

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones



Trabajo de Fin de Grado

Análisis y simulación en Matlab de un sistema de propulsión con autogeneración para vehículos eléctricos



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Iván Casares Cano

Tutor: Emilio José Bueno Peña

2018

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones

Trabajo Fin de Grado

Análisis y simulación en Matlab de un sistema de propulsión con
autogeneración para vehículos eléctricos

Autor: Iván Casares Cano

Tutor/es: Emilio José Bueno Peña

TRIBUNAL:

Presidente: Santiago Cóbreces Álvarez

Vocal 1º: Felipe Espinosa Zapata

Vocal 2º: Emilio José Bueno Peña

FECHA: 2018

Dedicado a mi familia y amigos.

ÍNDICE

ÍNDICE	7
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	9
RESUMEN	12
ABSTRACT	14
RESUMEN EXTENDIDO	16
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN	18
CAPÍTULO 2 - ORIGEN E HISTORIA DEL VEHICULO ELÉCTRICO	20
CAPÍTULO 3 - TIPOS DE VEHICULOS ALTERNATIVOS	24
3.1 – BIOCARBURANTES	24
3.2 - HIDRÓGENO.....	25
3.3 - HÍBRIDO	27
3.3.1 <i>Arquitectura en serie</i>	27
3.3.2 <i>Arquitectura en paralelo</i>	28
3.3.3 <i>Arquitectura Mixta</i>	29
CAPÍTULO 4 – PARTES DEL VEHICULO ELÉCTRICO	31
4.1 MOTORES.....	31
4.1.1 <i>Motor síncrono de imanes permanentes</i>	32
4.1.2 <i>Motores asíncronos o de inducción</i>	33
4.2 BATERÍAS	37
4.2.1. <i>Batería plomo-ácido</i>	37
4.2.2. <i>Batería Níquel-Cadmio</i>	38
4.2.3. <i>Batería Níquel- hidruro metálico (Ni-MH)</i>	38
4.2.4 <i>Baterías de ion-litio</i>	39
4.3 ESTACIONES DE RECARGA	41
4.3.1 <i>Tipos de recarga</i>	41
4.3.2 <i>Tipos de conectores</i>	43
4.3.3 <i>Modos de carga</i>	46
4.3.4 <i>Funciones proporcionadas en cada modo de carga</i>	48
4.3.5 <i>Función de control piloto</i>	49
4.3.5 <i>Tipos de conexión del vehículo eléctrico</i>	52
4.3.6 <i>Acoplador básico de vehículo</i>	55
4.4 FRENO REGENERATIVO	58
4.4.1 <i>Generador Síncrono</i>	59
4.4.2 <i>Generador asíncrono</i>	60
CAPÍTULO 5 – CONTROL DE VELOCIDAD Y ELECTRÓNICA DE POTENCIA	61
5.1 MOTORES ASÍNCRONO	61
5.1.1 <i>Control Escalar</i>	61
5.1.2 <i>Control Vectorial</i>	63
5.2 MOTORES SÍNCRONOS	66
5.2.1 <i>Control en lazo abierto</i>	66
5.2.2 <i>Control en lazo cerrado (auto-pilotado)</i>	67
CAPÍTULO 6 – MODELO EN MATLAB	69
6.1. INTRODUCCIÓN.....	69
6.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	70
6.2.1 <i>Bloque de control</i>	70
6.2.2 <i>Sistema eléctrico de propulsión</i>	76

6.2.3 Repartidor de potencia	77
6.2.4 Dinámica del vehículo.....	79
6.3 SIMULACIÓN.....	79
6.3.1 Vehículo Eléctrico.....	80
6.3.2 Vehículo híbrido	83
6.3.3 Modelo más exigente.....	91
CAPÍTULO 7 - CONCLUSIONES	96
BIBLIOGRAFÍA.....	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 1: ELECTROBAT.....	20
FIGURA 2: PORSCHE P1 ...	20
FIGURA 3: CITYCAR	21
FIGURA 4: GENERAL MOTORS EV-1	22
FIGURA 5: TOYOTA PRIUS	22
FIGURA 6: TESLA ROADSTER.....	23
FIGURA 7: PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO	25
FIGURA 8: SISTEMA CERRADO CON ENERGÍAS RENOVABLES.....	26
FIGURA 9: VEHÍCULO HÍBRIDO SERIE.....	27
FIGURA 10: VEHÍCULO HÍBRIDO PARALELO	28
FIGURA 11: VEHÍCULO HÍBRIDO MIXTO	29
FIGURA 12: ESQUEMA GENERAL VEHÍCULO ELÉCTRICO	31
FIGURA 13: ROTOR DE UN MOTOR SÍNCRONOS CON ANILLOS ROZANTES	32
FIGURA 14: CONFIGURACIONES BÁSICAS DE LOS MSIP. (A) MSIP DE IMANES SUPERFICIALES, (B) MSIP DE IMANES INTERIORES.	33
FIGURA 15: TIPOS DE MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN.....	34
FIGURA 16: CURVA PAR-VELOCIDAD DE UNA MÁQUINA ASÍNCRONA	36
FIGURA 17: BATERÍA ION-LITIO.....	39
FIGURA 19: ENCHUFE SCHUKO HEMBRA	43
FIGURA 20: CONECTOR TIPO 1	44
FIGURA 21: CONECTOR TIPO 2	44
FIGURA 22: CONECTOR CSS	45
FIGURA 23: CONECTOR SCAME	45
FIGURA 24: CONECTOR CHADEMO.....	46
FIGURA 25: MODO 1 DE CARGA.....	46
FIGURA 26: MODO 2 DE CARGA.....	47
FIGURA 27: MODO 3 DE CARGA.....	47
FIGURA 28: MODO 4 DE CARGA.....	48
FIGURA 29: CIRCUITO TÍPICO DE PILOTO DE CONTROL	50
FIGURA 30: CIRCUITO SIMPLIFICADO DE PILOTO DE CONTROL	50
FIGURA 31: FUNCIONES PILOTO.....	51
FIGURA 32: SECUENCIAS DE CONEXIÓN	52
FIGURA 33: CONEXIÓN TIPO "A"	53
FIGURA 34: CONEXIÓN TIPO "B"	53
FIGURA 35: CONEXIÓN TIPO "C"	54
FIGURA 36: CONEXIÓN POR INDUCCIÓN.....	55
FIGURA 37: ACOPLADOR MODO 1	56
FIGURA 38: ACOPLADOR MODO 2	56
FIGURA 39: ACOPLADOR MODO 3	57
FIGURA 40: ACOPLADOR MODO 4	57
FIGURA 41: COMPONENTES ACOPLADOR MODO 4	58
FIGURA 42: ESQUEMA FRENO REGENERATIVO	59
FIGURA 43: GENERADOR ASÍNCRONO	60
FIGURA 44: REGULACIÓN DE VELOCIDAD POR CONTROL V/F	62
FIGURA 45: TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA TRIFÁSICO EN BIFÁSICOS EQUIVALENTES.....	63
FIGURA 46: CONTROL VECTORIAL DIRECTO.....	64
FIGURA 47: CONTROL VECTORIAL INDIRECTO	64
FIGURA 48: CONTROL DIRECTO DE PAR.....	65
FIGURA 49: CONTROLADOR DEL FLUJO Y CONTROLADOR DEL PAR	65
FIGURA 50: VARIACIÓN DEL FLUJO ESTATÓRICO EN EL SECTOR (1)	65
FIGURA 51: INFLUENCIAS DE LOS VECTORES ESPACIALES DE LA TENSIÓN SOBRE EL FLUJO Y PAR. PAR EN SECTOR 1 ...	66
FIGURA 52: CONTROL EN LAZO ABIERTO	66
FIGURA 53: CONTROL EN LAZO CERRADO	67
FIGURA 54: MODELO COMPLETO EN MATLAB.....	69
FIGURA 55: BLOQUE DE CONTROL	70
FIGURA 56: MODE LOGIC	71
FIGURA 57: GRÁFICA DE FUNCIONAMIENTO DE CONTROL DEL VEHÍCULO	72

FIGURA 58: CONTROLADOR MOTOR DE COMBUSTIÓN	73
FIGURA 59: MODELO DEL CONTROLADOR DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN	73
FIGURA 60: CONTROLADOR DEL GENERADOR	73
FIGURA 61: MODELO DEL CONTROLADOR DEL GENERADOR	74
FIGURA 62: CONTROLADOR MOTOR ELÉCTRICO	74
FIGURA 63: MODELO DEL CONTROLADOR DEL MOTOR ELÉCTRICO	74
FIGURA 64: CONTROLADOR DE CARGA DE LA BATERÍA	75
FIGURA 65: MODELO DEL CONTROLADOR DE CARGA	75
FIGURA 66: ESQUEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA	76
FIGURA 67: MODELO MOTOR SÍNCRONO	76
FIGURA 68: MODELO CONVERTIDOR DC-DC.....	77
FIGURA 69:REPARTIDOR DE POTENCIA	77
FIGURA 70: ENGRANAJE PLANETARIO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD.....	78
FIGURA 71: CONEXIÓN DE LA TRASMISIÓN.....	78
FIGURA 72: BLOQUE DE DINÁMICA DEL VEHÍCULO	79
FIGURA 73: CURVA DE VELOCIDAD	79
FIGURA 74: CORRIENTES VEHÍCULO ELÉCTRICO	80
FIGURA 75: VOLTAJES VEHÍCULO ELÉCTRICO	81
FIGURA 76: SOC VEHÍCULO ELÉCTRICO	82
FIGURA 77: ESTADO DE HABILITACIÓN.....	84
FIGURA 78: GRÁFICOS DE LAS REVOLUCIONES.....	85
FIGURA 79: GRÁFICOS DE TORQUE O PAR	86
FIGURA 80: GRÁFICOS DE LAS TENSIONES.....	87
FIGURA 81: GRÁFICOS DE LAS CORRIENTES	88
FIGURA 82: COMPARACIÓN DE LA CORRIENTE MOTOR DEL ELÉCTRICO.....	89
FIGURA 83: ESTADO DE CARGA	90
FIGURA 84: CURVA DE VELOCIDAD MAS EXIGENTE	91
FIGURA 85: CORRIENTES DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO.....	92
FIGURA 86: NIVEL DE CARGA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO.....	93
FIGURA 87: CORRIENTES DEL VEHÍCULO HÍBRIDO	94
FIGURA 88: NIVEL DE CARGA DEL VEHÍCULO HÍBRIDO	95

RESUMEN

El presente trabajo tratará de analizar cómo funcionan los sistemas de propulsión eléctricos para vehículos. El proyecto contiene una explicación detallada de todas las partes fundamentales que incluye el vehículo eléctrico, es decir, desde los sistemas de almacenamiento y recarga; pasando por los conceptos básicos sobre motores de inducción y síncronos; así como la electrónica de potencia (convertidores, inversores, etc.); hasta el análisis sobre mecanismos de control de motores y convertidores; y una unidad regenerativa para alargar la autonomía de las baterías aprovechando la inercia del vehículo.

Palabras clave: *vehículo eléctrico, vehículo híbrido, simulación, motor, batería.*

ABSTRACT

This work consists on analyze how behaves the electric propulsion system for vehicles. This project includes a detailed explanation of each fundamental component of the electric vehicle: starting with the battery electric vehicle; basic concept about asynchronous and synchronous engine, as well as power electronic system (rectifier, inverter, etc.); ending to the analysis of control system for engines and converters; and the energy recovery mechanism which recharge the battery taking advantage of the inertia of the vehicle.

Key Words: *electric vehicle, hybrid vehicle, simulation, engine, battery.*

RESUMEN EXTENDIDO

En la actualidad el coche eléctrico se está implantando como la alternativa sólida a los vehículos de combustión. Pero, ¿por qué necesitamos evolucionar hacia este cambio de modelo automovilístico? Independientemente de las evidentes razones medio ambientales, el desarrollo del coche eléctrico supone un progreso tecnológico para las empresas del mercado automovilístico, es decir, una evolución natural de los medios de transportes empleados por la sociedad como cuando prescindimos de los coches de caballos. Este cambio no es la primera vez que sucede en la historia, pero sí es la primera vez que tenemos los recursos tecnológicos para imponerse definitivamente.

La primera parte del trabajo comienza con un breve repaso histórico sobre la llegada del coche eléctrico en el siglo XIX y su posterior desarrollo en el siglo XX. A continuación, se recoge una descripción teórica de cada una de las partes que componen el vehículo, para después ofrecer un modelo de su funcionamiento, una simulación configurada mediante la herramienta Matlab. En el modelo simulado, ilustrado con las pertinentes gráficas, convergerán todos los bloques descritos anteriormente para construir una visión global del sistema completo, así como para analizar los resultados mecánicos y eléctricos en funcionamiento basados en unas condiciones de velocidad a la entrada.

Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN

El coche eléctrico es un tipo de vehículo propulsado por un motor eléctrico, cuya energía se almacena en una batería recargable. Conseguir un modelo de coche eléctrico que ofrezca al menos las mismas prestaciones (en lo que se refiere a potencia y autonomía, sobre todo) que un coche con motor de combustión es el reto de las grandes marcas automovilísticas. Habría que añadir la preocupación actual por la alarmante contaminación que producen los gases emitidos por los vehículos de gasolina. Asimismo, la extracción de petróleo conlleva unos altos costes que genera una brutal competencia, aunque lo más reseñable a tener en cuenta es que no se trata de una fuente inagotable. Es natural pues, que las grandes empresas automovilísticas hayan iniciado sus investigaciones hacia la consecución del siguiente modelo automovilístico, cuya pretensión es implantarse para un uso global de toda la sociedad. Esto también supone un reto tecnológico y, por consiguiente, despierta una competencia en el mercado. Cada marca buscará despuntar entre las demás para presentar el modelo definitivo que consiga la aceptación general.

La finalidad de este proyecto es ofrecer la información técnica global sobre los distintos sistemas de propulsión eléctrica, además de su aplicación en la actualidad. El planteamiento teórico se apoya con una simulación práctica de su funcionamiento con el objetivo de conocer a fondo cómo actúan los vehículos eléctricos e híbridos que se están implantando en la actualidad. Para abordar todos estos temas el trabajo está dividido en siete capítulos incluyendo esta introducción.

En el *Capítulo 2* se resume de forma global cómo ha evolucionado la idea de vehículo eléctrico durante la historia, incluyendo algunos vehículos que pudieron ser relevantes durante el proceso hasta llegar a nuestros días.

No todas las opciones alternativas al motor de combustión pasan por la motorización eléctrica, por ello, en el *Capítulo 3* se hace alusión a estos otros tipos de vehículos y sus características fundamentales.

El *Capítulo 4* se centra concretamente en el vehículo eléctrico, donde se describirán los elementos fundamentales que lo componen, tales como motores, baterías o la forma de cargar las mismas.

Para que el vehículo reaccione a las exigencias del conductor es necesario una forma de controlar sus motores y una electrónica que implementar, todos estos conceptos son los pertenecientes al *Capítulo 5*.

El *Capítulo 6*, el más extenso de todos, es donde se lleva a la práctica un modelo completo de vehículo, definiendo detalladamente el modelado utilizado y mostrando los resultados mediante gráficas para comprender mejor su funcionamiento y contrastar los datos obtenidos entre un modelo completamente eléctrico y uno híbrido.

Todo estudio requiere una conclusión y eso es lo que recoge el *Capítulo 7*: una valoración sobre la importancia del vehículo eléctrico y sobre el futuro que le puede esperar.

Capítulo 2 - ORIGEN E HISTORIA DEL VEHICULO ELÉCTRICO

Cuando pensamos en el coche eléctrico se suele relacionar un escenario futurista debido a una influencia literaria y cinematográfica. Pero no es, ni mucho menos, un recién llegado: nació en el siglo XIX y su historia está repleta de altibajos. En el siglo XIX las investigaciones sobre electromagnetismo crecieron con rapidez y su aplicación en el mundo del transporte fue uno de los primeros objetivos que se concibieron. Lo primero que quisieron hacer fue sustituir los vehículos de tracción animal, lo que originó un debate entre los motores térmicos y eléctricos.

