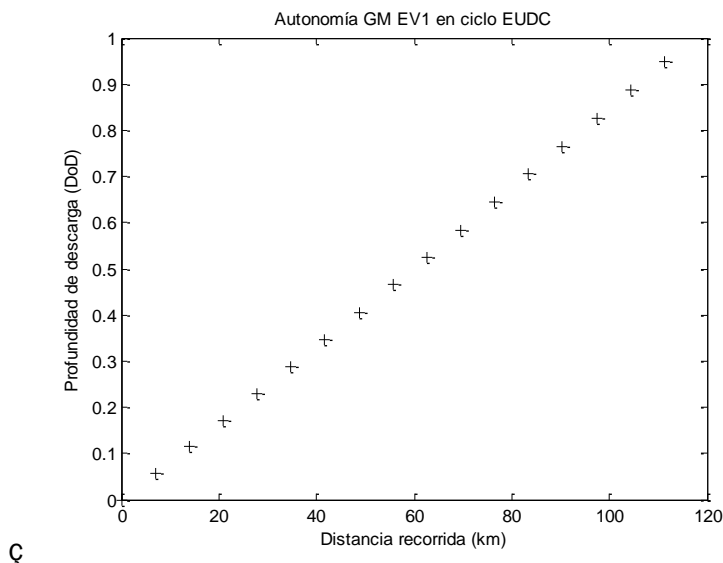


FIG 5.25 DoD frente a distancia recorrida obtenido con Gmev1_EUDC.m. [elaboración propia]

Para finalizar el capítulo, se recoge en una tabla de forma resumida los resultados de la autonomía de cada vehículo funcionando en los ciclos de conducción que hemos simulado.

Autonomía del vehículo eléctrico funcionando en ciclo de conducción						
	ECE-47	SFUDS	HWFET	US06	ECE-15	EUDC
Scoot'Elec	56 km	-	-	-	-	-
GM EV1	-	168 km	132 km	65 km	128 km	110 km

Tabla 5.2 Resultados autonomía del vehículo eléctrico para diferentes ciclos de conducción. [elaboración propia]

Cabe destacar por último que, si comparamos los ciclos de conducción europeos con los ciclos de conducción desarrollados en Estados Unidos, la autonomía en los primeros es algo inferior respecto a la de los últimos tomando ciclos de conducción destinados al mismo ámbito de circulación. Esto es debido a que la velocidad en los ciclos europeos se mantiene constante durante mayores periodos de tiempo, por lo que se exige mayor carga al motor y por tanto será mayor la energía sustraída de la batería durante la conducción. Sin embargo, en los ciclos de conducción desarrollados en Estados Unidos la velocidad es más cambiante y hay más

deceleraciones en las que se puede realizar frenado regenerativo y de esta manera recargar las baterías y obtener así una mayor autonomía.

6. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas de la realización del presente trabajo a partir de los objetivos marcados al inicio han sido las siguientes:

- Se ha desarrollado una base explicativa muy completa respecto a la tecnología de propulsión del vehículo eléctrico, que describe fielmente sus sistemas principales, cómo funcionan y que variantes y prestaciones ofrece cada una de las alternativas existentes en la actualidad. Esto se ha podido lograr a pesar de existir una bibliografía y documentación técnica de valor en castellano muy reducida al respecto.
- Se ha conseguido simular dos modelos de vehículo eléctrico reales, a pesar de la gran opacidad del sector del automóvil que impide obtener y difundir información respecto de sus modelos actuales. A través de estas simulaciones, hemos visto como la autonomía y prestaciones que ofrecen cubren por completo las necesidades de circulación en ciudad. Incluso estas son suficientes en desplazamientos extraurbanos de trayecto corto.
- Este trabajo proporciona una serie de razones para impulsar la tecnología del vehículo eléctrico como alternativa a los actuales vehículos con motores de combustión interna predominantes, solucionando en buena parte los problemas de la sostenibilidad y de la contaminación.
- Sin embargo, para alcanzar la madurez de esta tecnología se necesita de una investigación e innovación en determinados aspectos tecnológicos, como pueden ser las baterías, para que ofrezcan un mayor rango de autonomía que permitan realizar trayectos de mayor distancia, presentándose como un factor clave para el completo éxito del vehículo eléctrico.

7. Trabajos Futuros

Sin exhaustividad, algunas de las líneas de desarrollo que pueden llevarse a cabo a partir de este trabajo son las siguientes:

- Actualizar la tecnología explicada en este trabajo según vaya avanzado, ya que el sector del automóvil eléctrico se encuentra en constante evolución y en él aparecen constantemente continuas mejoras.
- Ejemplificar con otros datos incluidos en las simulaciones las prestaciones y características que ofrece este tipo de tecnología.
- Realizar un estudio más detallado de los ciclos de conducción empleados en las simulaciones, así como implementar otros ciclos de conducción que se pudieran adaptar al vehículo eléctrico.
- Simular otros vehículos eléctricos si se consiguen obtener los mismos datos utilizados para la simulación de los ejemplos durante el trabajo.

Bibliografía

- [1] Husain, I. (2011). *“Electric and hybrid vehicles. Design fundamentals”*. CRC Press.
- [2] Noticia edición digital del periódico ABC. (2016). Recuperado de: http://www.abc.es/motor/economia/abci-venta-coches-electricos-crecio-285-por-ciento-2015-201601051418_noticia.html
- [3] Sociedad de Técnicos de Automoción (STA). (2011). *“El vehículo eléctrico. Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio”*. Barcelona: Libbooks.
- [4] Alonso Ripoll, F.J. (Curso 2015/2016). Apuntes asignatura sistemas de transporte de tracción eléctrica. Grado en ingeniería eléctrica. Universidad de Valladolid.
- [5] López Martínez, J.M. (2013). *“La electrificación del vehículo como medida de eficiencia energética en el transporte por carretera”*. Revista Anales de mecánica y electricidad. Recuperado de: http://www.revista-anales.es/web/n_21/pdf/seccion_2.pdf
- [6] Laverón Simavilla, F., Muñoz Rodríguez, M. A., Sáenz de Miera Cárdenas, I. (2009). *“Análisis energético y económico del vehículo eléctrico”*. Club Español de la Energía (Enerclub). Cuaderno de energía nº 26. Recuperado de: http://www.enerclub.es/frontNotebookAction/Biblioteca_/Publicaciones_Enerclub/Cuadernos//Cuadernos_de_Energia_N_26
- [7] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2011). *“Guía para la introducción del vehículo eléctrico en entornos urbanos”*. Madrid: Movele. Recuperado de: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Guia_VE_FINAL_25_1_2011_407a1b84.pdf
- [8] Ente regional de energía de Castilla y León. (2011). *“Guía del vehículo eléctrico para Castilla y León. Aspectos básicos para el desarrollo e implantación del vehículo eléctrico”*. Junta de Castilla y León. Recuperado de: <https://www.aytopalencia.es/sites/default/files/pdf/guia-vehiculos-2013.pdf>
- [9] Red Eléctrica de España (REE). (2016). *“Informe del sistema eléctrico español 2015”*. Madrid: REE. Recuperado de: http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/inf_sis_elec_ree_2015.pdf
- [10] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2012). *“Mapa tecnológico. Movilidad eléctrica”*. Madrid: Observatorio Tecnológico de la Energía.