En 1834, Thomas Davenport construyó el que se conoce como el primer vehículo eléctrico, que, aunque se trataba de un vehículo en miniatura, se convirtió en el primer prototipo equipado con motor eléctrico, 50 años antes del primer motor de combustión. Por otra parte, Robert Anderson inventó el coche eléctrico puro al diseñar un carruaje con tracción eléctrica y pila de energía no recargable.

Pero fue el trabajo del físico francés **Gaston Planté** el que, en 1859, dio un gran impulso al coche eléctrico gracias la invención de las **baterías de plomo-ácido**. En 1894, momento en el que los tranvías perdían cada vez más relevancia, surgió el **Electrobat**, considerado el **primer coche eléctrico de cierto éxito**, tanto es así que su modelo fue usado en Nueva York como taxi, contando con una flota de 50 unidades.



Figura 1: Electrobat

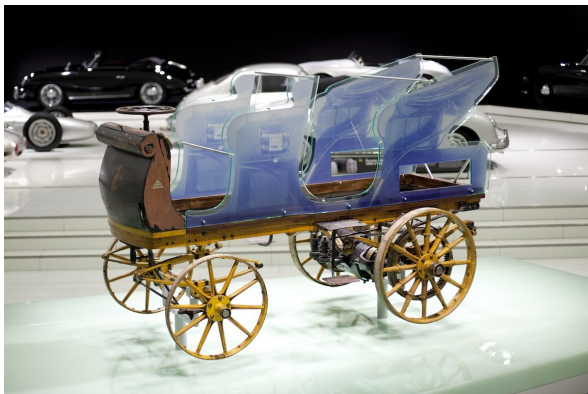


Figura 2: Porsche P1

A comienzos del siglo XX, el vehículo eléctrico se encontraba en auge. Para entender las razones de esta ascensión se debe conocer primero el contexto social y económico que tenía lugar en Estados Unidos en aquellos momentos. La sociedad iba ganando en calidad de vida,

por lo que empezaron a aparecer vehículos alternativos al coche de caballos. Las opciones reinantes eran, por un lado, los vehículos de gasolina y, por otro, los eléctricos. Los coches de gasolina postulaban como la gran promesa, aunque todavía eran muy difíciles de manejar, hacían demasiado ruido y emitían gran cantidad de humo.

Por tanto, la sociedad estadounidense comenzó a contemplar el vehículo eléctrico como una mejor opción. Grandes nombres como Thomas Edison o Ferdinand Porsche fundaron compañías enfocadas en los coches eléctricos, creando modelos muy innovadores como el Porsche P1 con una velocidad máxima de 35 Km/h y una muy sorprendente autonomía de 80 Km. Tal fue su auge que llegó a superar a los vehículos de gasolina por un ratio de 10 a 1.

Sin embargo, todo cambió en torno al año 1912, cuando Henry Ford y su cadena de montaje en serie provocaron una apreciable bajada de precio de los modelos de combustión, además de la invención del arranque eléctrico. La salida al mercado del Ford T, junto con la proliferación de yacimientos petrolíferos, provocó que el vehículo eléctrico quedara en un segundo plano sin ningún interés para la sociedad.

Décadas más tarde, en los años 70, se produjo la primera gran crisis del petróleo. Esto causó que muchos países comprendieran que depender de otros países para su suministro energético suponía un problema. **Empezaron a surgir, por tanto, algunos modelos en el sector industrial como el *CityCar* de Sebring-Vanguard, un pequeño vehículo urbano bastante exitoso que contó con más de 2.000 unidades vendidas.**



Figura 3: CityCar

Quitando modelos de importancia meramente anecdótica, **el gran salto se dio en 1990 gracias la nueva ley “Zero Emission Mandate”, dictada por la CARB californiana. General Motors presenta entonces el *EV-1*, primer modelo eléctrico de gran**

acogida. El *EV-1* tenía un motor eléctrico de 137 cv, con una velocidad máxima de 130 Km/h y una autonomía de 250 Km.



Figura 4: General Motors EV-1

Pese a su éxito, General Motors canceló el proyecto debido a la fuerza económica que ejercía la industria petrolera en Estados Unidos, siendo el principal motivo de muchos fracasos durante estos años. Finalmente las propias firmas automovilísticas se unieron a la industria petrolera para tumbar el mandato californiano sobre las “cero emisiones”, rebajando los requisitos contaminantes y abriendo la puerta hacia otro tipo de vehículo, el híbrido.

El máximo exponente de vehículo híbrido fue el Toyota Prius, cuya salida al mercado se produjo en 1997. Es el primer híbrido producido en masa, muy exitoso hasta nuestros días.



Figura 5: Toyota Prius

Pero si hay que hablar de una compañía esa es Tesla Motors, una de las empresas que más se está involucrando en la movilización eléctrica. Gracias a la llegada de las baterías de litio Tesla, en 2006 se presentó el automóvil deportivo **Tesla Roadster**, toda una sensación en el mercado. Su diseño, equipación y rendimiento han demostrado que los coches eléctricos pueden competir en igualdad de condiciones con los mejores coches de gasolina. Esta apuesta ha significado un revulsivo en la industria del coche eléctrico porque ha logrado colocarse en primera línea dentro del mercado automovilístico.



Figura 6: Tesla Roadster

En los últimos años, gracias a las nuevas tecnologías han sido numerosas empresas las que han presentado coches eléctricos o híbridos, creciendo sus ventas de forma llamativa. Es difícil saber cuándo dará el salto definitivo, pero es innegable que el potencial e interés que la sociedad y empresas punteras tienen sobre estas tecnologías está en su mejor momento.

Capítulo 3 - TIPOS DE VEHICULOS ALTERNATIVOS

Durante toda la historia del automóvil se han desarrollado diferentes ideas para crear vehículos no dependientes del uso del petróleo con el fin de promover un transporte que no cause un impacto tan nocivo sobre el medio ambiente y que, además, utilice una fuente más económica. A pesar de que el coche eléctrico es el foco del presente estudio, habría que subrayar que no se trata de una única opción en desarrollo para sustituir a los vehículos de combustión. En este epígrafe, se muestran algunas de las diferentes propuestas a tener en cuenta.

3.1 – Biocarburantes

Los biocarburantes son aquellos combustibles surgidos de la biomasa, por lo que son considerados una energía renovable. Los biocombustibles se pueden presentar tanto en forma sólida, como líquida (bioalcoholes, biodiesel), o gaseosa (biogás, hidrógeno).

Dentro de los biocarburantes existe un subgrupo caracterizado por su posible aplicación en los actuales motores de combustión interna y son en general de naturaleza líquida. Los biocarburantes en uso se consiguen a partir de materias primas vegetales a través de reacciones físico-químicas.

Las razones principales para fomentar su uso son:

- Contribuyen a la seguridad del suministro energético.
- Contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Promueven un uso mayor de energías renovables.
- Diversifican las economías agrícolas logrando nuevos mercados.

3.2 - Hidrógeno

El hidrógeno es un elemento muy abundante en la naturaleza. Lo podemos encontrar tanto combinado con oxígeno formando agua, como con otros elementos que forman diversos compuestos.

El hidrógeno como combustible contiene unas mayores prestaciones potenciales por su relación energía\peso que cualquier otro combustible y, además, genera una emisión contaminante muy reducida al liberar solo vapor de agua en su combustión.

En la actualidad existen dos tipos de motores para la utilización del hidrógeno:

3.2.1 Motores de hidrógeno de combustión interna

Sus características constructivas son similares a las de los motores convencionales, ya que desarrollan sus prestaciones potenciales por la ignición del hidrógeno dentro de una cámara de combustión.

3.2.2 Motores eléctricos con celdas de hidrogeno de combustible

Es la opción preferida para el hidrógeno por su mayor rendimiento, su simplicidad y su funcionamiento silencioso, entre otras cosas.

En la pila de combustible, el hidrógeno se pone en contacto con el oxígeno a través de un catalizador, produciendo electricidad que es aprovechada para alimentar un motor eléctrico.

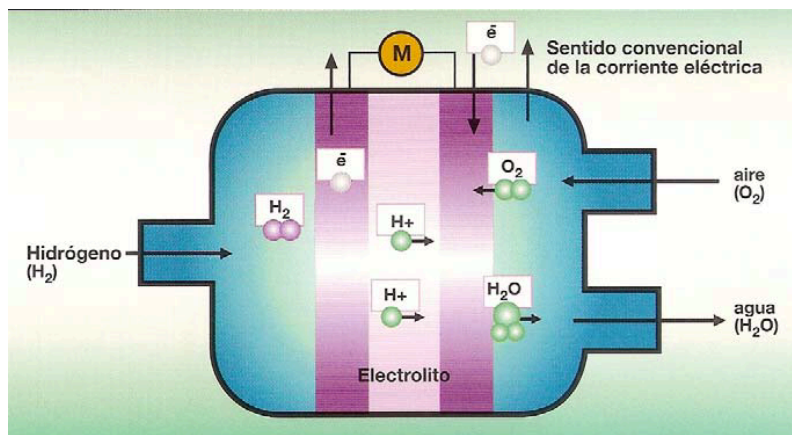


Figura 7: Pila de combustible de hidrógeno

Estas pilas de combustible necesitan un suministro continuo de hidrógeno y oxígeno cuando están funcionando, proviniendo este último del aire atmosférico.

Este sistema conlleva uno de los inconvenientes del hidrógeno, su almacenamiento, ya que se necesita una enorme cantidad de espacio para almacenar hidrógeno líquido, sin olvidar su elevado coste.

Otra de las dificultades que presenta la utilización de hidrógeno es la dificultad de su extracción. Se puede realizar mediante diversas tecnologías, como la electrolisis del agua, el reformado de hidrocarburos, la gasificación de la biomasa y otras en fase de investigación. La única tecnología hasta ahora sostenible y respetuosa con el medio ambiente es la de electrolisis del agua a partir de electricidad generada mediante fuentes renovables.

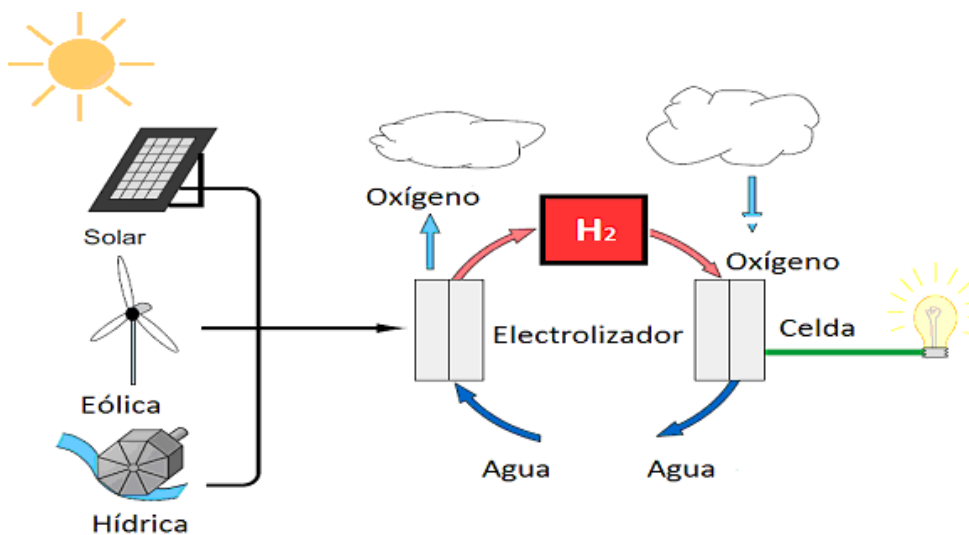


Figura 8: Sistema cerrado con energías renovables

No obstante, en la actualidad la mayor parte del hidrógeno se produce a partir de gas natural mediante un proceso de reformado con vapor de agua que genera CO_2 . Este proceso es mucho más eficiente que el proceso de electrolisis.

Todos estos procesos de extracción tienen un coste elevadísimo, por lo que su viabilidad económica está ligada a la reducción de estos costes, a la mejora de almacenaje en los vehículos y al desarrollo de una infraestructura de estaciones de repostaje. Si estos

obstáculos se superaran, las pilas de combustible constituirían una de las mejores alternativas a medio y largo plazo como sistema de propulsión para vehículos.

3.3 - Híbrido

Por definición, un vehículo híbrido es aquél cuya propulsión se realiza mediante dos tipos diferentes de fuentes de energía. En la práctica, se pueden dar diferentes combinaciones, pero **los vehículos híbridos que se comercializan en la actualidad combinan un motor eléctrico y otro de combustión interna.**

En general, un vehículo híbrido funciona como uno convencional al que se le ha unido un motor eléctrico cuya misión es, o bien ayudar al motor de combustión cuando se precise una mayor potencia, o bien impulsar él solo al vehículo.

Los vehículos híbridos se clasifican en tres tipos atendiendo al modo en que se conectan ambos motores:

3.3.1 Arquitectura en serie

En los coches híbridos en serie el vehículo es impulsado enteramente por el motor eléctrico. El motor térmico se utiliza exclusivamente para generar electricidad, ya sea para alimentar al motor eléctrico, o para cargar la batería.

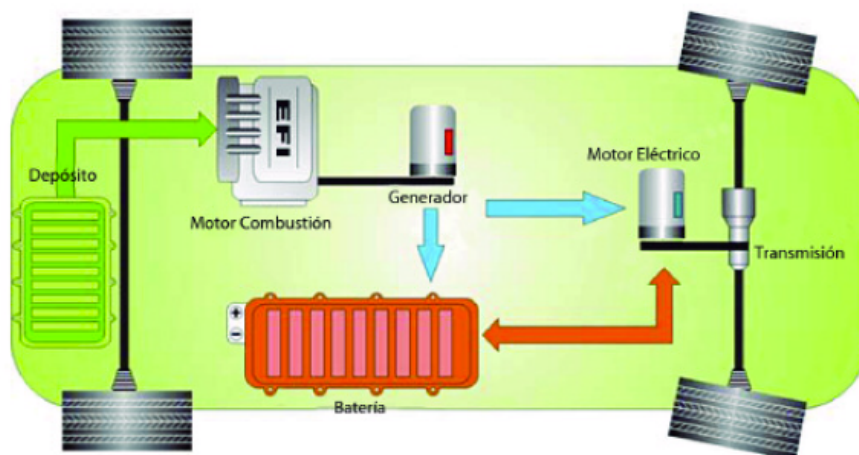


Figura 9: Vehículo híbrido serie

Los flujos energéticos característicos de esta configuración son los siguientes:

1. El motor térmico, a través del generador, puede alimentar al motor eléctrico y también cargar la batería [flechas azules].
2. La batería alimenta el motor eléctrico, pero dicho motor también puede actuar como freno regenerativo y puede recargar la batería [flechas naranjas].

3.3.2 Arquitectura en paralelo

En los híbridos en paralelo tanto el motor térmico como el motor eléctrico impulsan el vehículo.

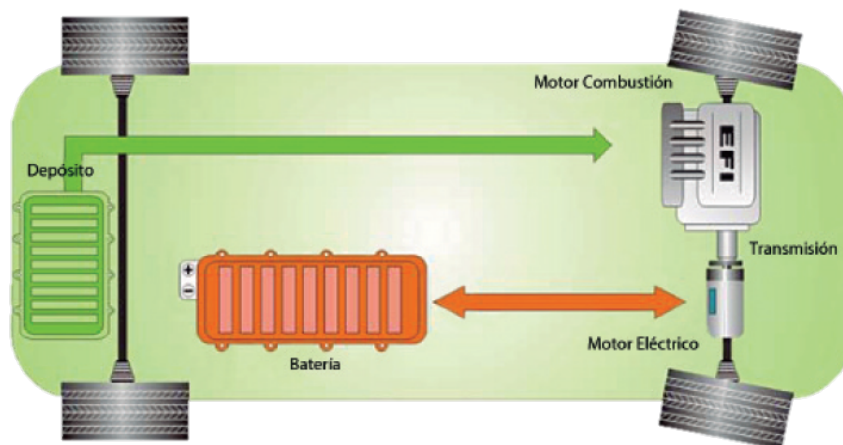


Figura 10: Vehículo híbrido paralelo

Los flujos energéticos característicos de la configuración en paralelo son los siguientes:

1. El motor térmico, a través del motor eléctrico, puede impulsar el vehículo y también cargar la batería funcionando éste último como un alternador.
2. La batería puede alimentar el motor eléctrico y por la capacidad de freno regenerativo, el motor eléctrico puede también recargar la batería.