Recuperado de:
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_movilidad_electrica_acc_c603f868.pdf

[11] Artés, D. (2011). *“Vehículo eléctrico: ventajas, inconvenientes y perspectivas de futuro”*. Diariomotor. Recuperado de:
<http://www.diariomotor.com/tecmovia/2011/07/14/vehiculo-electrico-ventajas-inconvenientes-y-perspectivas-de-futuro/>

[12] Aficionados a la Mecánica (2014). *“Vehículos híbridos”*. Recuperado de:
<http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos.htm>

[13] Iberdrola. *“Vehículos eléctricos”*. Recuperado de:
<https://www.iberdrola.es/clientes/empresas/movilidad-verde/vehiculos#>

[14] López Martínez, J. M. (2015). *“Vehículos híbridos y eléctricos diseño del tren propulsor”*. Madrid: Dextra.

[15] Larminie, J., Lowry, J. (2003). *“Electric Vehicle Technology Explained”*. Jhon Wiley & Sons, Ltd.

[16] Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S., Emadi, A. (2005). *“Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles”*. CRC Press.

[17] https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible

[18] http://media.gm.com/media/us/en/chevrolet/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2011/Oct/1026_spark_elec_mtr.html

[19] Abad San Martín, V. (2015). *“Análisis y optimización de modelos de rotor de motor sincrónico para vehículos híbridos con la incorporación de nuevos materiales magnéticos”*. Tesis doctoral. Universidad de Burgos.

[20] Cobb, J. (2014). *“How An Electric Car Works”*. HybridCars. Recuperado de:
<http://www.hybridcars.com/how-an-electric-car-works/>

[21] Emadi, A. (2005). *“Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives”*. Taylor & Francis.

[22] Semikron. *“SKAI – Power Electronic Building Blocks”*. Recuperado de:
<https://www.semikron.com/innovation-technology/system-design.html>

[23] <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2013/03/14/ruedas-con-motores-electricos-integrados-que-pueden-aportar-al-vehiculo-electrico/>

[24] <http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/ev1-de-general-motors-creacion-y-destruccion-del-coche-electrico/20130207172245004762.html>

[25] <https://www.motorpasionfuturo.com/coches-hibridos/audi-a6-hybrid>

[26] <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/03/09/mercedes-nos-muestra-las-entranas-del-sls-amg-e-cell/>

[27] United States Environmental Protection Agency (EPA). “*Dynamometer Drive Schedules*”. Recuperado de: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>

Anejos

A continuación, se recogen todos los códigos de los programas y funciones de Matlab que han sido empleados para la realización del trabajo.

A1.1: `tension_circuito_abierto_PbA.m`

```
function E_oc=tension_circuito_abierto_PbA(x,N)

% La función encuentra la tensión en circuito abierto de una batería
% de plomo-ácido para cualquier valor de la profundidad de descarga.
% El valor de la profundidad de descarga debe de estar entre
% 0 (cargada) y 1 (descargada).
if x<0
    error('Profundidad de descarga <0.');
```

end

```
if x>1
    error('Profundidad de descarga >1')
```

end

```
E_oc = (2.15 - ((2.15-2.00)*x)) * N;
```

A1.2: `tension_circuito_abierto_NiCd.m`

```
function E_oc=tension_circuito_abierto_NiCd(x,N)

% La función encuentra la tensión en circuito abierto de una batería
% de NiCd para cualquier valor de la profundidad de descarga.
% El valor de la profundidad de descarga debe de estar entre
% 0 (cargada) y 1 (descargada).

if x<0
    error('Profundidad de descarga <0.');
```

end

```
if x>1
    error('Profundidad de descarga >1')
```

end

```
E_oc=(-8.2816*x^7+23.5749*x^6-30*x^5+23.7053*x^4-
12.5877*x^3+4.1315*x^2-.8658*x+1.37) * N;
```

A1.3: DescargaBatPbA.m

```

% Descarga de una batería de Plomo-Ácido.
% Formamos varios vectores para almacenar datos.
% El tiempo de la simulación irá de 0 hasta 10000 s.
T=(0:10:10000);
DoD=zeros(1,1001); % Profundidad de descarga, inicialmente con carga completa.
V=zeros(1,1001); % El voltaje de la batería será calculado en cada paso.
I=linspace(20,20,1001); % Representa la corriente de descarga.

%Establecemos las constantes.
NoCells=6; % 6 celdas.
Capacity=24; % Capacidad nominal.
k=1.11; % Coeficiente de Peukert.
deltaT = 10; % Tomamos pasos de 10 s, para generar una corriente de descarga
constante.

% Calculamos valores.
Rin= (0.15/Capacity)*0.001; % Resistencia interna.
PeuCap= ((Capacity/10)^k)*10; % Capacidad de Peukert.

% Iniciamos el voltaje fuera del bucle.
V(1)=tension_circuito_abierto_PbA(0,NoCells) - I(1)*Rin;

for n=2:1001

    I_cor= (I(n))^k; % Corrección de la corriente por Peukert.
    DoD(n)= ((PeuCap * DoD(n-1)) + ((I_cor * deltaT)/3600))/PeuCap;
    if DoD(n)>1
        DoD(n)=1;
    End

    V(n)=tension_circuito_abierto_PbA(DoD(n),NoCells) - I(n)*Rin;

    % Diremos que la batería esta 'muerta' si
    % la profundidad de descarga excede el 95%.
    if DoD(n)>0.95
        V(n)=0;
    end
end

plot(DoD,V,'r. ');
xlabel('Profundidad de descarga (DoD)');
ylabel('Voltaje de la batería (V)');
title('Descarga a corriente constante de una batería de Pb-Ácido');

```

A1.4: NiCd.m

% Descarga a corriente constante de una batería de NiCd de 5 celdas.
 % Con pasos de tiempo que se establecen en 50 s, suficientemente pequeños para simular la descarga a corriente constante.
 % Necesitamos formar algunos vectores para almacenar datos. El vector T es para el tiempo, que se ejecutará de 0 a 50000 segundos en pasos de 50 segundos.

```
T=(0:50:50000);
```