3.3.3 Arquitectura Mixta

Esta configuración permite impulsar enteramente el vehículo por medio del motor térmico y el motor eléctrico de forma independiente, o mediante una combinación de ambos. Tanto el motor de combustión como el generador y el motor eléctrico están interconectados a través de un sistema de engranajes diferencial, el cual está conectado a la transmisión del vehículo.

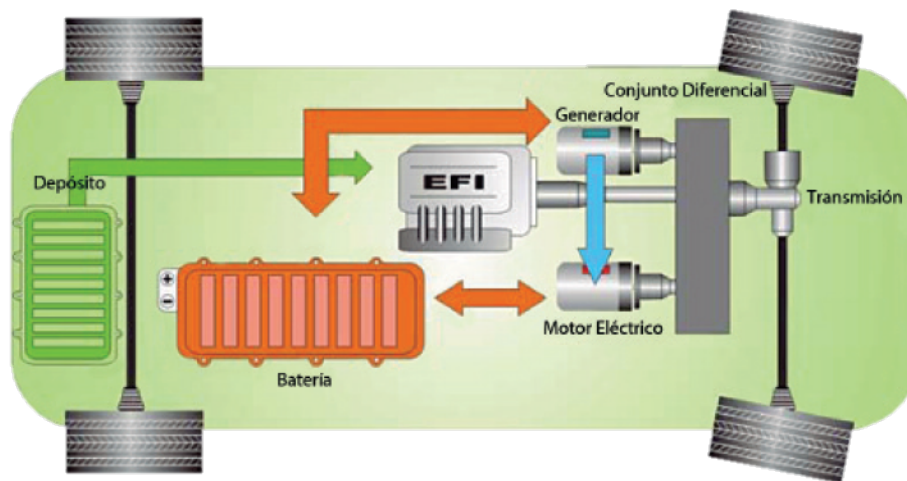


Figura 11: Vehículo híbrido mixto

El flujo de la energía en los vehículos mixtos sería el siguiente:

1. El motor de combustión impulsa al vehículo a través del conjunto diferencial.
2. El generador es impulsado por el motor térmico produciendo electricidad. Ésta es usada para recargar la batería o para alimentar el motor eléctrico, según las necesidades.
3. El motor eléctrico es alimentado por las baterías y también tiene la capacidad de recargar la batería cuando funcione como freno regenerativo.
4. El motor eléctrico impulsa el vehículo a través del conjunto diferencial.

Esta arquitectura es la más eficiente de las tres tipologías, ya que se puede conectar la mejor combinación en función de las necesidades del vehículo, así como conseguir un rango máximo de rendimiento y mínimo consumo.

Su principal desventaja es la mayor complejidad del sistema, ligada por tanto a un aumento del coste tanto desde el punto de vista mecánico como por los sistemas de control del conjunto.

Las últimas novedades dentro de los automóviles híbridos son aquellas que están a un paso de ser totalmente eléctricos, denominados **vehículos híbridos enchufables**. Este tipo de vehículos tiene la posibilidad de conectarse a la red para cargar sus baterías. Su concepto es atractivo para aquellos conductores que busquen minimizar aún más las emisiones en carretera al ser capaces de funcionar si se desea como totalmente eléctrico y teniendo la seguridad de seguir poseyendo un motor de combustión según qué situación, lo que evita la dependencia absoluta de la batería.

Capítulo 4 – PARTES DEL VEHICULO ELÉCTRICO

En este apartado se expone con más detalle los componentes que conforman el vehículo eléctrico, las distintas tecnologías y su funcionamiento desde un punto de vista técnico.

A modo de introducción, en el siguiente esquema se observan las partes más relevantes que componen el vehículo eléctrico:

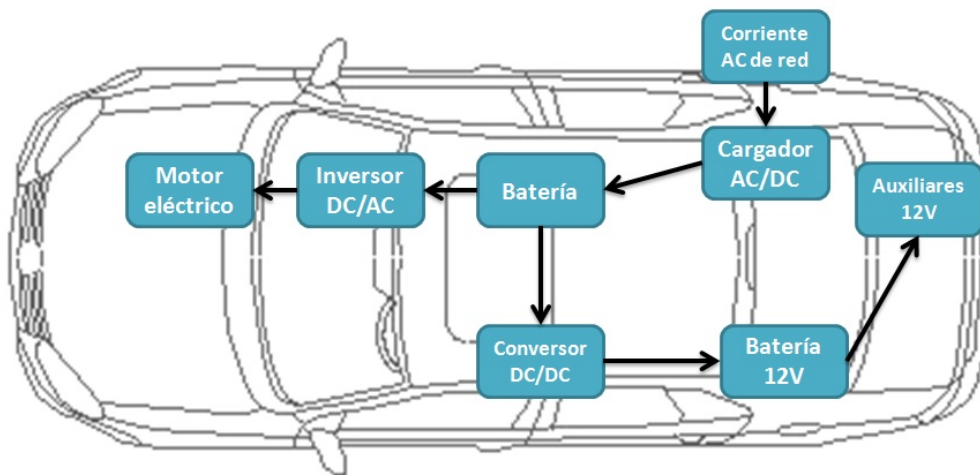


Figura 12: Esquema general vehículo eléctrico

4.1 Motores

Es la parte fundamental del vehículo, en definitiva, es la parte impulsora. Existen varios tipos de motores eléctricos: motores DC *brushless*, motores asíncronos o de inducción y motores síncronos de imanes permanentes. Cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes, pero en la actualidad el mercado tiende a usar los motores de AC, arropado por grandes marcas del sector como Tesla, BMW o Toyota.

Esta elección se debe a la sencillez de su construcción y el mínimo mantenimiento que conllevan los motores AC, lo que se resume en un menor coste de fabricación. Otro factor importante es el control de velocidad y par del motor, pudiéndose realizar sin modificar el voltaje, sino con la frecuencia. Para su uso en vehículos que conlleva largos periodos de funcionamiento también son motores más fiables.

4.1.1 Motor síncrono de imanes permanentes

Es un tipo de motor de corriente alterna, que se caracteriza porque la velocidad de rotación del rotor y la velocidad del campo magnético del estator son iguales. Por consiguiente, la velocidad de rotación está asociada con la frecuencia eléctrica de la fuente y del número de polos.

Los motores síncronos poseen un devanado trifásico en el estator y un devanado rotórico excitado por corriente continua. El devanado de excitación puede ser sustituido por imanes permanentes. En este tipo de máquinas, en vez de utilizar un devanado de corriente continua en el rotor, se utilizan imanes permanentes que crean el campo magnético de excitación. De esta forma, se elimina la necesidad de escobillas y anillos rozantes y se disminuye considerablemente el volumen del motor.

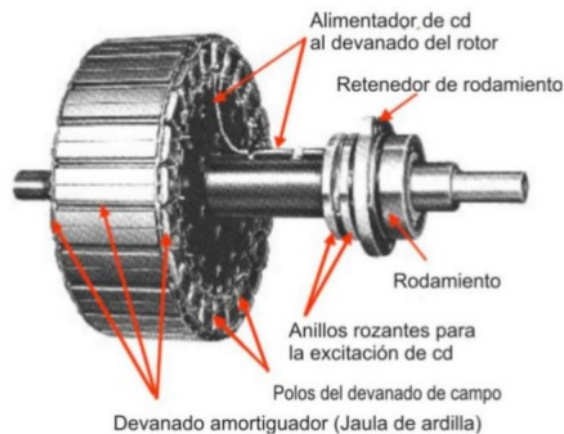


Figura 13: Rotor de un motor síncrono con anillos rozantes

Además, el empleo de imanes permanentes conlleva la eliminación de las pérdidas en el cobre del rotor, aumentando la eficiencia del motor. En estos motores se consiguen elevadas aceleraciones gracias a la alta relación par/inercia que presentan. Existen dos configuraciones básicas en función de la disposición de los imanes permanentes en el rotor: montaje superficial e imanes interiores.

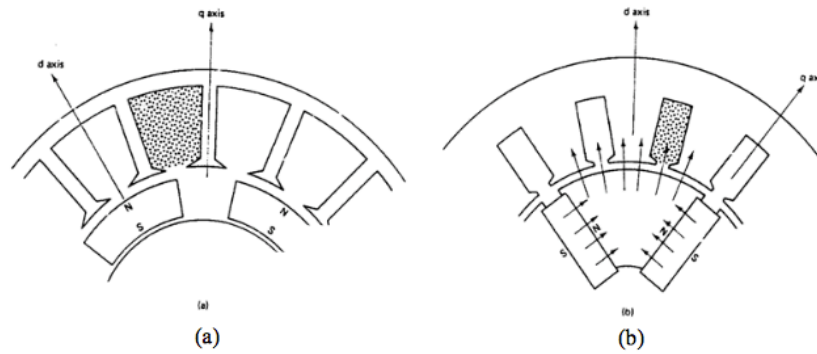


Figura 14: Configuraciones básicas de los MSIP. (a) MSIP de imanes superficiales, (b) MSIP de imanes interiores.

Las máquinas síncronas de imanes permanentes han experimentado un notable crecimiento en los últimos años, debido a la aparición de materiales con elevado nivel magnético remanente. El material tradicionalmente utilizado era la ferrita. Ahora los nuevos materiales empleados son, por ejemplo, el neodimio, que presenta un magnetismo muy alto y gran linealidad en la curva de desmagnetización.

En resumen, estos motores son adecuados para aquellas aplicaciones donde se requiera:

- Alta relación par/inercia para conseguir elevadas aceleraciones.
- Alta relación potencia/peso.
- Par electromagnético suave, incluso a bajas velocidad para obtener gran precisión.
- Control de par a velocidad nula.
- Alto rendimiento y factor de potencia.
- Diseño compacto.

4.1.2 Motores asíncronos o de inducción

Son un tipo de motor de corriente alterna en el que la corriente eléctrica del rotor necesaria para producir torsión es inducida por el fenómeno de inducción electromagnética del campo magnético del estator.

El motor asíncrono está formado por un estator que contiene las bobinas inductoras. Estas bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120° .

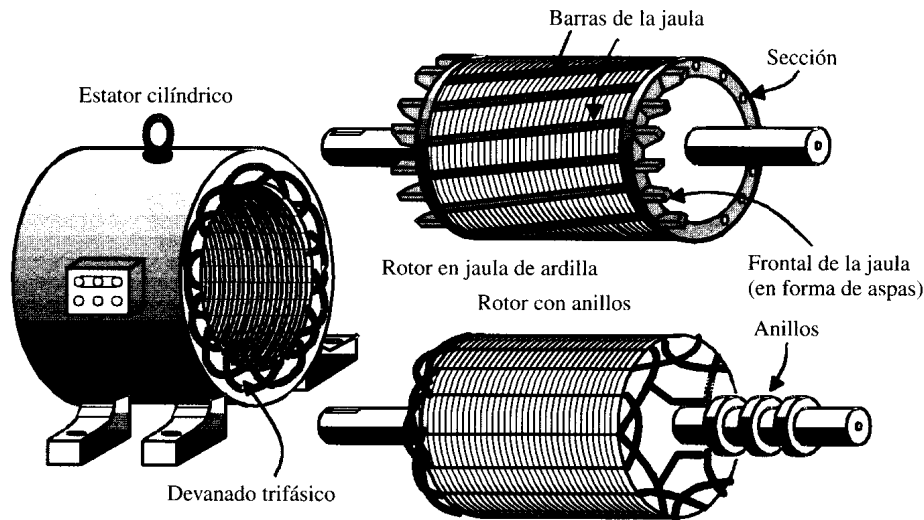


Figura 15: Tipos de máquinas asíncronas o de inducción

El rotor puede ser de dos tipos:

1. **Bobinado:** los devanados del rotor son similares al estator. El número de fases del rotor no tiene por qué ser el mismo que el del estator, pero lo que sí tiene que ser igual es el número de polos. Los devanados están conectados a anillos colectores montados sobre el eje.
2. **Jaula de ardilla:** los conductores del rotor están distribuidos por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por tanto, no hay posibilidad de conexión del devanado del motor con el exterior. La posición inclinada de las ranuras mejora las propiedades de arranque y disminuye el ruido.

El principio de funcionamiento del motor asíncrono, según el teorema de Ferraris, se produce cuando por las bobinas del estator circula un sistema de corrientes trifásicas equilibradas, cuyo desfase es también de 120° . Se induce un campo magnético giratorio que envuelve el rotor. Este campo magnético variable va a inducir una tensión en el devanado del rotor según la Ley de Inducción de Faraday.

$$E_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Donde:

N es el número de espiras que tiene la bobina.

E_{ind} Voltaje Inducido.

ϕ Flujo Magnético.

$\frac{d\phi}{dt}$ Variación temporal del flujo magnético.

Como los terminales del rotor están cortocircuitados, la corriente inducida que circula crea un campo magnético que rota en sentido contrario, creándose un par de movimiento en el rotor siguiendo la siguiente expresión:

$$\tau_{ind} = k (\vec{B}_r \times \vec{B}_s)$$

Donde:

τ_{ind} Torque o par inducido.

\vec{B}_r Densidad de campo magnético que gira en sentido anti horario.

\vec{B}_s Densidad de campo magnético que gira en forma horaria.

k Constante.

El deslizamiento es la diferencia de velocidad del rotor y el campo magnético que lo envuelve también se llama velocidad de sincronismo. Conceptualmente, el deslizamiento representa lo cerca que se encuentra el motor de la velocidad del campo magnético.

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Donde:

S Deslizamiento.

N_s Velocidad de sincronismo.

N_r Velocidad de rotor.

El valor de deslizamiento puede servir para definir el estado de la maquina asincrona:

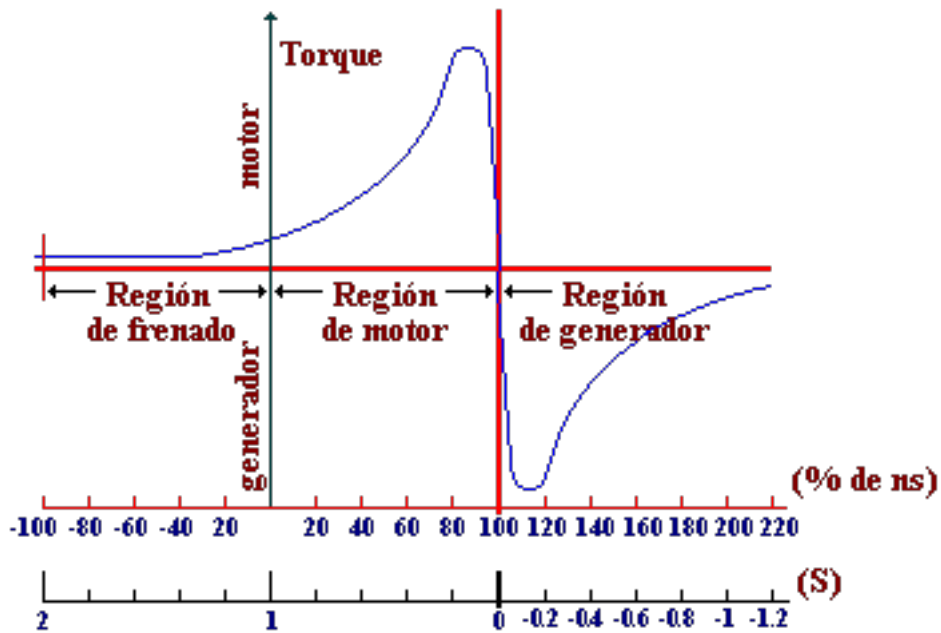


Figura 16: curva par-velocidad de una máquina asincrona

Como se observa en la gráfica la máquina puede situarse en tres estados:

- **Motor ($0 < S < 1$):** El motor gira en la misma dirección que el campo magnético.
- **Regeneración ($-1 < S < 0$):** El motor gira en la misma dirección, pero la velocidad del rotor es mayor a la del campo magnético, produciendo una inversión de torque y la potencia es devuelta al estator, por lo que convierte la potencia mecánica en electricidad.
- **Freno por inversión ($1 < S < 2$):** Se frena con rapidez al invertir las fases, girando el motor en sentido contrario al campo eléctrico. Esta condición no debe producirse sin antes garantizar que la velocidad del motor sea cero.