% Esto corresponde a 1001 valores. Formaremos cuatro vectores más
 % cada uno con 1001 elementos, y todos con valores iniciales de cero.
 % DoD(n) se utiliza para almacenar valores de la profundidad de descarga.
 % V(n) almacena valores de voltaje.
 % CR(n) y CS(n) almacenan valores de la carga en Ah, eliminados y
 % suministrados por la batería respectivamente.

```
CR=zeros(1,1001); % Carga removida usando el coeficiente de Peukert.
DoD=zeros(1,1001); % Grado de descarga, con la batería inicialmente cargada.
V=zeros(1,1001); % Tensión de la batería en cada paso de tiempo.
CS=zeros(1,1001); % Carga suministrada por la batería en Ah.
```

% Establecimiento de las constantes.

```
I=30; % Corriente de descarga.
NoCells=5; % 5 celdas.
Capacity=50; % Capacidad de la batería.
k=1.045; % Coeficiente de Peukert.
deltaT=50; % Tomamos pasos de 50 segundos.
```

% Calculo de valores.

```
Rin=(0.06/Capacity)*NoCells; % Resistencia interna.
PeuCap=((Capacity/3)^k)*3; % Capacidad de Peukert.
```

% Tensión de arranque establecida fuera del bucle.

```
V(1)=tension_circuito_abierto_NiCd(0,NoCells) - I*Rin;
```

```
for n=2:1001
    CR(n) = CR(n-1) + ((I^k*deltaT)/3600);
    DoD(n) = CR(n)/PeuCap;
    if DoD(n)>1
        DoD(n)=1;
    end
```

```
V(n)=tension_circuito_abierto_NiCd(DoD(n),NoCells) - I*Rin;
% Diremos que la batería está 'muerta' si la profundidad de descarga
```

```

% supera el 99%.
if DoD(n)>0.99
    V(n)=0;
end

%Ahora calcularemos los Ah reales dados por la batería, utilizando
%CS(n).

if V(n)>0
    CS(n)=CS(n-1) + ((I*deltaT)/3600);
else
    CS(n)=CS(n-1);
end
end

%Representación tensión de la batería frente Ah.

plot(CS,V,'b. ');
axis([0 55 3.5 7]);
xlabel('Carga suministrada (Ah)');
ylabel('Voltaje de la batería (V)');
title('Descarga a corriente constante de una batería de NiCad de 50Ah');

```

A1.5: PbAcido.m

```

% Descarga a potencia constante para una batería de plomo-ácido.
% El sistema tiene 10 baterías, de 12V cada una, 50Ah.
% Se utilizarán pasos de 10 s suficientemente pequeños para
% simular una descarga de energía constante.
% Se configuran unos vectores para guardar los datos.

T=(0:10:10000); % El tiempo va hasta 10000 s en pasos de 10 s.
                % Esto son 1001 valores.
CR=zeros(1,1001); % Recordatorio de la carga sustraída de la batería.
DoD=zeros(1,1001); % Profundidad de descarga, comienza completamente
cargada.
V=zeros(1,1001); % Voltaje de la batería inicialmente ajustado a cero.
NoCells=60; % 10 baterías con 6 celdas (12Volt).
Capacity=50; % Baterías de 50Ah, capacidad de 10h.
k=1.12; % Coeficiente de Peukert.
deltaT=10; % Tomamos pasos de 10 s.
P=5000; % Drenaremos la batería a 5kW.

%Calculamos los valores.

Rin=(0.022/Capacity)*NoCells; % Resistencia interna.
PeuCap=((Capacity/10)^k)*10; % Capacidad de Peukert.

```

%Tensión de arranque establecida fuera del bucle.

```
E=tension_circuito_abierto_PbA(0,NoCells);
I=(E-(E*E-(4*Rin*P))^0.5)/(2*Rin);
V(1)=E-I*Rin;
```

```
for n=2:1001
    E=tension_circuito_abierto_PbA(DoD(n-1),NoCells);
    I=(E-(E*E-(4*Rin*P))^0.5)/(2*Rin);
    CR(n)=CR(n-1)+((deltaT*I^k)/3600);
    DoD(n)=CR(n)/PcuCap;
    if DoD(n)>1
        DoD(n)=1;
    end
end
```

% Diremos que la batería está 'muerta' si la profundidad de descarga
% supera el 99%.

```
V(n)=tension_circuito_abierto_PbA(DoD(n),NoCells)-I*Rin;
if DoD(n)>0.99
    V(n)=0;
end
end
```

```
plot(T,V,'b. ');
ylabel('Voltaje de la batería (V)');
xlabel('Tiempo (s)');
title('Descarga a potencia constante de una batería de plomo-ácido');
axis([0 4000 100 140]);
```

A1.6: asincron.m

```
function asincron(accion)
if nargin<1,
    clear all
    accion = 'inicio';
end
if strcmp(accion,'inicio'),
    global fig u1h fh ph m1h r1h l1h rfeh xmuh rp2h xp2h rh ch
    fig = 1;
    figure(fig);
    clf
    set(fig,'Color',[.8 .8 .8])
    set(fig,'NumberTitle','off')
    set(fig,'Name','Régimen estacionario máquina de inducción');
    uicontrol(fig,'Style','frame','Units','normalized','Position',[.8 0.2 1]);
    uicontrol(fig,'Style','push','Units','normalized','Position',[.81 .01 .18 .05],...
```

```

    'String','Cerrar','CallBack','close(1)');
uicontrol(fig,'Style','push','Units','normalized','Position',[.81 .07 .18 .05],...
    'String','Datos','CallBack','asincron("info")');
uicontrol(fig,'Style','push','Units','normalized','Position',[.81 .13 .18 .05],...
    'String','Calcular','CallBack','asincron("calcular")');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .955 .18 .03], ...
    'String','Alimentación');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .91 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','T.ef.sim.(V)');
u1h=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .91 .05 .04], ...
    'Background','white','String','127');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .86 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','Frecuen.(Hz)');
fh=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .86 .05 .04], ...
    'Background','white','String','50');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .815 .18 .03], ...
    'String','Estator');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .77 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','P. polos');
ph=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .77 .05 .04], ...
    'Background','white','String','2');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .72 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','Fases');
m1h=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .72 .05 .04], ...
    'Background','white','String','3');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .67 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','Resist(Ohm)');
r1h=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .67 .05 .04], ...
    'Background','white','String','.35');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .62 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','Induct(mH)');
l1h=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .62 .05 .04], ...
    'Background','white','String','2.55');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .57 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','R.p.Fe(Ohm)');
rfeh=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .57 .05 .04], ...
    'Background','white','String','100');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .52 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','Ind.mag(mH)');
xmuh=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .52 .05 .04], ...
    'Background','white','String','44.6');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .475 .18 .03], ...
    'String','Rotor, reducido');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .43 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','Resist(Ohm)');
rp2h=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .43 .05 .04], ...
    'Background','white','String','.45');
uicontrol(fig,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .38 .13 .04], ...
    'Horiz','left','String','Induct(mH)');

```



```

xp2h=uicontrol(fig,'Style','edit','Units','normalized','Position',[.94 .38 .05 .04], ...
    'Background','white','String','3.8');
uicontrol(1,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .335 .18 .03], ...
    'String','Régimen');
rh=uicontrol(1,'Style','popup','Units','normalized','Position',[.81 .285 .19 .04], ...
    'Background','white','String','Global | Freno | Motor | Generador');
uicontrol(1,'Style','text','Units','normalized','Position',[.81 .24 .18 .03], ...
    'String','Característica');
ch=uicontrol(1,'Style','popup','Units','normalized','Position',[.81 .19 .19 .04], ...
    'Background','white','String','Par | Corriente | Cos fi | Potencias | Rendimiento');
return
elseif strcmp(accion,'calcular'),
global fig u1h fh ph m1h r1h l1h rfeh xmuh rp2h xp2h rh ch pfh
u1 = str2num(get(u1h,'String'));
f = str2num(get(fh,'String'));
p = str2num(get(ph,'String'));
m1 = str2num(get(m1h,'String'));
r1 = str2num(get(r1h,'String'));
l1 = str2num(get(l1h,'String'));
rfe = str2num(get(rfeh,'String'));
xmu = str2num(get(xmuh,'String'));
rp2 = str2num(get(rp2h,'String'));
xp2 = str2num(get(xp2h,'String'));
regimen = get(rh,'Value');
caracte = get(ch,'Value');
x1 = l1*1e-3*2*pi*f*j;
xp2 = xp2*1e-3*2*pi*f*j;
xmu = xmu*1e-3*2*pi*f*j;
omegas = 2*pi*f/p;
yfemu = 1/rfe+1/xmu;
if regimen==2
s = [ 1.0025:.005: 1.9975];
elseif regimen==3
s = [ .0025:.005: 0.9975];
s(1) = .00005;
elseif regimen==4
s = [-1.9975:.005:-.0025];
s(400) = -.0053;
else
s = [-1.9975:.005: 1.9975];
s(400) = -.0053;
s(401) = .00005;
end
zp2 = rp2./s+xp2;
z = r1+x1+1./(yfemu+1./zp2);
i1 = u1./z;
ip2 = i1./(1+zp2.*yfemu);
M1 = m1.*abs(ip2).^2.*rp2./s./omegas;
omega = omegas.*(1.-s);

```

```

Pmi = M1.*omega;
P1 = m1.*u1.*abs(i1).*cos(angle(i1));
if pfh,
    delete(pfh)
    pfh = 0;
end
figure(fig)
if caracte==2
    p=plot(s,abs(i1).*sign(s),'r-');
    set(p,'LineWidth',[4])
    title('Característica corriente-deslizamiento','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
    ylabel('Corriente (A.)','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
elseif caracte==3
    p=plot(s,cos(angle(i1)).*sign(s),'r-');
    set(p,'LineWidth',[4])
    title('Característica cos fi-deslizamiento','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
    ylabel('Cos fi','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
elseif caracte==4
    p=plot(s,Pmi.*sign(s)./1e3,'r-');
    set(p,'LineWidth',[4])
    hold on
    p=plot(s,P1.*sign(s)./1e3,'b-');
    set(p,'LineWidth',[4])
    hold off
    title('Potencias eléctrica (azul) y mecánica (rojo)','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
    ylabel('Potencia (Kw.)','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')

elseif caracte==5
    p=plot(s,100.*((Pmi./P1).^sign(s)),'r-');
    set(p,'LineWidth',[4])
    title('Característica rendimiento-deslizamiento','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
    ylabel('Rendimiento %','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
else
    p=plot(s,M1,'r-');
    set(p,'LineWidth',[4])
    title('Característica par-deslizamiento','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
    ylabel('Rojo: Par (Nm.)','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
end
pfh = gca;
set(gca,'Position',[.13 .11 .625 .815])
set(gca,'XDir','reverse')
set(gca,'Color',[1 1 1])
set(gca,'XColor',[0 0 0])
set(gca,'yColor',[0 0 0])
grid
xlabel('Deslizamiento','Color',[0 0 0],'FontWeight','bold')
return
end

```

A1.7: unciclo.m

% Este programa realiza la simulación del funcionamiento para cualquier ciclo
% de conducción de un vehículo eléctrico con baterías de plomo-ácido o NiCd.

```

for C=2:N
    accel=V(C)-V(C-1);          % Aceleración.
    Fad=0.5*1.25*area*Cd*V(C)^2; % Fuerza aerodinámica a nivel del mar.
    Fhc=0;                      % Simulación en llano sin pendiente.
    Fla=1.05*mass*accel;       % La masa se incrementa al no tener
                                % en cuenta el momento de inercia.

    Pte=(Frr+Fad+Fhc+Fla)*V(C); % Potencia de tracción.
    omega=Gratio*V(C);
    if omega==0                % Vehículo parado.
        Pte=0;                 % No se entrega potencia a las ruedas.
        Pmot_in=0;             % El motor no demanda potencia.
        Torque=0;
        eff_mot=0.5;
    elseif omega>0             % Vehículo en movimiento.
        if Pte<0               % Cálculo de la potencia entregada
            Pte=Regen_ratio*Pte; % a las ruedas.
        end;

        % Evaluamos la potencia de salida del motor
        % la cual es distinta a la entregada a las ruedas
        % debido a las pérdidas en la transmisión.

        if Pte>=0
            Pmot_out=Pte/G_eff; % Potencia de salida del motor > potencia del eje.
        elseif Pte<0
            Pmot_out=Pte*G_eff; % Potencia de salida del motor en frenada
            regenerativa.
        end;
        Torque=Pmot_out/omega;
        if Torque>0

            eff_mot=(Torque*omega)/((Torque*omega)+((Torque^2)*kc)+(omega*ki)+((omega
            ^3)*kw)+ConL);
            elseif Torque<0
                eff_mot=(-Torque*omega)/((-
                Torque*omega)+((Torque^2)*kc)+(omega*ki)+((omega^3)*kw)+ConL);
            end;
            if Pmot_out>=0
                Pmot_in=Pmot_out/eff_mot; % Potencia de entrada al motor < potencia salida
                del motor.

            elseif Pmot_out<0