VENTAJAS	INCOVENIENTES
Alto rango de velocidades	Baja densidad de potencia
Alta fiabilidad	Gran tamaño
Bajo coste	Baja Eficiencia
Muy robusto	Problemas térmicos a altas velocidades

4.2 Baterías

Uno de los principales componentes de todo vehículo eléctrico es la batería. Su importancia es tal que la autonomía y el precio dependen del tipo y tamaño de la misma. **Este acumulador de energía almacena la electricidad mediante elementos electroquímicos**, un proceso con pérdidas mínimas que permite un rendimiento próximo al 100%. Las baterías, dispuestas a entregar esta energía en cualquier momento, soportan un número finito de ciclos de carga y descarga completos, llamado ciclo de vida.

Los principales parámetros a tener en cuenta en una batería destinada al vehículo son:

- **Densidad energética:** Expresada en Wh/Kg. Es la energía que puede suministrar por cada Kg. Cuanto mayor sea, más autonomía tendrá el vehículo o menor será el peso de este.
- **Potencia:** Expresada en W/Kg. Es la capacidad de proporcionar potencia en el proceso de descarga. Cuanto más potencia, mejores prestaciones para el vehículo.
- **Eficiencia:** Es el rendimiento de la batería, la energía que realmente aprovecha. Medido en %.
- **Coste:** Es el parámetro que más influye en el precio total del vehículo.
- **Ciclo de vida:** Ciclos completos de carga y descarga que soporta la batería antes de su sustitución. Cuantos más ciclos, más duradera es la batería.

Las baterías son el elemento del vehículo que más ha evolucionado. **La investigación sobre baterías es el eje del desarrollo futuro de los coches eléctricos: conseguir acumular más energía en menos espacio, con menos peso y a un coste menos elevado.** Las principales tecnologías de baterías son las siguientes:

4.2.1. Batería plomo-ácido

Constituyen una de las formas más antiguas de almacenar electricidad que se conoce, de hecho, se emplean desde el siglo XIX. En algunos vehículos pequeños todavía se siguen utilizando, aunque su principal uso es para alimentar el sistema eléctrico básico del vehículo, o en algunos casos para la iluminación.

El principal inconveniente es su elevado peso para la poca potencia ofrecida, con una densidad de 40 Wh/Kg que hace inútil utilizarlas para mover un vehículo. Además, el tiempo de carga es muy elevado y no tiene un elevado ciclo de vida.

4.2.2. Batería Níquel-Cadmio

Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Muy utilizadas en el ámbito doméstico; sin embargo, tienen poco uso en vehículos debido a su densidad de energía de tan sólo 50 Wh/Kg.

Tienen una tensión de 1,2 V por celda, lo que supondría la unión de muchas celdas para adquirir una tensión alta. Durante la carga este tipo de baterías permite sobrecargas, no almacenando más energía a pesar de seguir conectada. Son muy robustas a cambios de temperatura y admiten un alto rango, teniendo un alto rendimiento a bajas temperaturas, propiedad que hace que se utilicen mucho en el ámbito de la aeronáutica.

Estas baterías contienen unos componentes demasiado caros para que resulten rentables en la producción de automóviles. Además, poseen efecto memoria lo que hace que en cada recarga su capacidad se vea reducida.

4.2.3. Batería Níquel- hidruro metálico (Ni-MH)

Utilizan un ánodo de oxidróxido de níquel y un catado de una aleación de hidruro metálico. Esto permite eliminar el cadmio, que, además de su alto coste, representa un peligro para el medio ambiente.

Cada celda puede proporcionar una tensión de 1,2 V, al igual que las de níquel-cadmio. Sin embargo, su densidad de energía puede llegar hasta los 100Wh/Kg.

También se soluciona el gran efecto memoria de sus antecesoras, aunque presenta problemas como su alto índice de descarga en periodos de inactividad (30% de carga en un mes) y que se ve afectada por el exceso de carga.

4.2.4 Baterías de ion-litio

Es la tecnología más moderna y la que ha provocado el gran salto actual en el mercado de vehículos eléctricos. Parecen estar llamadas a prevalecer, pues sus características técnicas más relevantes mejoran sustancialmente a las predecesoras.

Esta batería ofrece mayor densidad energética, más de 100 Wh/Kg. Son de tamaño más reducido (lo que facilita su uso en vehículos), no requiere mantenimiento y no sufre el conocido efecto memoria. Asimismo, el coste de producción es cada vez más bajo, lo que hace que sean una de las opciones más habituales para equipar coches eléctricos. Como inconveniente cabe señalar su menor robustez ante variaciones de voltaje, obligando a usar sistemas de gestión más costosos.

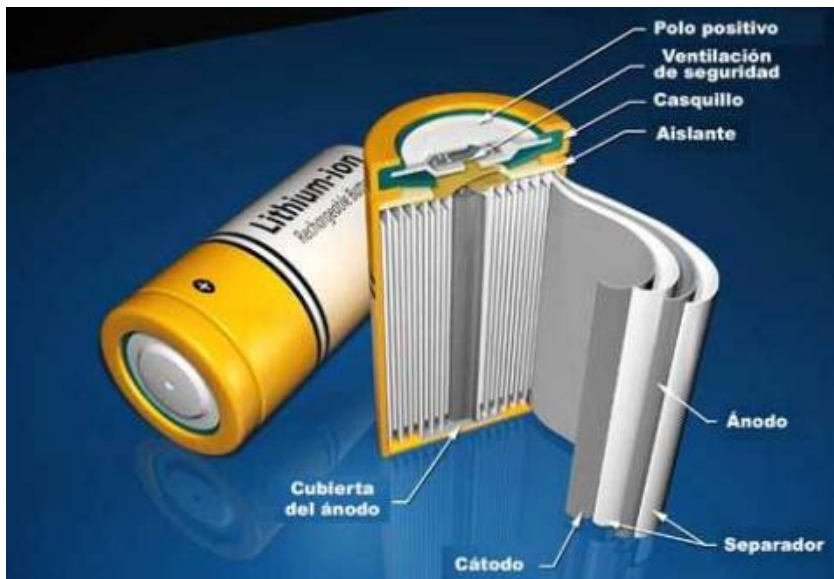


Figura 17: Batería ion-litio

Aunque se habla constantemente de baterías de Ion-litio como si fuera un único tipo, en realidad es una denominación demasiado genérica porque abarca muchas otras posibilidades.

Los diferentes tipos de baterías Ion-litio tienen en común entre sí la utilización de un ánodo de Litio-Carbono; y difieren entre sí en el óxido de litio del cátodo. Cada tipología ofrece unas características técnicas diferentes. Algunos ejemplos son los listamos a continuación:

- **Litio-Cobalto:** Densidad energética 170-185Wh/kg. Son las más extendidas entre los dispositivos móviles. Sólo aguantan unos 500 ciclos de recarga, por lo que las hace difícilmente utilizables en vehículos. En caso de rotura, generan reacciones exotérmicas peligrosas.
- **Litio-Hierro-Fosfato:** Densidad energética 90-125Wh/Kg. Son las más seguras porque tienen mayor estabilidad térmica y química. Permite hasta 2000 ciclos de recarga, por lo que son muy duraderas. Son, asimismo, las más baratas y se pueden emplear para mover pequeños vehículos, tanto híbridos como eléctricos.
- **Litio-Níquel-Cobalto-Manganeso:** Densidad energética 155-190 Wh/Kg. Presentan una excelente combinación entre su buen rendimiento y su razonable coste. Se empiezan a utilizar en coches eléctricos de forma masiva. Soportan 1500 ciclos y voltajes de los más altos.
- **Litio-titanio:** Densidad energética 65-100Wh/Kg. Son las más duraderas con hasta 12000 ciclos de recarga. Sin embargo, debido a la baja densidad y que la introducción del titanio encarece su fabricación, aún no se plantea su uso en vehículos.

La investigación de las baterías es el eje de la evolución futura para los coches eléctricos. **El punto clave será desarrollar modelos capaces de acumular más energía en un menor espacio y con un menor peso.** Cada una de las opciones representa siempre una relación de compromiso entre sus diferentes prestaciones, sin existir una opción claramente vencedora en todos los aspectos. Su desarrollo supondría también una creciente inversión en la estaciones de recarga, ya que esta red es todavía limitada y su expansión sería crucial para la extensión de los automóviles eléctricos.

4.3 Estaciones de recarga

Las baterías son un elemento imprescindible en los vehículos eléctricos, por lo que, sin un sistema eficaz de recarga, no se podrán aprovechar al 100% su rendimiento. Las estaciones deberían garantizar la recarga de las baterías en tiempos breves, de forma que el uso de estos vehículos no suponga un inconveniente para sus propietarios. Por ello, la red eléctrica en cada país también debería reajustarse para hacer frente al creciente uso de este tipo de vehículos.

Cuando hablamos de recarga de vehículos eléctricos existen factores importantes a tener en cuenta en el proceso: tipos de recarga, modos de carga, tipos de conectores y conexionado.

Los aspectos cubiertos en este apartado incluyen características de funcionamiento del dispositivo de alimentación y la conexión al vehículo, seguridad eléctrica y características con las que debe ser conforme el vehículo con respecto al SAVE (Sistema de Alimentación del Vehículo Eléctrico).

4.3.1 Tipos de recarga

Los tipos de recarga los podemos clasificar según el tiempo que tarda la batería en estar al 100% de su carga.

- **Recarga súper-lenta:** su intensidad de corriente se limita a 10 A. La recarga completa de las baterías de un vehículo eléctrico de unos 25 Kw puede durar entre 10 y 12 horas.
- **Recarga lenta o convencional:** se utiliza un voltaje eléctrico del mismo nivel que la vivienda, es decir, de 16 A, demandando unos 3,6 kW de potencia. La recarga completa durará unas 8 horas. Es muy habitual emplear ese tiempo durante la noche al existir menor demanda eléctrica.

- **Recarga semi-rápida:** en una red de 230 VAC y 32 A, demanda una potencia de 7,2 kW. La duración de carga rondará las 4 horas y son sistemas que se pueden instalar en el garaje de una vivienda.
- **Recarga rápida:** emplea una mayor intensidad eléctrica y, además, entrega directamente corriente continua, obteniéndose una potencia del orden de 50 kW. Es la que más se asemeja al repostaje en gasolineras convencionales, ya que en aproximadamente 30 minutos se puede recargar el 80% de la batería. Este dispositivo no sería posible instalarlo en una vivienda debido a la potencia demandada.
- **Recarga ultra-rápida:** todavía en fase de experimentación y sólo apto para vehículos eléctricos con acumuladores de tipo supercondensadores. Una recarga con tanta potencia produciría tal temperatura que las actuales baterías de litio no la soportarían. La potencia es muy elevada y entre 5 y 10 minutos se podría recargar por completo una batería.

	Carga lenta	Carga semirrápida	Carga rápida
Potencia e intensidad eléctrica	Corriente monofásica de 230 V e intensidad de 16 A. Potencia de 3,6 kW	Corriente monofásica de 230 V e intensidad de 32 A. Potencia de 7,3 kW.	Corriente continua con una potencia de 50 kw
	Corriente trifásica de 400V en intensidad de 16 A. Potencia de 11 kW	Corriente trifásica de 400 V e intensidad de 32 A. Potencia de 22 kW	
Tiempo estimado de recarga	En torno a 8 horas	En torno a 4 horas	30 minutos

Localización óptima	Viviendas, lugares de trabajo o aeropuertos	Centros urbanos o centros comerciales	Estaciones de servicio o electrolinerías
¿Cuándo se utiliza?	El VE se deja cargando y se regresa pasadas varias horas.	El VE se deja cargando mientras se realizan compras o actividades de ocio.	El VE se carga sin alejarse. Necesaria la presencia para supervisión.

Figura 18: Características velocidad de carga

4.3.2 Tipos de conectores

Debido a que no existe una estandarización del tipo de enchufe, existen distintos modelos en el mercado, cada uno con distintas configuraciones y características. Algunos ejemplos son los siguientes:

- **Enchufe Schuko:** es compatible con las tomas de corriente europeas, excepto Inglaterra. Llamado técnicamente Tipo F y estandarizado por la norma CEE 7/4. Soporta corrientes de hasta 16 A, sólo compatible con cargas lentas.

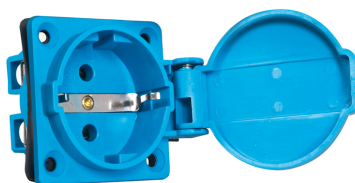


Figura 19: Enchufe Schuko hembra

- **Conector SAE J1772 (Tipo 1):** es un estándar japonés que han adoptado los norteamericanos para su uso exclusivo en vehículos eléctricos. Tiene todas las características de un enchufe monofásico normal, añadiendo dos pines extra para comunicación. Su diseño especial favorece la seguridad e impide el acceso de terceros. Este conector tiene dos niveles, uno de hasta 16 A para recarga lenta y otro de hasta 80 A para recarga rápida.



Figura 20: Conector Tipo 1

- **Conector MENNEKES (Tipo2):** conector alemán que no es específico para vehículos eléctricos, pero es muy habitual su uso en ellos. Tiene 7 bornes: cuatro de corriente trifásica, dos para comunicaciones y la toma de tierra. Tiene la opción de dos corrientes: la monofásica de hasta 16 A o la trifásica de hasta 63 A para una carga rápida.



Figura 21: Conector Tipo 2

- **Conector único combinado o CSS:** propuesta creada por los alemanes y norteamericanos como solución estándar. Se basa en una toma Tipo 2 a la que se le han añadido 2 pins de potencia para CC. Se pueden llegar hasta los 135 A. Permite tanto carga lenta como rápida.



Figura 22: Conector CSS

- **Conector Scame (Tipo 3):** surge gracias a la alianza llamada *EV Plug Alliance* entre Scame, Schneider y Legrand. De corriente monofásica y trifásica en el mismo conector de hasta 32 A. Dispone de soluciones técnicas y de protección que ninguno de los otros conectores ofrece, por lo que es una buena opción para situar en la pared.



Figura 23: Conector Scame

- **Conector CHAdeMO:** es el estándar de los fabricantes japoneses y está pensado para recarga rápida en CC. Por ello tiene 10 bornes, las comunicaciones se realizan mediante CAN bus. Es el conector con la red más densa de estaciones de recarga debido a la agresiva estrategia de Nissan. Admite hasta 200 A permitiendo recargas ultrarrápidas.



Figura 24: Conector CHAdeMO

4.3.3 Modos de carga

El modo de carga está relacionado con el nivel de comunicación entre el vehículo y la infraestructura de recarga para poder controlar el proceso de carga, así se puede observar el estado, realizar una programación horaria, o incluso inyectar energía a la red eléctrica. Existen 4 modos:

- **Modo 1:** La recarga se lleva a cabo mediante una toma de corriente monofásica, un enchufe convencional de una vivienda con conector tipo Schuko. Se conecta por tanto con una corriente máxima de 16 A y una tensión de hasta 250 V monofásica o 480 V trifásica, en el lado de la alimentación y utilizando los conductores de potencia y de tierra de protección. En tensión trifásica No existe comunicación y es el modo empleado para cargar pequeños vehículos eléctricos.