```

```
Pmot_in=Pmot_out*eff_mot; % Potencia de entrada al motor en frenada regenerativa.
```

```
end;
end;
Pbat=Pmot_in+Pac; % Potencia de la batería
if bat_type=='NC'
    E=tension_circuito_abierto_NiCd(DoD(C-1),NoCells);
elseif bat_type=='PA'
    E=tension_circuito_abierto_PbA(DoD(C-1),NoCells);
else
    error('tipo de batería inválido');
end;
if Pbat>0
    I=(E-((E*E)-(4*Rin*Pbat))^0.5)/(2*Rin);
    CR(C)=CR(C-1)+((I^k)/3600);
elseif Pbat==0
    I=0;
elseif Pbat<0
```

```
% En el frenado regenerativo se dobla la resistencia interna.
```

```
Pbat=-1*Pbat;
I=(-E+(E*E+(4*2*Rin*Pbat))^0.5)/(2*2*Rin);
CR(C)=CR(C-1)-(I/3600);
end;
DoD(C)=CR(C)/PeuCap;
if DoD(C)>1
    DoD(C)=1;
end
```

```
D(C)=D(C-1)+(V(C)/1000);
```

```
end;
```

```
% Llamaremos a este programa cuando queramos correr un ciclo de conducción.
```

A1.8: ScootA.m

```
% ScootA - Aceleración del scooter eléctrico Scoot'Elect de Peugeot.
```

```
t=linspace(0,50,501); % tiempo de 0 a 50 s, en pasos de 0,1 s.
vel=zeros(1,501); % 501 lecturas de velocidad.
d=zeros(1,501); % Vector para almacenar la distancia recorrida.
dT=0.1; % Pasos de tiempo de 0,1 s.
```

```
for n=1:500
```

```
    % Resolución numérica.
```

```
    if vel(n)<10.8 % Par constante hasta este punto.
```

```

    vel(n+1)=vel(n)+dT*(1.57-(0.00145*(vel(n)^2)));
elseif vel(n)>=10.8      % Par variable linealmente.
    vel(n+1)=vel(n)+dT*(7.30-(0.53*vel(n))-(0.00145*(vel(n)^2)));
end;
d(n+1)=d(n)+0.1*vel(n); % Cálculo de la distancia recorrida.
end;

vel=vel.*3.6;
figure
plot(t,vel);
axis([0 30 0 50]);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Velocidad (km/h)');
title('Aceleración del scooter eléctrico');

figure
plot(t,d);
axis([0 15 0 100]);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Distancia recorrida (m)');
title('Aceleración del scooter eléctrico');

```

A1.9: GmEv1.m

% Simulación de la aceleración del vehículo eléctrico GM EV1.

```

t=linspace(0,50,501); % tiempo de 0 a 50 s, en pasos de 0,1 s.
v=zeros(1,501);      % 501 lecturas de velocidad.
d=zeros(1,501);      % Vector para almacenar la distancia recorrida.
dT=0.1;              % Pasos de tiempo de 0,1 s.

```

% Resolución numérica.

```

for n=1:500
    if v(n)<19.8
        % Par por debajo de la velocidad base del vehículo.
        v(n+1)=v(n)+dT*(3.11+(0.000137*(v(n)^2)));
    elseif v(n)>35.8
        % Restricción de la velocidad por el controlador del vehículo, si se
        % excede la velocidad máxima fijada.
        v(n+1)=v(n);
    else
        % Par por encima de la velocidad base del vehículo.
        v(n+1)=v(n)+dT*((62.1/v(n))-0.046-(0.000137*(v(n)^2)));
    end;
    d(n+1)=d(n)+0.1*v(n); % Cálculo de la distancia recorrida.
end;

```

```

v=v.*3.6;
figure
plot(t,v);
axis ([0 20 0 150]);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Velocidad (km/h)');
title('Aceleración del vehículo eléctrico GM EV1');

figure
plot(t,d);
axis([0 20 0 500]);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Distancia recorrida (m)');
title('Aceleración del vehículo eléctrico GM EV1');

```

A1.10: Gmev1_sfuds.m

```

% Simulación del GM EV 1 ejecutando el ciclo de conducción SFUDS.
% Este programa imprime la autonomía del vehículo.
% La simulación llega hasta que la profundidad de descarga supera el 90%.

```

```

sfuds;                % Obtenemos los valores de la velocidad
                    % del ciclo almacenados en el vector V.
N=length(V);         % Encuentra el número de puntos del vector V.
V=V./1.60934;
V=V./3.6;

% Introducimos los datos del vehículo.

mass=1540;           % Masa del vehículo más dos pasajeros.
area=1.8;            % Área frontal del vehículo.
Cd=0.19;            % Coeficiente aerodinámico.
Gratio=37;          % Relación de transmisión expresada en G/r.
G_eff=0.95;         % Rendimiento de la transmisión.
Regen_ratio=0.5;    % Proporción del frenado que se realiza
                    % regenerativamente usando el motor.
bat_type='PA';      % Batería tipo plomo-ácido
NoCells=156;        % 26 baterías de 6 celdas (12V).
Capacity=60;        % Baterías de 60 Ah.
k=1.12;             % Coeficiente de Peukert.
Pac=250;            % Potencia media auxiliares.

% Constantes para la eficiencia del motor.

kc=0.3;
ki=0.01;
kw=0.000005;

```

```
ConL=600;
```

```
% Cálculo de constantes.
```

```
Frr=0.0048*mass*9.8;
Rin=(0.022/Capacity)*NoCells;
Rin=Rin+0.05;
PeuCap=((Capacity/10)^k)*10;
```

```
% Configuramos vectores para almacenar los datos de la batería y la
% distancia recorrida al final de cada ciclo. Todos son inicializados a cero
% y disponen de 100 posiciones.
```

```
DoD_end=zeros(1,100);
CR_end=zeros(1,100);
D_end=zeros(1,100);
```

```
% Inicialización de los vectores para incluirlos en los bucles de la simulación.
```

```
DoD=zeros(1,N);           % Profundidad de descarga.
CR=zeros(1,N);           % Carga sustraída de la batería.
D=zeros(1,N);            % Distancia recorrida.
```

```
CY=1;                    % CY controla el bucle exterior y cuenta el número de ciclos
completados.
```

```
% Queremos mantener el ciclo hasta que la batería este descargada.
% Esto se define como más del 90% de descarga. Es decir, DoD final > 0,9.
% También utilizamos la variable DD para supervisar la descarga, y para
% detener el bucle.
```

```
DD=0;                   % Inicializado a cero.
while DD<0.9
```

```
% Comenzamos un ciclo.
```

```
% Llamamos a unciclo.m que contiene la simulación del funcionamiento del vehículo.
unciclo;
```

```
% Ciclo completado.
```

```
% Actualizamos los valores al final del ciclo.
```

```
DoD_end(CY)=DoD(N);
CR_end(CY)=CR(N);
D_end(CY)=D(N);
```

```
% Restablecemos los valores de los vectores internos para el siguiente
% ciclo. Deben comenzar donde lo dejaron.
```

```
DoD(1)=DoD(N);
CR(1)=CR(N);
```

```
D(1)=D(N);
DD=DoD_end(CY);
```

```
% Final de ciclo.
```

```
CY=CY+1;
end;
```

```
% Gráfica de la autonomía.
```

```
figure
plot(D_end,DoD_end,'k+');
title('GM EV1 en ciclo SFUDS');
ylabel('Profundidad de descarga (DoD)');
xlabel('Distancia recorrida (km)');
```

```
% Gráfica del perfil de velocidad del ciclo de conducción.
```

```
figure
V=V.*3.6;
plot(V);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Velocidad (km/h)');
title('Ciclo SFUDS');
```

A1.11: Gmev1_HWFET.m

```
% Simulación del GM EV 1 ejecutando el ciclo de conducción HWFET.
% Este programa imprime la autonomía del vehículo.
% La simulación llega hasta que la profundidad de descarga supera el 90%.
```

```
HWFET; % Obtenemos los valores de la velocidad
% del ciclo almacenados en el vector V.
N=length(V); % Encuentra el número de puntos del vector V.
V=V./3.6;
```

```
% Introducimos los datos del vehículo.
```

```
mass=1540; % Masa del vehículo más dos pasajeros.
area=1.8; % Área frontal del vehículo.
Cd=0.19; % Coeficiente aerodinámico.
Gratio=37; % Relación de transmisión expresada en G/r.
G_eff=0.95; % Rendimiento de la transmisión.
Regen_ratio=0.5; % Proporción del frenado que se realiza
% regenerativamente usando el motor.
bat_type='PA'; % Batería tipo plomo-ácido
NoCells=156; % 26 baterías de 6 celdas (12V).
Capacity=60; % Baterías de 60 Ah.
k=1.12; % Coeficiente de Peukert.
```


Pac=250; % Potencia media auxiliares.

% Constantes para la eficiencia del motor.

kc=0.3;
ki=0.01;
kw=0.000005;
ConL=600;

% Cálculo de constantes.

Frr=0.0048*mass*9.8;
Rin=(0.022/Capacity)*NoCells;
Rin=Rin+0.05;
PeuCap=((Capacity/10)^k)*10;

% Configuramos vectores para almacenar los datos de la batería y la
% distancia recorrida al final de cada ciclo. Todos son inicializados a cero
% y disponen de 100 posiciones.

DoD_end=zeros(1,100);
CR_end=zeros(1,100);
D_end=zeros(1,100);

% Inicialización de los vectores para incluirlos en los bucles de la simulación.

DoD=zeros(1,N); % Profundidad de descarga.
CR=zeros(1,N); % Carga sustraída de la batería.
D=zeros(1,N); % Distancia recorrida.
CY=1; % CY controla el bucle exterior y cuenta el número de ciclos
completados.

% Queremos mantener el ciclo hasta que la batería este descargada.
% Esto se define como más del 90% de descarga. Es decir, DoD final > 0,9.
% También utilizamos la variable DD para supervisar la descarga, y para
% detener el bucle.

DD=0; % Inicializado a cero.

while DD<0.9

% Comenzamos un ciclo.

% Llamamos a unciclo.m que contiene la simulación del funcionamiento del vehículo.
 unciclo;

% Ciclo completado.

% Actualizamos los valores al final del ciclo.

DoD_end (CY)=DoD(N);
CR_end(CY)=CR(N);

```

D_end(CY)=D(N);

% Restablecemos los valores de los vectores internos para el siguiente
% ciclo. Deben comenzar donde lo dejaron.

DoD(1)=DoD(N);
CR(1)=CR(N);
D(1)=D(N);
DD=DoD_end(CY);

% Final de ciclo.

CY=CY+1;
end;

% Gráfica de la autonomía.
figure
plot(D_end,DoD_end,'k+');
title ('Autonomía GM EV1 en ciclo HWFET');
ylabel('Profundidad de descarga (DoD)');
xlabel('Distancia recorrida (km)');

% Gráfica del perfil de velocidad del ciclo de conducción.
figure
V=V.*3.6;
plot(V);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Velocidad (km/h)');
title('Ciclo HWFET');

```

A1.12: Gmev1_US06.m

```

% Simulación del GM EV 1 ejecutando el ciclo de conducción US06.
% Este programa imprime la autonomía del vehículo.
% La simulación llega hasta que la profundidad de descarga supera el 90%.

US06;                % Obtenemos los valores de la velocidad
                    % del ciclo almacenados en el vector V.

N=length(V);        % Encuentra el número de puntos del vector V.
V=V./3.6;

% Introducimos los datos del vehículo.

mass=1540;          % Masa del vehículo más dos pasajeros.
area=1.8;           % Área frontal del vehículo.
Cd=0.19;            % Coeficiente aerodinámico.

```

```

Gratio=37;           % Relación de transmisión expresada en G/r.
G_eff=0.95;         % Rendimiento de la transmisión.
Regen_ratio=0.5;   % Proporción del frenado que se realiza
                   % regenerativamente usando el motor.
bat_type='PA';     % Batería tipo plomo-ácido
NoCells=156;       % 26 baterías de 6 celdas (12V).
Capacity=60;       % Baterías de 60 Ah.
k=1.12;            % Coeficiente de Peukert.
Pac=250;           % Potencia media auxiliares.

% Constantes para la eficiencia del motor.

kc=0.3;
ki=0.01;
kw=0.000005;
ConL=600;

% Cálculo de constantes.

Frr=0.0048*mass*9.8;
Rin=(0.022/Capacity)*NoCells;
Rin=Rin+0.05;
PeuCap=((Capacity/10)^k)*10;

% Configuramos vectores para almacenar los datos de la batería y la
% distancia recorrida al final de cada ciclo. Todos son inicializados a cero
% y disponen de 100 posiciones.

DoD_end=zeros(1,100);
CR_end=zeros(1,100);
D_end=zeros(1,100);

% Inicialización de los vectores para incluirlos en los bucles de la simulación.

DoD=zeros(1,N);    % Profundidad de descarga.
CR=zeros(1,N);     % Carga sustraída de la batería.
D=zeros(1,N);      % Distancia recorrida.
CY=1;              % CY controla el bucle exterior y cuenta el número de ciclos
completados.

% Queremos mantener el ciclo hasta que la batería este descargada.
% Esto se define como más del 90% de descarga. Es decir, DoD final > 0,9.
% También utilizamos la variable DD para supervisar la descarga, y para
% detener el bucle.
DD=0;              % Inicializado a cero.
while DD<0.9

% Comenzamos un ciclo.