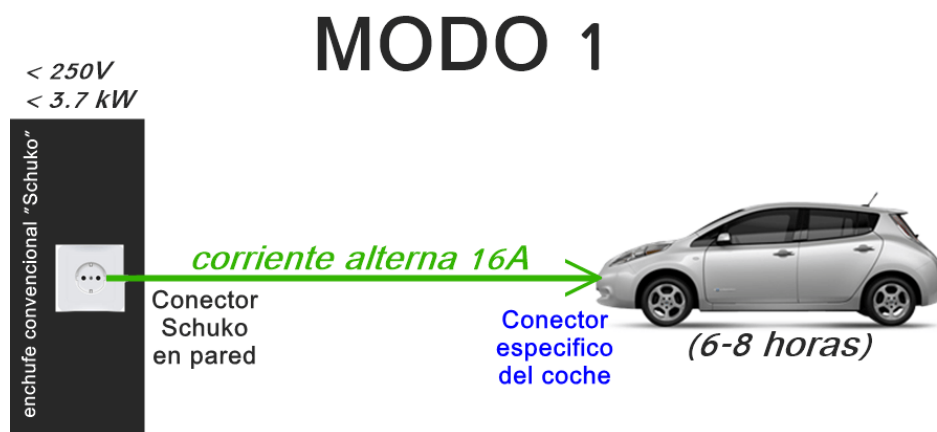


Figura 25: Modo 1 de carga

- Modo 2:** La toma de corriente también es estándar, pero en este caso el cable lleva un sistema de protección para las personas contra descargas eléctricas. El cable especial cuenta con un sistema de control con una función piloto entre vehículo y clavija, además de un sistema de protección. Dicho control permite verificar que la conexión con la red es correcta, elegir la velocidad de carga y activar/desactivar la recarga. La caja de control debe estar a un máximo de 0,3 m de la clavija o en la propia clavija.

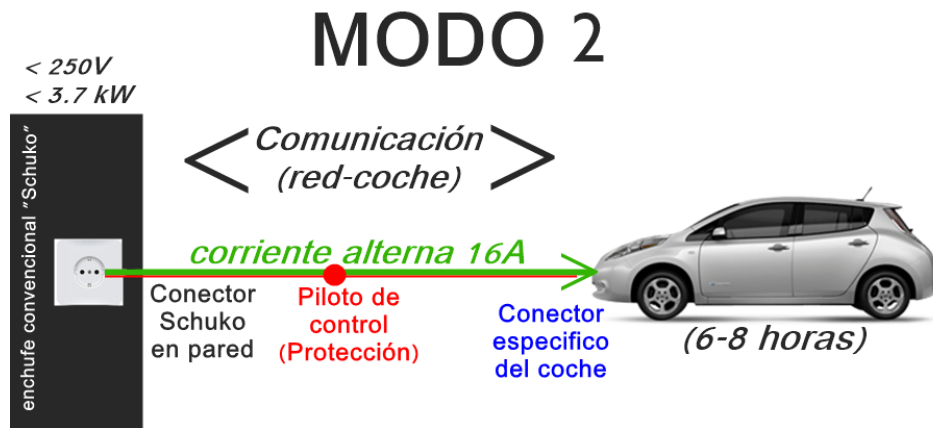


Figura 26: Modo 2 de carga

- Modo 3:** Este modo ya utiliza una toma de corriente especial y específica para la recarga de vehículos. Llamado también *SAVE* (Sistema de Alimentación del Vehículo Eléctrico) o *Wall Box*, donde las funciones de control piloto y protección se encuentran en la instalación fija de forma permanente. Este sistema monitoriza la carga y corta el suministro eléctrico al enchufe cuando no detecta ninguna conexión. Permite intensidades de 32 A.

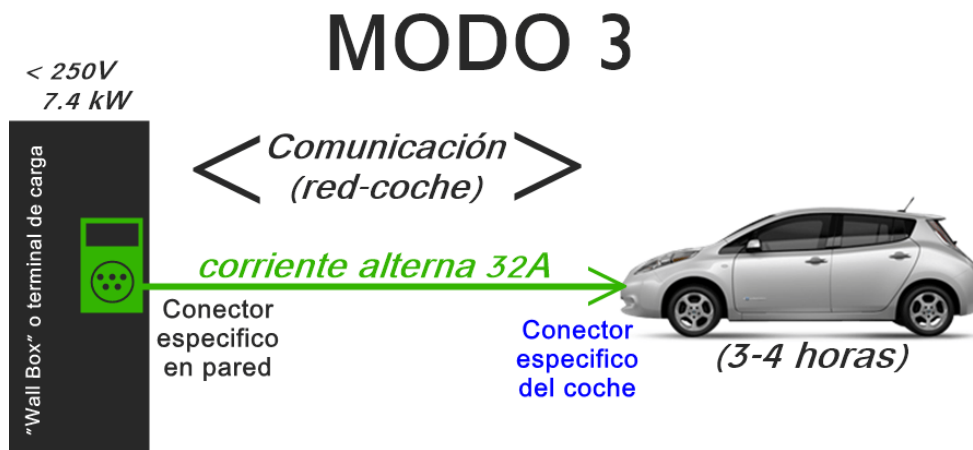


Figura 27: Modo 3 de carga

- **Modo 4:** El vehículo se conecta a la red de Baja Tensión a través de una estación de recarga, que mediante un cargador externo realiza la conversión de corriente alterna a continua. Al realizarse la conversión externa se ahorra los problema como el calentamiento o perdidas de energía. Al igual que el modo 3 tiene los sistemas de control piloto fijos en la infraestructura realizando sus funciones de control de carga y protección. Para este tipo de carga en CC el conector principalmente es el CHAdeMO o CCS, para suministrar corrientes de hasta 400 A, uso exclusivo para carga rápida.

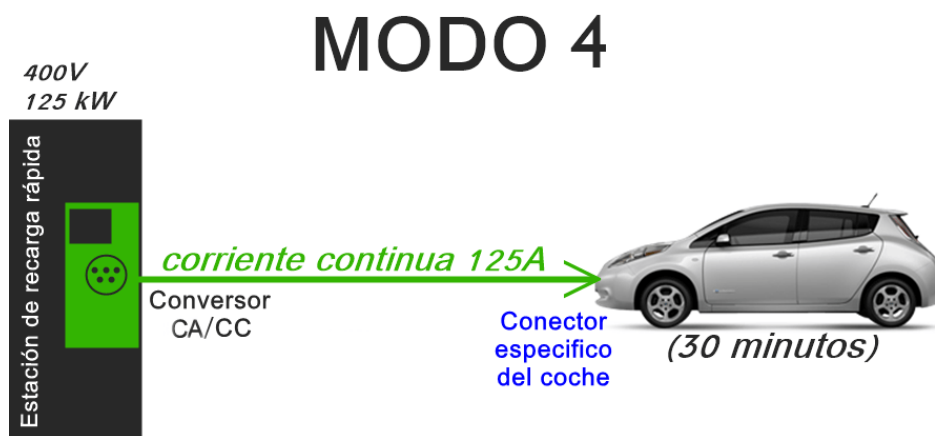


Figura 28: Modo 4 de carga

4.3.4 Funciones proporcionadas en cada modo de carga.

Esta parte abarca las funciones que ofrecen los distintos modos para mejorar la carga del vehículo o sistemas de seguridad para el usuario. Debido a que el modo 1 no ofrece ninguna opción de comunicación, no se verá afectado las siguientes características.

Las funciones que debe ofrecer el SAVE son las siguientes:

- **Verificación de que el vehículo está conectado correctamente:** el SAVE debe determinar que el conector está correctamente insertado entre la conexión de entrada del vehículo y el SAVE. El movimiento del vehículo por su propio

sistema de propulsión mientras este conectado debe ser imposible. Esta función es llevada a cabo de forma obligatoria por la función piloto.

- **Comprobación constante del conexionado del conductor a tierra de protección.**
- **Activación del sistema:** la activación del sistema no debe realizarse hasta que la función piloto ha sido correctamente establecida.
- **Desactivación del sistema:** si la función piloto se interrumpe, el suministro de energía debe ser interrumpida aunque el circuito de control puede permanecer activado. Obligatoria mediante la función piloto.

Las funciones anteriores señaladas son las que cualquier SAVE debe llevar, pero no son las únicas. A continuación se detallan otras funciones opcionales que se pueden proporcionar.

- **Selección de la velocidad de carga:** se debe proporcionar un medio manual o automático para asegurar que la velocidad de carga no supera el límite proporcionado por la red, vehículo o baterías.
- **Ventilación del sistema:** sistema que comprueba si se requiere de una refrigeración adicional durante la carga, permitiéndose solo la carga del vehículo si se proporciona dicha ventilación.
- **Detección o ajuste de la corriente de carga disponible:** Se debe proporcionar los medios en tiempo real para asegurar la corriente de carga disponible del SAVE y su fuente de alimentación no superen los límites.
- **Retención/liberación del acoplador:** debe contener un medio mecánico que no permita la extracción en un momento inadecuado.
- **Control de flujo de potencia bidireccional.**

4.3.5 Función de control piloto

La mayoría de las funciones que realiza el SAVE utilizan un sistema de control centrado en la función piloto. Por este motivo se ha decidido separarlo de las funciones generales que proporcionan al sistema de carga y explicarlo de forma más detallada. Para los modos 2, 3 y 4 es obligatoria su implementación.

Esta función afecta a todos los sistemas de carga con un circuito con conductor piloto con modulación PWM para definir el nivel de corriente disponible para la carga en los modos 2 y 3. El circuito básico de funcionamiento es el siguiente:

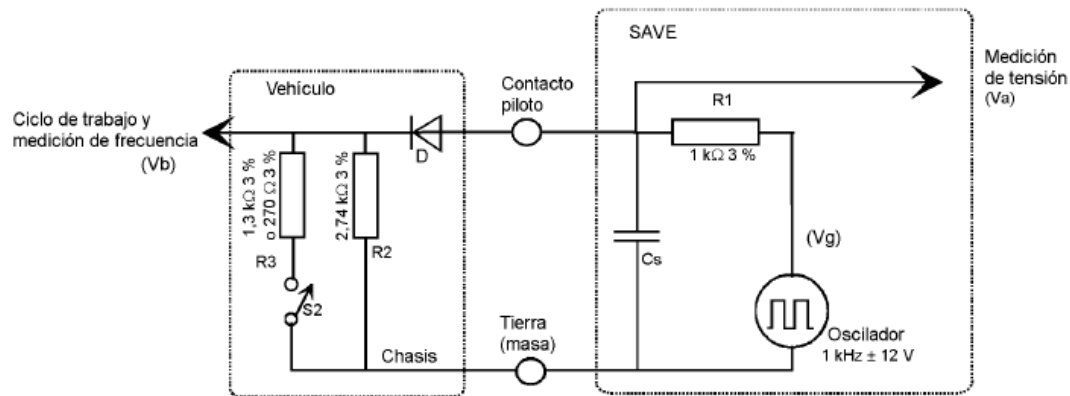


Figura 29: Circuito típico de piloto de control

Cuando el interruptor S2 se encuentra cerrado, el circuito se puede simplificar de la siguiente manera:

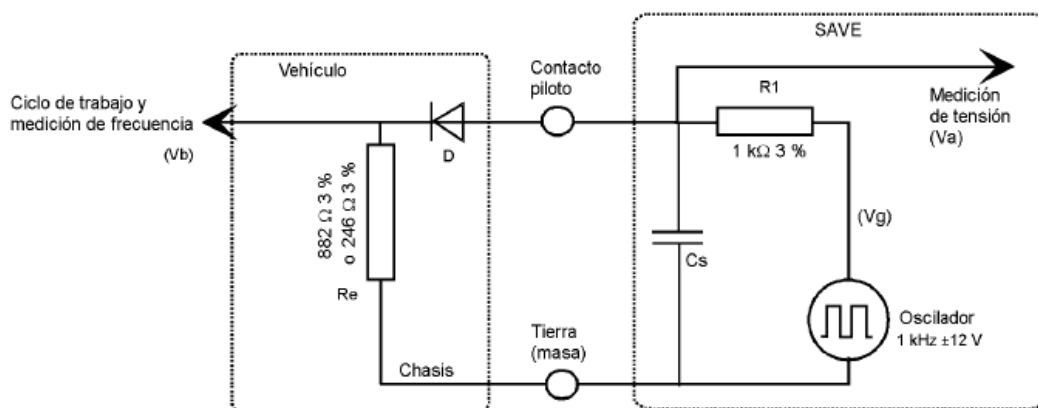


Figura 30: Circuito simplificado de piloto de control

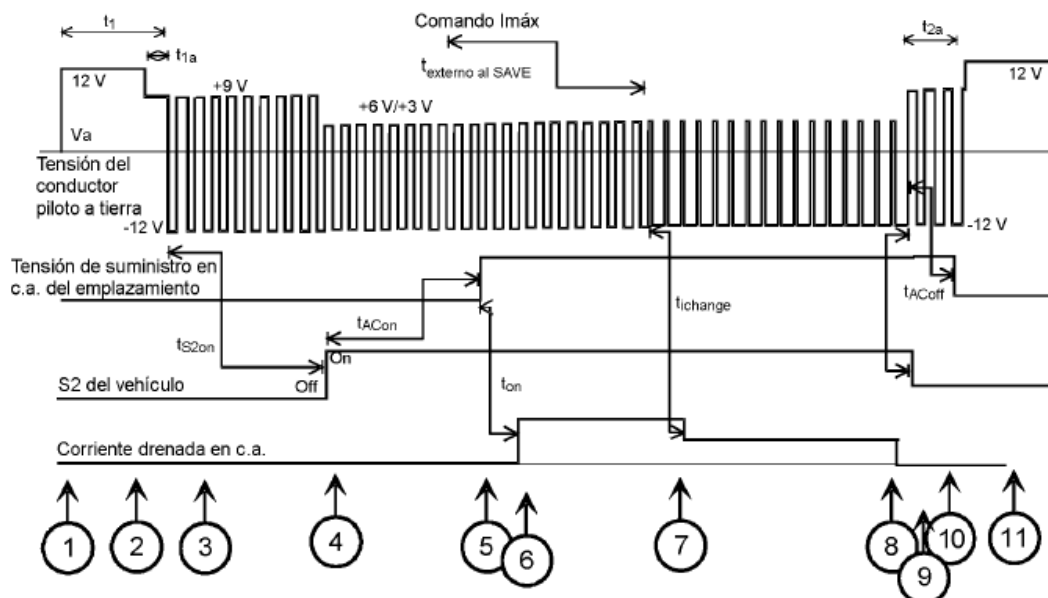
Cabe destacar que el circuito simplificado no se debe usar para vehículos que drenen mas de 16 A monofásicos, tampoco para alimentación trifásica.

Para establecer el estado del vehículo mediante el circuito descrito existen las siguientes combinaciones:

Estado del vehículo	Vehículo conectado	S2	Carga posible	Va	Vb
A	No	Abierto	No	12 V	Vb = 0 V
B	Si	Abierto	No	9 V	R2 detectada
C	Si	Cerrado	Vehículo preparado	6 V	R3 = 1,3KΩ No se necesita ventilación
D	Si	Cerrado	Vehículo preparado	3 V	R3 = 270Ω Se necesita ventilación
E	Si	Abierto	No	0 V	Vb = 0: SAVE, problema de la red de distribución, piloto cortocircuitado a tierra
F	Si	Abierto	No	-12 V	SAVE no disponible

Figura 31: Funciones piloto

Durante el arranque y parada, el resultado de una secuencia típica durante un ciclo de carga se detalla a continuación:



Como se puede observar, el proceso está dividido en 11 fases o secuencias de conexión. En cada una de ellas el sistema reconoce el estado en el que se encuentra y la acción que conlleva.

Estado		Condiciones
1	A	Vehículo no conectado – la tensión completa del generador se mide por la SAVE en Va. La señal Vg del generador está a una tensión continua de 12V.
2	B	El cable de carga está conectado. Esta condición se detecta con la señal de 9V en Va. La tensión Vg puede ser continua de 12 V o bien una señal de 1kHz de $\pm 12V$.
3	B	El SAVE es capaz de suministrar energía e indica al vehículo la corriente disponible mediante el ciclo de trabajo. El diodo D se detecta con los -12V y garantiza que el vehículo está conectado.
4	B → C, D	Se cierra S2 para indicar que el vehículo puede recibir energía.
5	C, D	El SAVE cierra el circuito. En el estado D, el interruptor se cerrará si las condiciones de ventilación son adecuadas.
6	C, D	El vehículo drena corriente. No se puede exceder de la indicada con el ciclo de trabajo.
7	C, D	Reducción de potencia. Se ajusta la demanda de corriente a la indicada por el ciclo de trabajo.
8	C, D	Fin de carga.
9	C, D →B	Se solicita la desconexión.
10	B	El SAVE detecta el estado B (apertura de S2) y abre el contactor.
11	A	Retirada completa del cable de carga, detectado con la señal de 12V.

Figura 32: Secuencias de conexión

4.3.5 Tipos de conexión del vehículo eléctrico.

La conexión del vehículo usando cables se realiza utilizando principalmente tres métodos. Todos los métodos tienen la posibilidad de conexión a una toma de corriente instalada en la pared, o a una estación de carga:

- **Método A:** conexión del vehículo a la red utilizando un cable de alimentación y una clavija unidas permanentemente. Es el método más sencillo y menos utilizado.

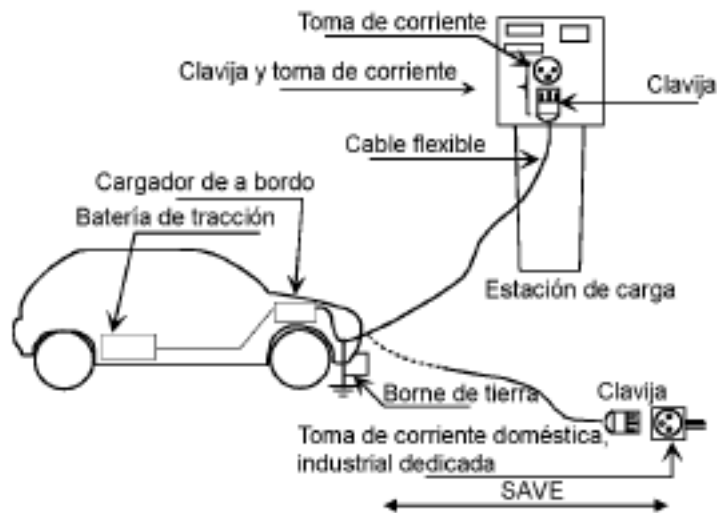


Figura33: Conexión tipo "A"

- **Método B:** conexión del vehículo a la red un cable de carga desmontable entre el conector del vehículo y la alimentación de corriente alterna. Utilizado para los modos de carga 1,2 y 3.

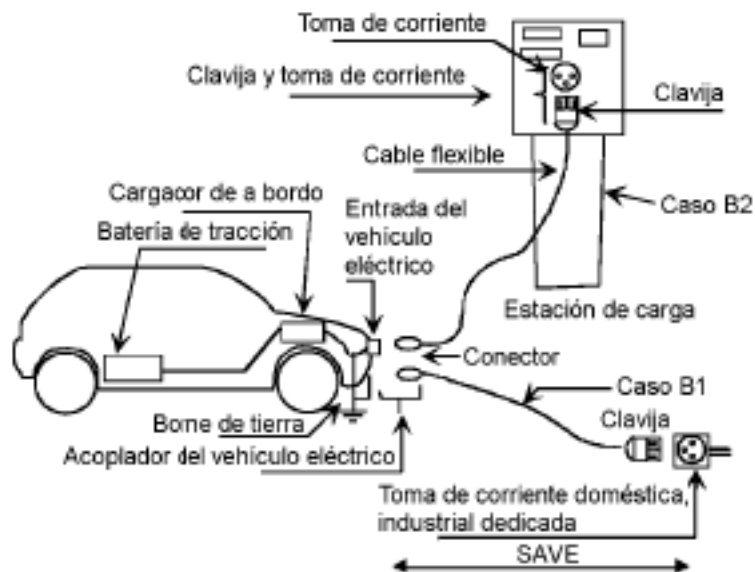


Figura 34: Conexión tipo "B"

- **Método C:** conexión del vehículo a la red usando un cable de alimentación y un conector del vehículo permanentemente unidos al equipo de alimentación. Único método compatible para el modo de carga 4.

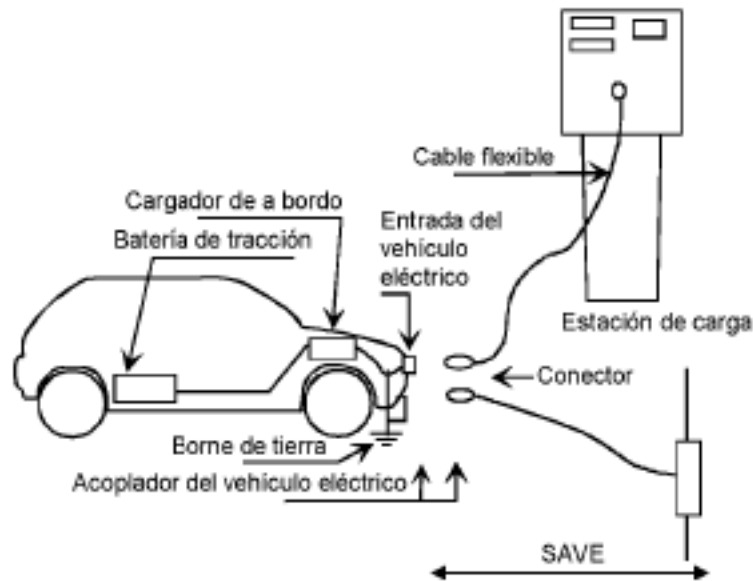


Figura 35: Conexión tipo "C"

- **Inducción Electromagnética:** Este tipo en realidad no utiliza ningún conector o cableado, ya que se trata de una recarga inalámbrica. La electricidad se transfiere mediante ondas, desde una bobina inductora situada en el suelo hasta la bobina secundaria del vehículo que ejerce de receptor. Es el método más cómodo de recarga, pero presenta el inconveniente de su menor eficiencia. Actualmente se está investigando para lograr mayor potencia de recarga y poder conseguir un sistema estándar de recarga para todos los fabricantes.

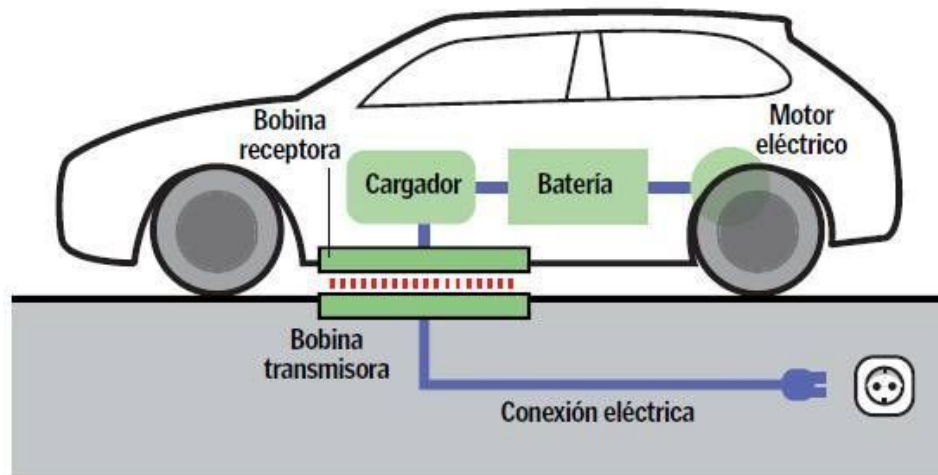


Figura 36: Conexión por inducción

4.3.6 Acoplador básico de vehículo

El acoplador contiene el circuito que une la clavija con el cargador del vehículo donde se realizan las funciones básicas descritas anteriormente. El circuito se alimenta con una fuente de baja tensión aislada de la red de suministro por un transformador y contiene el oscilador PWM.

El circuito está formado por 5 componentes, mostrados en los diagramas:

1. Contacto de fase
2. Contacto de neutro
3. Contacto de tierra de protección
4. Contacto de la función piloto
5. Contacto de detección de proximidad

A continuación se muestran algunos circuitos de ejemplo de acopladores para cada modo:

Acoplador Modo 1 caso B.

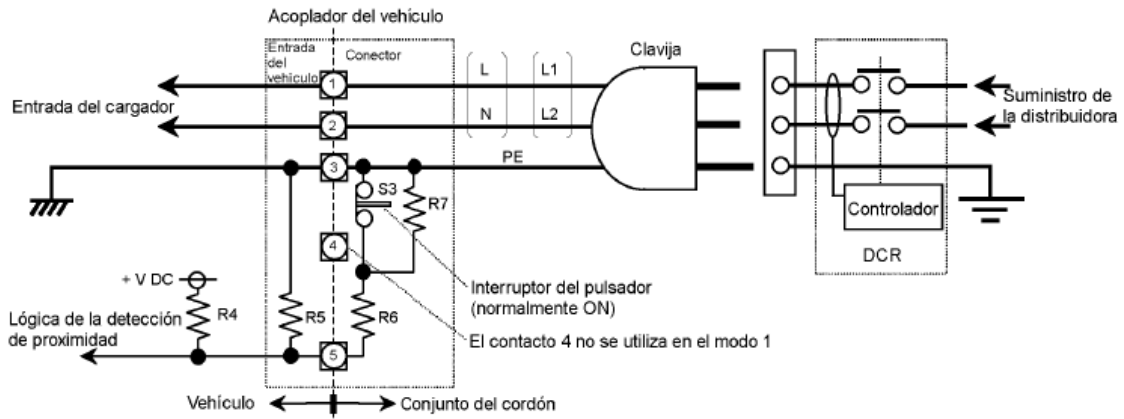


Figura 37: Acoplador Modo 1

Para este caso, ya que el Modo 1 de carga no dispone de función piloto, el contacto 4 no se utiliza.

Acoplador Modo 2 caso B.

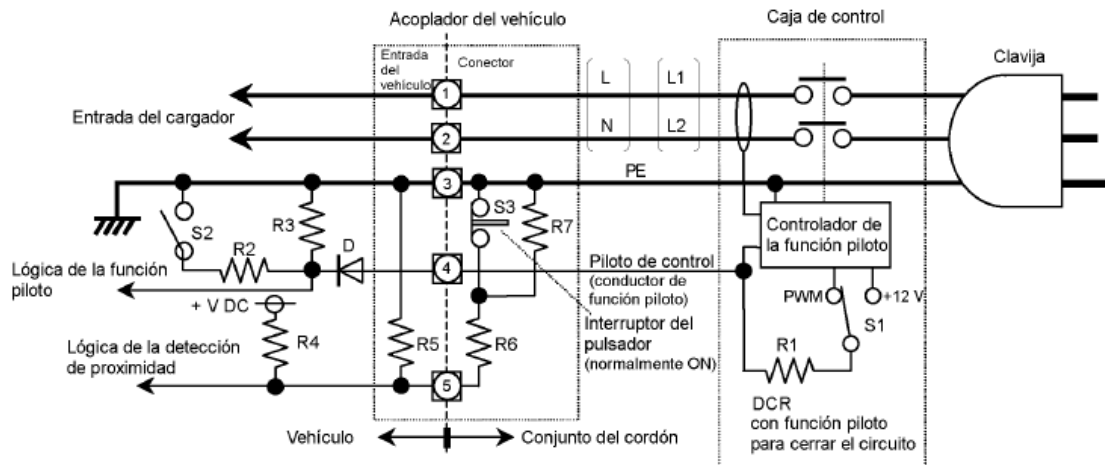


Figura 38: Acoplador Modo 2

Acoplador Modo 3 caso B.

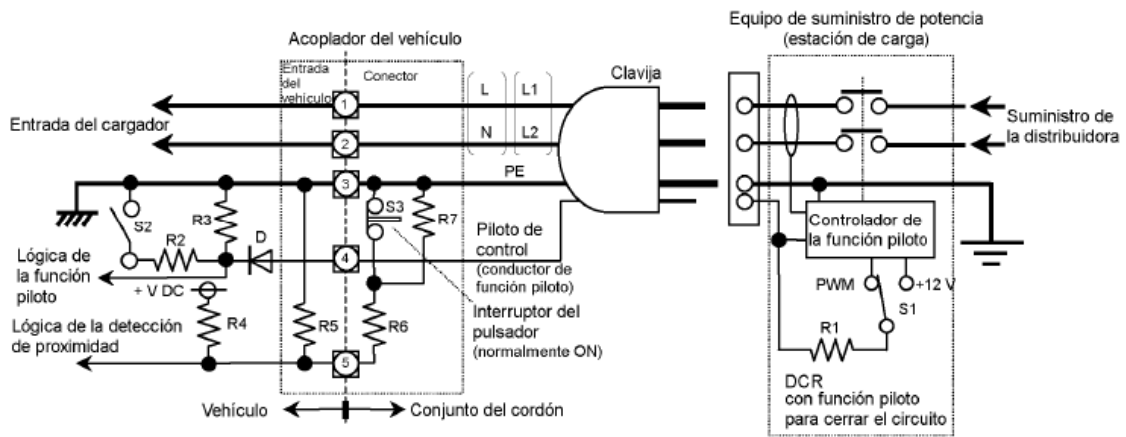


Figura 39: Acoplador Modo 3

Acoplador Modo 4 caso C.

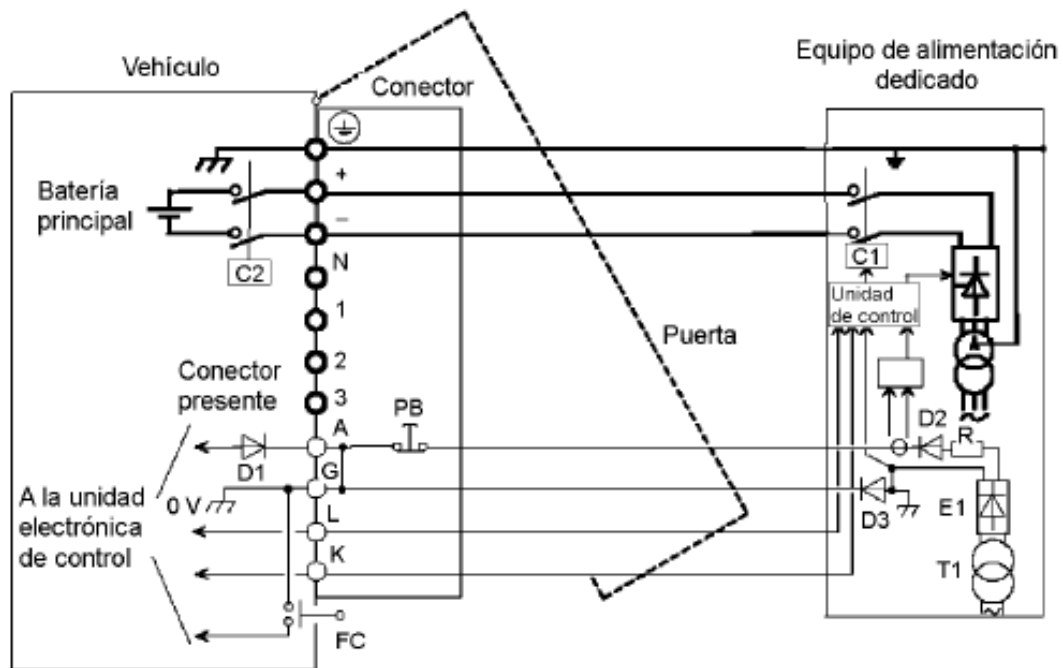


Figura 40: Acoplador Modo 4

El acoplador para el modo 4 difiere un poco de los anteriores, siendo solo compatible el caso C. Tiene algunos componentes extra que se indican en la siguiente tabla:

Referencia	Lista de componentes	Funciones/características
A	Contacto auxiliar	- detección del conector - arranque del cargador a bordo - Circuito piloto
BP	Liberación del bloqueo del conector	- Abre el circuito piloto
C1	Contacto principal del sistema de alimentación	- Cerrado en funcionamiento nominal
E1	Alimentación auxiliar	- Cerrado en funcionamiento normal
G	Contacto piloto	- Tierra para la detección del conector - Tierra para circuito piloto - Tierra de datos

Figura 41: Componentes acoplador modo 4

4.4 Freno regenerativo

La recuperación de energía en frenada es una expresión cada vez más escuchada entre los fabricantes. En concreto, el freno regenerativo se puede resumir en un sistema de frenado aplicable a cualquier vehículo cuya función es transformar la energía cinética del vehículo en energía eléctrica.