```

```
% Llamamos a unciclo.m que contiene la simulación del funcionamiento del
vehículo.
```

```
unciclo;
```

```
% Ciclo completado.
```

```
% Actualizamos los valores al final del ciclo.
```

```
DoD_end(CY)=DoD(N);
```

```
CR_end(CY)=CR(N);
```

```
D_end(CY)=D(N);
```

```
% Restablecemos los valores de los vectores internos para el siguiente
```

```
% ciclo. Deben comenzar donde lo dejaron.
```

```
DoD(1)=DoD(N);
```

```
CR(1)=CR(N);
```

```
D(1)=D(N);
```

```
DD=DoD_end(CY);
```

```
% Final ciclo.
```

```
CY=CY+1;
```

```
end;
```

```
% Gráfica de la autonomía.
```

```
figure
```

```
plot(D_end,DoD_end,'k+');
```

```
title('GM EV1 en ciclo US06');
```

```
ylabel('Profundidad de descarga (DoD)');
```

```
xlabel('Distancia recorrida (km)');
```

```
% Gráfica del perfil de velocidad del ciclo de conducción.
```

```
figure
```

```
V=V.*3.6;
```

```
plot(V);
```

```
xlabel('Tiempo (s)');
```

```
ylabel('Velocidad (km/h)');
```

```
title('Ciclo US06');
```

A1.13: Gmev1_ECE15.m

```
% Simulación del GM EV 1 ejecutando el ciclo de conducción ECE-15.
```

```
% Este programa imprime la autonomía del vehículo.
```

```
% La simulación llega hasta que la profundidad de descarga supera el 90%.
```

```
ECE_15;
```

```
% Obtenemos los valores de la velocidad
% del ciclo almacenados en el vector V.
```

```

N=length(V);           % Encuentra el número de puntos del vector V.
V=V./3.6;

% Introducimos los datos del vehículo.

mass=1540;             % Masa del vehículo más dos pasajeros.
area=1.8;              % Área frontal del vehículo.
Cd=0.19;               % Coeficiente aerodinámico.
Gratio=37;            % Relación de transmisión expresada en G/r.
G_eff=0.95;           % Rendimiento de la transmisión.
Regen_ratio=0.5;      % Proporción del frenado que se realiza
                        % regenerativamente usando el motor.
bat_type='PA';         % Batería tipo plomo-ácido
NoCells=156;          % 26 baterías de 6 celdas (12V).
Capacity=60;          % Baterías de 60 Ah.
k=1.12;                % Coeficiente de Peukert.
Pac=250;              % Potencia media auxiliares.

% Constantes para la eficiencia del motor.

kc=0.3;
ki=0.01;
kw=0.000005;
ConL=600;

% Cálculo de constantes.

Frr=0.0048*mass*9.8;
Rin=(0.022/Capacity)*NoCells;
Rin=Rin+0.05;
PeuCap=((Capacity/10)^k)*10;

% Configuramos vectores para almacenar los datos de la batería y la
% distancia recorrida al final de cada ciclo. Todos son inicializados a cero
% y disponen de 100 posiciones.

DoD_end=zeros(1,100);
CR_end=zeros(1,100);
D_end=zeros(1,100);

% Inicialización de los vectores para incluirlos en los bucles de la simulación.

DoD=zeros(1,N);       % Profundidad de descarga.
CR=zeros(1,N);        % Carga sustraída de la batería.
D=zeros(1,N);         % Distancia recorrida.
CY=1;                 % CY controla el bucle exterior y cuenta el número de ciclos
                        % completados.

% Queremos mantener el ciclo hasta que la batería este descargada.

```

```

% Esto se define como más del 90% de descarga. Es decir, DoD final > 0,9.
% También utilizamos la variable DD para supervisar la descarga, y para
% detener el bucle.
DD=0;           % Inicializado a cero.
while DD<0.9

% Comenzamos un ciclo.
% Llamamos a unciclo.m que contiene la simulación del funcionamiento del vehículo.
    unciclo;

% Ciclo completado.
% Actualizamos los valores al final del ciclo.

    DoD_end(CY)=DoD(N);
    CR_end(CY)=CR(N);
    D_end(CY)=D(N);

% Restablecemos los valores de los vectores internos para el siguiente
% ciclo. Deben comenzar donde lo dejaron.

    DoD(1)=DoD(N);
    CR(1)=CR(N);
    D(1)=D(N);
    DD=DoD_end(CY);

% Final de ciclo.

    CY=CY+1;
end;

% Gráfica de la autonomía.
figure
plot(D_end,DoD_end,'k+');
title ('Autonomía GM EV1 en ciclo ECE-15');
ylabel('Profundidad de descarga (DoD)');
xlabel('Distancia recorrida (km)');

% Gráfica del perfil de velocidad del ciclo de conducción.
V=V.*3.6;
figure
plot(V);
axis([0 200 0 60]);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Velocidad (km/h)');
title('Ciclo ECE-15');

```

A1.14: Gmev1_EUDC.m

% Simulación del GM EV 1 ejecutando el ciclo de conducción EUDC.
 % Este programa imprime la autonomía del vehículo.
 % La simulación llega hasta que la profundidad de descarga supera el 90%.

```
EUDC;                % Obtenemos los valores de la velocidad
                    % del ciclo almacenados en el vector V.
N=length(V);        % Encuentra el número de puntos del vector V.
V=V./3.6;
```

% Introducimos los datos del vehículo.

```
mass=1540;          % Masa del vehículo más dos pasajeros.
area=1.8;           % Área frontal del vehículo.
Cd=0.19;           % Coeficiente aerodinámico.
Gratio=37;         % Relación de transmisión expresada en G/r.
G_eff=0.95;        % Rendimiento de la transmisión.
Regen_ratio=0.5;   % Proporción del frenado que se realiza
                    % regenerativamente usando el motor.
bat_type='PA';     % Batería tipo plomo-ácido
NoCells=156;       % 26 baterías de 6 celdas (12V).
Capacity=60;       % Baterías de 60 Ah.
k=1.12;            % Coeficiente de Peukert.
Pac=250;           % Potencia media auxiliares.
```

% Constantes para la eficiencia del motor.

```
kc=0.3;
ki=0.01;
kw=0.000005;
ConL=600;
```

% Cálculo de constantes.

```
Frr=0.0048*mass*9.8;
Rin=(0.022/Capacity)*NoCells;
Rin=Rin+0.05;
PeuCap=((Capacity/10)^k)*10;
```