El sistema de freno regenerativo permite lo que se conoce como “conducción a un solo pedal” usando dicha frenada al levantar el pie del acelerador. Tradicionalmente en los coches de combustión no es posible, ya que el sistema de frenado es totalmente independiente; pero en los vehículos eléctricos, se pueden utilizar las fuerzas magnéticas del motor para frenar el coche, recuperando además parte de la energía que se pierde frenando. Cabe destacar que esto no sustituye por completo al sistema tradicional, el cual debe ser instalado en todos los vehículos (ya que la frenada no es tan potente), pero permite usarlos en menor medida y ahorrar en mantenimiento de frenos hidráulicos.

En otros casos el vehículo mezcla ambos sistemas de frenado y cuando se pisa el pedal del freno el sistema controla la coordinación entre el freno hidráulico y el freno regenerativo dando prioridad a este último si no se ve con la necesidad de frenar con más intensidad.

Estos sistemas son particularmente efectivos en recuperar energía cuando se circula por ciudad, donde se producen aceleración y deceleraciones frecuentes. El esquema general se muestra a continuación:

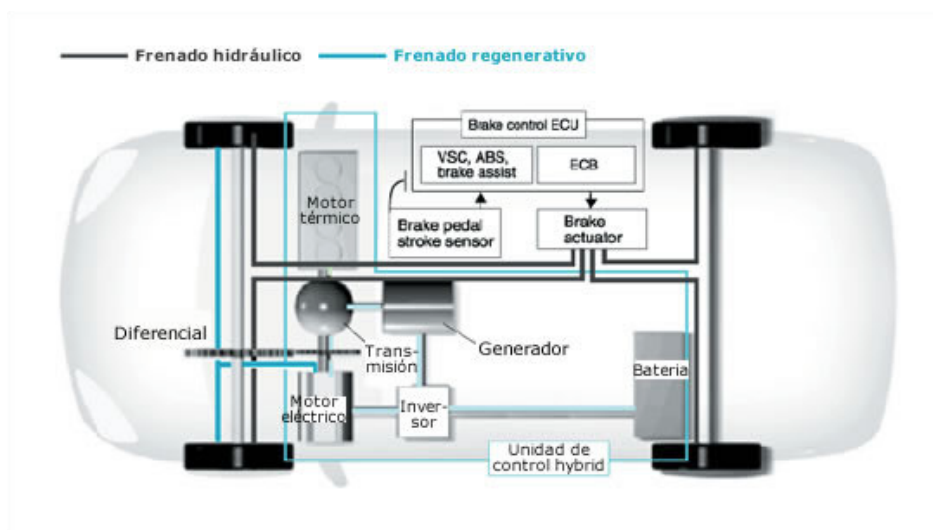


Figura42:Esquema Freno Regenerativo

En resumen, el freno regenerativo aplicado a un vehículo eléctrico corresponde al funcionamiento del motor como generador y la energía eléctrica generada en el proceso aprovecharla para recargar las baterías del vehículo. El modo de poner el motor como generador varía en función del tipo de motor usado:

4.4.1 Generador Síncrono

Cuando el conductor levanta el pie del acelerador es la señal para pasar a modo generador y, en este caso, el controlador deja de enviar electricidad al estator, desapareciendo así el campo magnético giratorio. En cambio, el rotor sigue conservando el campo magnético y al girar aprovecha la inercia del vehículo para inducir corriente en el estator. Si se tiene control de la intensidad del campo magnético del rotor, cuando aumenta éste se crea una

mayor resistencia que mejora la frenada y la intensidad de corriente. El controlador convertirá esa corriente a CC y por el mismo circuito almacena la energía en la batería.

4.4.2 Generador asíncrono

Un motor asíncrono se encuentra en la región de generador cuando la velocidad del motor es mayor a la síncrona, es decir, cuando el deslizamiento es menor a cero. Esto implica que el torque desarrollado sea negativo y actúe en dirección inversa al campo magnético. El estator del motor se encuentra inicialmente girando a una velocidad dada por la frecuencia de sincronismo y el rotor a una velocidad entre N_{r0} y N_{s0} . Si la frecuencia del estator decrece (el vehículo decelera, N_{s1}), la velocidad del rotor apenas ha variado debido a su inercia, girando éste por lo tanto a una velocidad mayor que el estator y provocando un deslizamiento negativo que alimenta a la fuente conectada al estator, la batería.

$$N_{r0} > N_{s1}$$

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \rightarrow S < 0$$

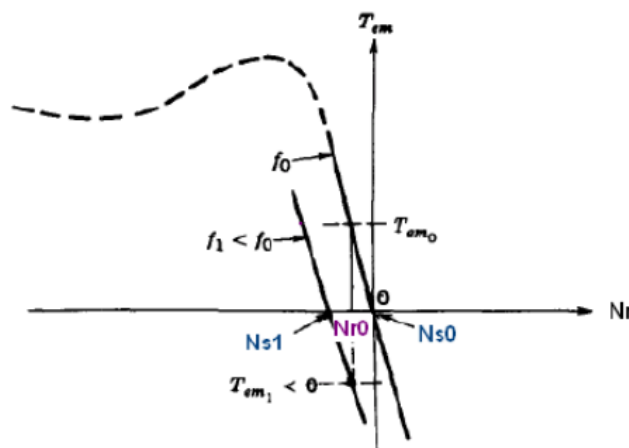


Figura 43: Generador asíncrono

En la práctica la frecuencia de sincronismo no puede reducirse muy rápidamente porque puede provocar picos de corriente muy elevados que pueden dañar el sistema, por lo tanto el controlador debe de ser capaz de controlar dicha energía.

Capítulo 5 – CONTROL DE VELOCIDAD Y ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Los motores de los vehículos eléctricos son su sistema de propulsión, por lo tanto, deben de funcionar a distinta velocidad. Para ello, estos vehículos llevan sistemas electrónicos que controlan la velocidad en función de las condiciones y deseos del conductor. Los sistemas de variación dependen del tipo de motor que se utilice, modificando ciertas características de alimentación para situarlos al régimen deseado.

5.1 Motores Asíncrono

Las técnicas de control para motores asíncronos se pueden clasificar en dos categorías generales:

5.1.1 Control Escalar

Es una de las técnicas más utilizadas en los vehículos eléctricos con motores de inducción. Un método simple para cambiar la velocidad es variar la frecuencia de alimentación del estator, pues ésta cambia la velocidad de sincronismo y, por consiguiente, la velocidad mecánica del rotor.

$$n_s = \frac{120 \times f}{2p} \times (1 - s)$$

Donde:

n_s Rotación del eje del rotor.

f Frecuencia (Hz).

p Número de polos.

s Deslizamiento.

Sin embargo, habría que tener en cuenta que el flujo magnético en el entrehierro es directamente proporcional a la F.E.M. inducida e inversamente proporcional a la frecuencia. Por consiguiente, una reducción de la frecuencia de alimentación produce un aumento del flujo magnético. Para evitar la saturación del núcleo al incrementarse el flujo magnético hay que mantener la relación $\frac{E}{f}$ constante. Es decir, si disminuimos la frecuencia (f) de sincronismo tendremos que aumentar la F.E.M (E) inducida para mantener constante el flujo magnético.

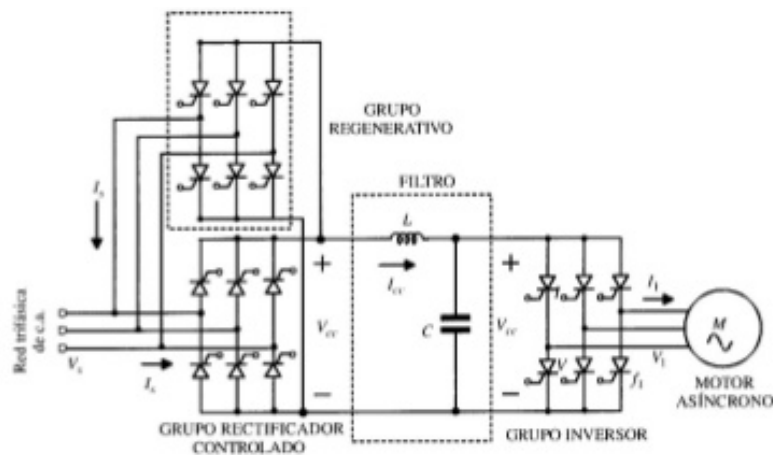


Figura 44: Regulación de velocidad por control V/f

En la práctica se utilizan dos convertidores: un grupo rectificador controlado y un inversor. El rectificador controlado primero transforma la tensión trifásica a CC para así regular la tensión que llega al inversor, modificando el ángulo de disparo de los tiristores. La técnica para variar la frecuencia es mediante una modulación por ancho de pulso (PWM) aplicada a las puertas del inversor. Mediante el control escalar se puede realizar un control satisfactorio en lazo abierto, sin muchos requerimientos de la velocidad, cuando la aplicación requiere una respuesta dinámica más rápida es necesaria aplicar un control en lazo cerrado

5.1.2 Control Vectorial

Las técnicas de control vectorial permiten desacoplar las variables de control para mejorar la respuesta dinámica del motor. La finalidad de la modulación vectorial es lograr un control lineal, independizando la corriente que produce el flujo magnético con la corriente que produce el par del motor. Para lograr esto, debido a que las máquinas asíncronas no poseen dos bobinados desacoplados, se recurre a crear una referencia circuital ficticia que transforma el sistema trifásico de corrientes estacionarias en un sistema bifásico de corrientes en cuadratura rotatorio, que gira sincrónicamente con el campo magnético. Aunque los modelos están basados en motores de inducción también pueden ser utilizados sobre motores síncronos.

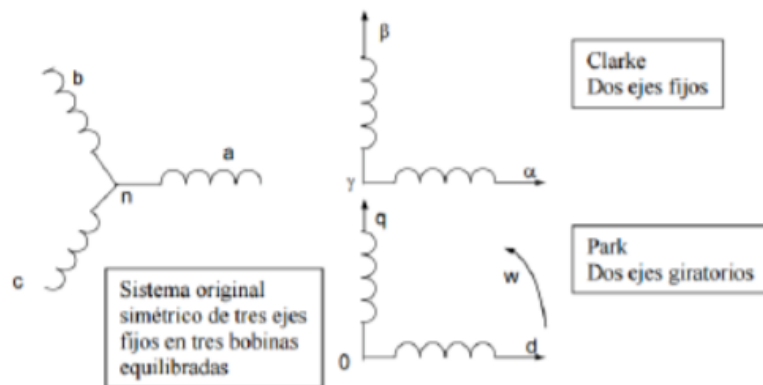


Figura 45: Transformación del sistema trifásico en bifásicos equivalentes

Para este tipo será necesario conocer con exactitud la posición del fasor de flujo magnético en el entrehierro, por lo que se necesitará una señal de retroalimentación del mismo flujo. Existen dos métodos:

- **Control vectorial directo:** se mide a través de sensores de efecto Hall, bobinas en el estator, o bien se estima a partir de un modelo del motor.

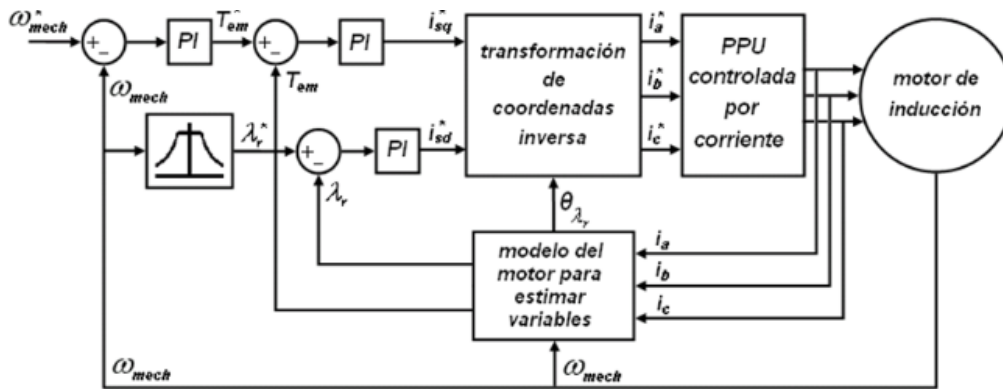


Figura 46: Control vectorial directo

- **Control vectorial indirecto:** se prescinde de medir o estimar el flujo. Se realiza imponiendo desde el control el valor de flujo y par. El cálculo del controlador se realiza a partir de los parámetros del motor y la posición instantánea que se mide con un *encoder* situado en el rotor.

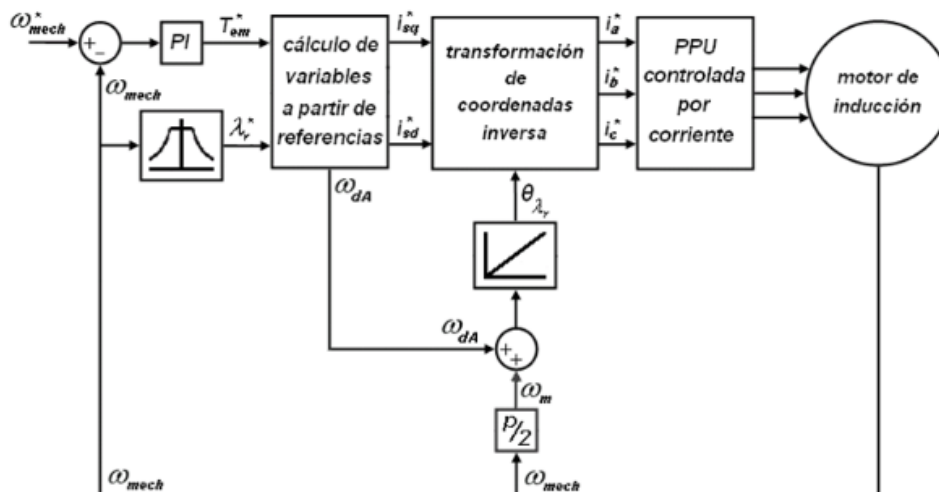


Figura 47: Control vectorial indirecto

- **Control directo de par (DTC):** Este sistema supone una mejora dentro del control vectorial donde se consigue una respuesta del par de la máquina más rápida. No se necesita transformación de coordenadas estacionarias a rotatorias, ni una técnica de PWM. La idea básica del DTC es calcular los valores instantáneos del par y flujo a partir de las variables del estator. El par y flujo se controlan

directamente y de forma independiente, mediante los estados de conmutación del inversor y limitando los errores mediante controladores de histéresis.