% Configuramos vectores para almacenar los datos de la batería y la
 % distancia recorrida al final de cada ciclo. Todos son inicializados a cero
 % y disponen de 100 posiciones.

```
DoD_end=zeros(1,100);
CR_end=zeros(1,100);
D_end=zeros(1,100);
```

```

% Inicialización de los vectores para incluirlos en los bucles de la simulación.

DoD=zeros(1,N);           % Profundidad de descarga.
CR=zeros(1,N);           % Carga sustraída de la batería.
D=zeros(1,N);           % Distancia recorrida.
CY=1;                   % CY controla el bucle exterior y cuenta el número de ciclos
                        % completados.

% Queremos mantener el ciclo hasta que la batería este descargada.
% Esto se define como más del 90% de descarga. Es decir, DoD final > 0,9.
% También utilizamos la variable DD para supervisar la descarga, y para
% detener el bucle.

DD=0;                   % Inicializado a cero.
while DD<0.9

% Comenzamos un ciclo.
% Llamamos a unciclo.m que contiene la simulación del funcionamiento del vehículo.

    unciclo;

% Ciclo completado.
% Actualizamos los valores al final del ciclo.

    DoD_end(CY)=DoD(N);
    CR_end(CY)=CR(N);
    D_end(CY)=D(N);

% Restablecemos los valores de los vectores internos para el siguiente
% ciclo. Deben comenzar donde lo dejaron.

    DoD(1)=DoD(N);
    CR(1)=CR(N);
    D(1)=D(N);
    DD=DoD_end(CY);

% Final de ciclo.

    CY=CY+1;
end;

% Gráfica de la autonomía.
figure
plot(D_end,DoD_end,'k+');
title ('Autonomía GM EV1 en ciclo EUDC');
ylabel('Profundidad de descarga (DoD)');
xlabel('Distancia recorrida (km)');

```


% Gráfica del perfil de velocidad del ciclo de conducción.

```
figure
V=V.*3.6;
plot(V);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Velocidad (km/h)');
title('Ciclo EUDC');
```

A1.15: Scooter_Ece47.m

% Simulación del Scoot'Elect ejecutando el ciclo de conducción ECE-47.

% Este programa imprime la autonomía del vehículo.

% La simulación llega hasta que la profundidad de descarga supera el 90%.

```
Ece47;           % Obtenemos los valores de la velocidad
                 % del ciclo almacenados en el vector V.
N=length(V);    % Encuentra el número de puntos del vector V.
```

% Introducimos los datos del vehículo.

```
mass=185;       % Scooter + un pasajero de 70 kg.
area=0.6;       % Área frontal del vehículo.
Cd=0.75;        % Coeficiente aerodinámico.
Gratio=2/0.21;  % Relación de transmisión expresada en G/r.
G_eff=0.97;     % Rendimiento de la transmisión.
Regen_ratio=0.5; % Proporción del frenado que se realiza
                 % regenerativamente usando el motor.
bat_type='NC';  % batería tipo NiCd.
NoCells=15;     % 3 baterías de 5 celdas (6 Volt).
Capacity=100;   % Baterías de 100 Ah.
k=1.05;         % Coeficiente de Peukert.
Pac=50;         % Potencia media auxiliares.
```

% Constantes para la eficiencia del motor.

```
kc=1.5;
ki=0.1;
kw=0.00001;
ConL=20;
```

% Cálculo de constantes.

```
Frr=0.007*mass*9.8;
Rin=(0.06/Capacity)*NoCells;
Rin=Rin+0.004;
PeuCap=((Capacity/5)^k)*5;
```

% Configuramos vectores para almacenar los datos de la batería y la
% distancia recorrida al final de cada ciclo. Todos son inicializados a cero
% y disponen de 100 posiciones.

```
DoD_end=zeros(1,100);  
CR_end=zeros(1,100);  
D_end=zeros(1,100);
```

% Inicialización de los vectores para incluirlos en los bucles de la simulación.

```
DoD=zeros(1,N);      % Profundidad de descarga.  
CR=zeros(1,N);      % Carga sustraída de la batería.  
D=zeros(1,N);       % Distancia recorrida.  
CY=1;               % CY controla el bucle exterior y cuenta el número de ciclos  
completados.
```

```
DD=0;                % Inicializado a cero.  
                    % También utilizamos la variable DD para supervisar la descarga, y  
para detener el bucle.
```

```
while DD<0.9
```

```
% Queremos mantener el ciclo hasta que la batería este descargada.  
% Esto se define como más del 90% de descarga. Es decir, DoD final > 0,9.
```

```
% Comenzamos un ciclo.  
% Llamamos a unciclo.m que contiene la simulación del funcionamiento del vehículo.
```

```
unciclo;
```

```
% Ciclo completado.  
% Actualizamos los valores al final del ciclo.
```

```
DoD_end(CY)=DoD(N);  
CR_end(CY)=CR(N);  
D_end(CY)=D(N);
```

```
% Restablecemos los valores de los vectores internos para el siguiente  
% ciclo. Deben comenzar donde lo dejaron.
```

```
DoD(1)=DoD(N);  
CR(1)=CR(N);  
D(1)=D(N);  
DD=DoD_end(CY);
```

```
% Final de ciclo
```

```
CY=CY+1;
```

```

end;
% Gráfica de la autonomía.
figure
plot(D_end,DoD_end,'k+');
title('Autonomía scooter Peugeot en ciclo ECE-47');
ylabel('Profundidad de descarga (DoD)');
xlabel('Distancia recorrida (km)');

% ECE_47
% Este archivo construye el perfil de velocidad del ciclo ECE-47
% para un scooter eléctrico.

V=zeros(1,111);

% Lo primero es una fase de aceleración de 50s.
% Usamos por lo tanto el programa ScootA.m.

t=linspace(0,50,501);      % tiempo de 0 a 50 s, en pasos de 0,1 s.
vel=zeros(1,501);         % 501 lecturas de velocidad.
d=zeros(1,501);           % Vector para almacenar la distancia recorrida.
dT=0.1;                   % Pasos de tiempo de 0,1 s.

for n=1:500
    % Resolución numérica.
    if vel(n)<10.8          % Par constante hasta este punto.
        vel(n+1)=vel(n)+dT*(1.57-(0.00145*(vel(n)^2)));
    elseif vel(n)>=10.8    % Par variable linealmente.
        vel(n+1)=vel(n)+dT*(7.30-(0.53*vel(n))-(0.00145*(vel(n)^2)));
    end;
    d(n+1)=d(n)+0.1*vel(n); % Cálculo de la distancia recorrida.
end;

for n=1:51
    V(n)=vel(((n-1)*10)+1);
end;

% La velocidad se reduce a 5,56 m/s durante los siguientes 15 segundos.

decel=(V(51)-5.56)/15;
for n=52:65
    V(n)=V(n-1)-decel;
end

% Esta velocidad es mantenida durante 35s.

for n=66:101
    V(n)=5.56;
end;

```

```
% El scooter es parado entonces sobre 8 segundos.
```

```
decel=5.56/8;  
for n=102:108  
V(n)=V(n-1)-decel;  
end;  
V(109)=0;
```

```
% La velocidad cero se mantiene durante otros 2 segundos.
```

```
V(110)=0;  
V(111)=0;
```

```
V=V.*3.6;           % Convertimos la velocidad a km/h.
```

```
% Gráfica del perfil de velocidad del ciclo de conducción.
```

```
figure  
plot(V);  
axis([0 120 0 50]);  
xlabel('Tiempo (s)');  
ylabel('Velocidad (km/h)');  
title('Ciclo ECE-47 para el scooter eléctrico');
```