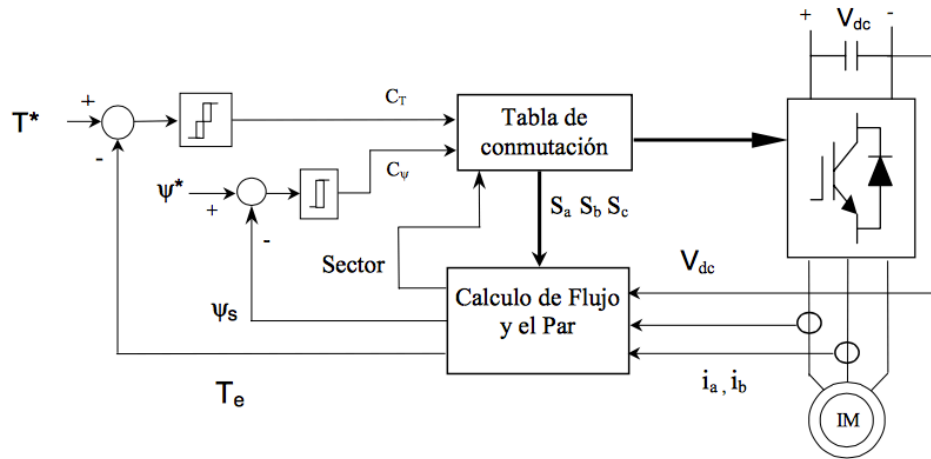


Figura 48: Control directo de par

El par se controla con la rotación del flujo del estator utilizando estados de conmutación y al mismo tiempo se controla la magnitud del vector del flujo del estator de la misma forma. Los valores de par y flujo calculados se comparan con sus consignas, cuyo error al pasar por los controladores de histéresis da un resultado de señales lógicas de valores +1,0,-1.



Figura 49: Controlador del flujo y controlador del par

El resultado se aplica a la tabla de conmutación eligiendo uno de los ocho estados posibles del vector de la tensión del inversor.

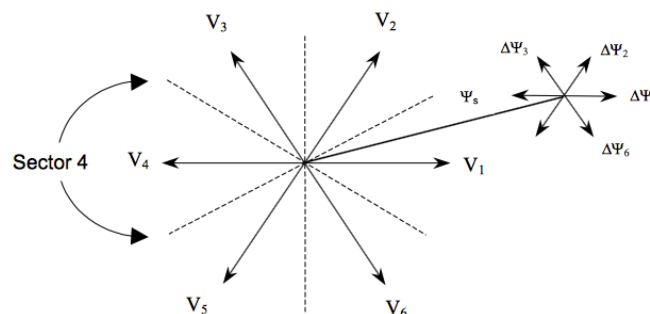


Figura 50: Variación del flujo estático en el sector (1)

Como resumen del efecto de cada estado se muestra la siguiente tabla:

Vector tensión	$\Delta\psi_s$	ΔT_e
V_1	++	-
V_2	+	+
V_3	-	++
V_4	--	+
V_5	-	-
V_6	+	--
$V_0 - V_7$	0	-

Figura 51: Influencias de los vectores espaciales de la tensión sobre el flujo y par. Par en Sector 1

5.2 Motores síncronos

El sistema más sencillo para cambiar la velocidad del motor síncrono es modificando la frecuencia de alimentación, ya que la velocidad de rotación coincide con la de sincronismo. Para cada frecuencia, la velocidad del motor permanecerá constante.

Para este sistema existen dos métodos:

5.2.1 Control en lazo abierto

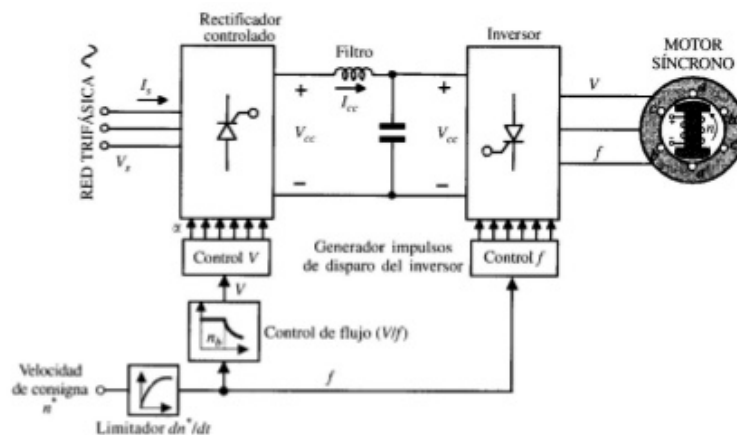


Figura 52: Control en lazo abierto

El circuito básico de control es muy similar al empleado en los motores de inducción. Contiene un rectificador (control en tensión) controlado justo en la entrada de la línea el cual alimenta al bus de CC para finalmente mediante un inversor (control en frecuencia) alimentar el motor. El control de los convertidores se realiza por medio de pulsos PWM en relación a la velocidad de consigna que se aplique. Al igual que sucedía en el motor de inducción, es necesario realizar un control de flujo Tensión-frecuencia para mantener el flujo magnético constante y en consecuencia el par.

5.2.2 Control en lazo cerrado (auto-pilotado)

Para evitar los casos en los que el motor pierde el sincronismo provocado por cambios bruscos de par se opta por una mejor solución de control mediante la regulación de lazo cerrado o con realimentación.

Midiendo el movimiento del rotor mediante un *encoder*, se utiliza este dato para corregir la frecuencia aplicada al estator y se conserve el sincronismo de la nueva frecuencia aplicada. De este modo, la velocidad del rotor corrige automáticamente la frecuencia del estator, el esquema del circuito básico se muestra a continuación:

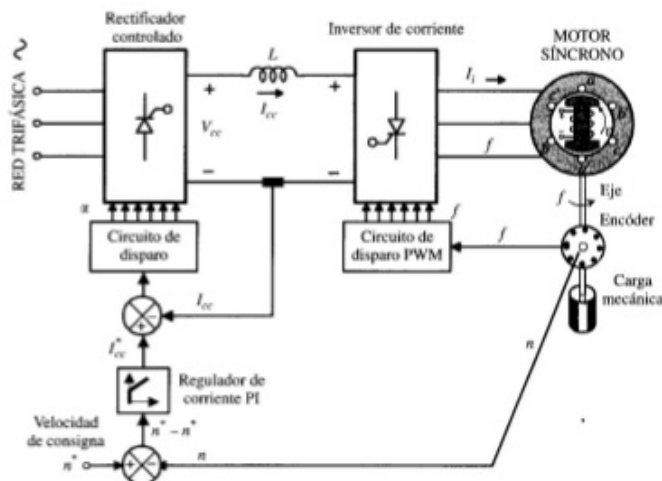


Figura 53: Control en lazo cerrado

El circuito contiene los mismos elementos que en lazo abierto, un rectificador y un inversor, pero difiere en forma de control de los mismos. Ahora la señal del *encoder* es utilizada directamente para el control en frecuencia del inversor y no por medio de la consigna de entrada. Dicho dato también se utiliza para calcular el error con la entrada y mediante un control PI generar la señal de disparo en el rectificador.

Capítulo 6 – MODELO EN MATLAB

6.1. Introducción

Sobre un modelo creado para *Matlab* se realizará un análisis del funcionamiento de un vehículo híbrido paralelo, donde el motor térmico y el eléctrico pueden funcionar independientemente en función del requerimiento que vea oportuno el sistema de control. El sistema está dividido por módulos que contienen sus correspondientes bloques según cada función.

El modelo completo sería el siguiente:

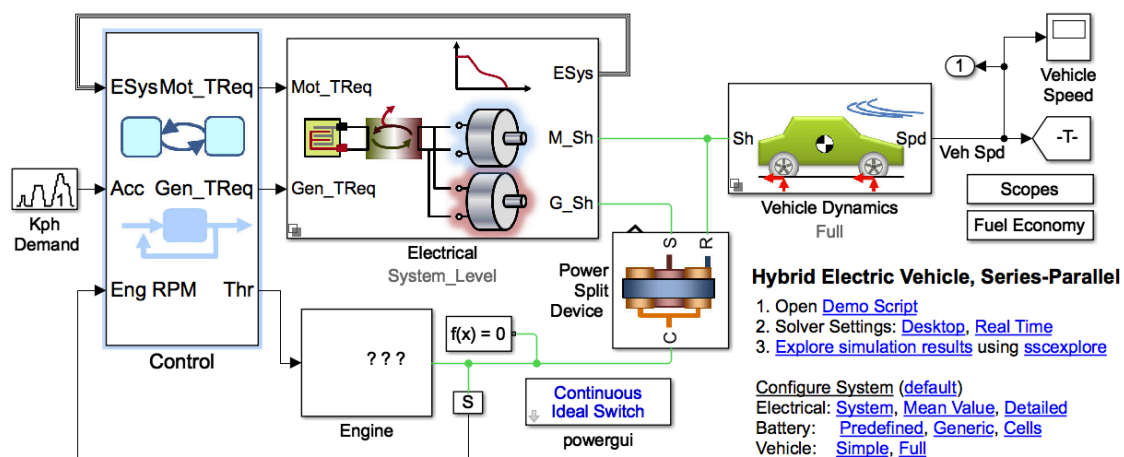


Figura 54: Modelo completo en Matlab

Los bloques principales del sistema son:

- Bloque de control
- Bloque con los sistemas eléctricos
- Motor combustión interna
- Repartidor de potencia
- Bloque con las dinámicas físicas del vehículo.

Aparte de estos modelos, el sistema se completaría con osciloscopios con los que observar los resultados y una consigna de velocidad para simular condiciones de la conducción.

6.2 Descripción del modelo

Para que el sistema trabaje correctamente cada uno de los bloques realizará unas funciones que darán como resultado las variables necesarias. Estos bloques pueden analizarse de forma independiente para comprender posteriormente el funcionamiento del sistema completo.

6.2.1 Bloque de control

Este bloque es el encargado de analizar las variables del vehículo y gestionar las órdenes necesarias a cada sistema.

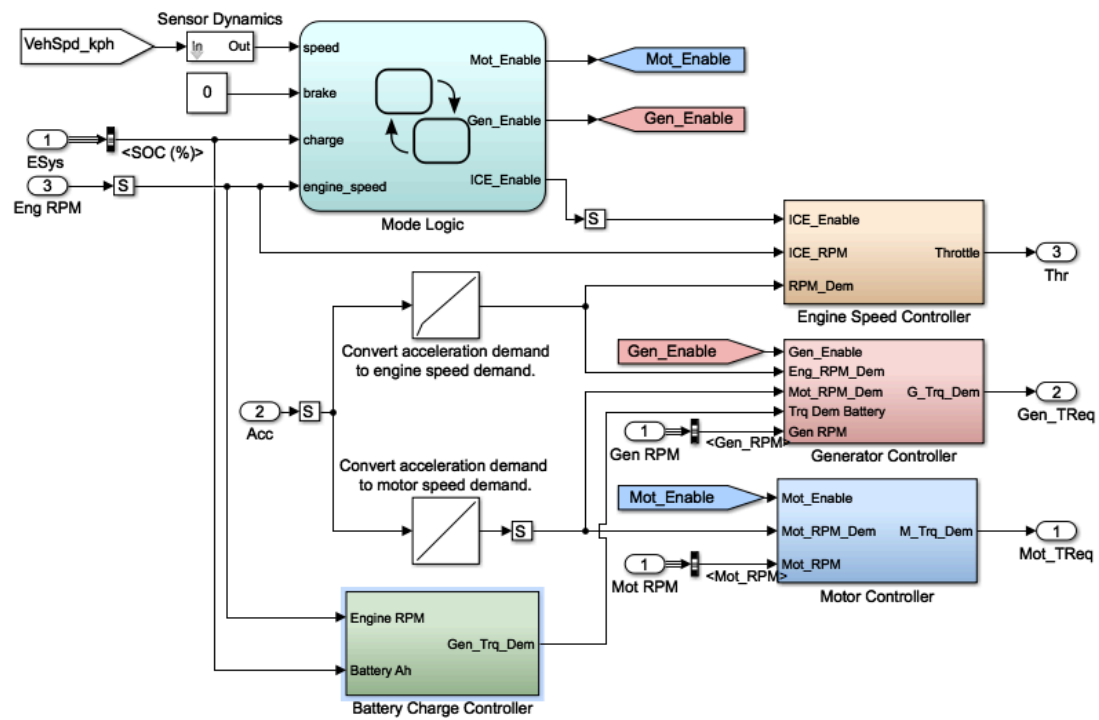


Figura 55: Bloque de control

Para ello, necesita un bloque con la lógica suficiente para tomar cada decisión. Este bloque corresponde con *Mode logic*, que mandará las órdenes de activación a los motores, generadores y el sistema de carga de la batería.

La máquina de estados del bloque es la siguiente:

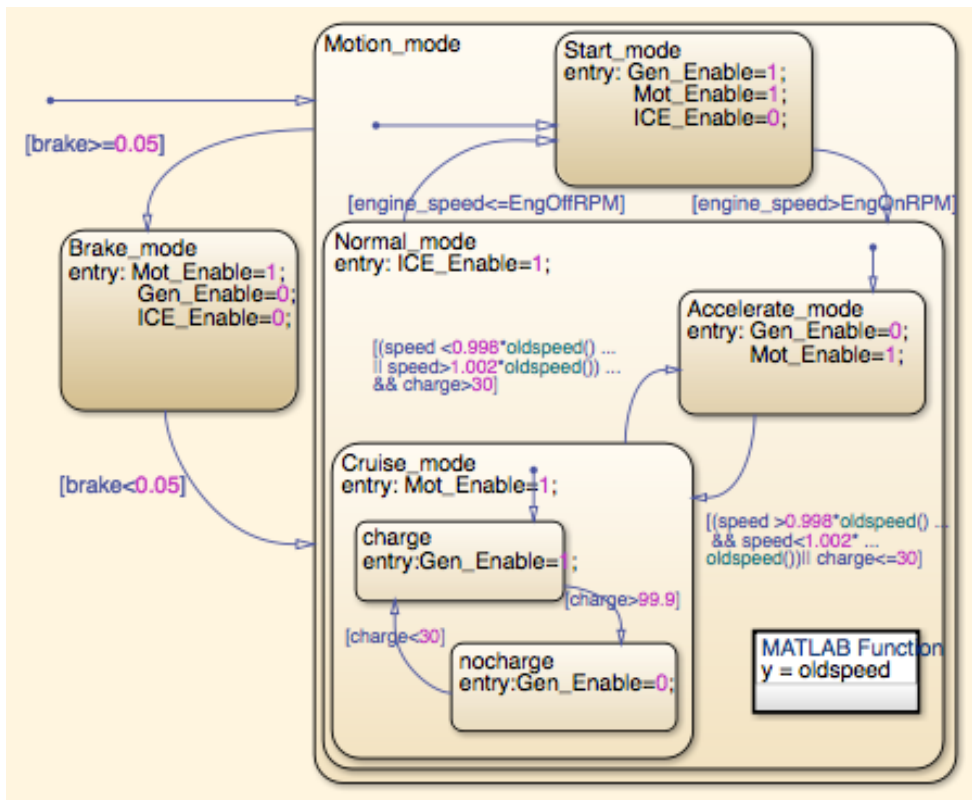


Figura 56: Mode Logic

La máquina de estados es gestionada con las siguientes variables en cada modo:

- **Velocidad (*speed*):** corresponde con la velocidad del vehículo. La máquina de estados determina qué modo de funcionamiento se encuentra. En función de su valor se alternará entre los modos *Accelerate_mode* y *Cruise_mode*. Si se exigen una aceleración el vehículo se impulsará con los dos motores. En cambio, si hay que mantener una velocidad constante, se podrá utilizar el modo generador y recargar la batería.
- **Freno (*brake*):** corresponde con el nivel de frenada del vehículo, cuando tiene un valor positivo entra en *Brake_mode*. Se ajusta un valor para aumentar el freno motor.
- **Carga de la batería (*charge*):** nivel de carga de la batería, utilizada para no sobrecargar la misma cuando está en modo carga.

- **Revoluciones motor combustión interna (*engine_speed*):** variable importante que se utiliza para gestionar cuando comienza a funcionar el motor de combustión interna. Cuando el valor es superior a *EngOnRPM*, se enciende el motor y entra en el modo *Normal_mode*. Cuando el vehículo circula a bajas RPM el motor térmico se mantiene apagado, funcionando el motor eléctrico y el generador. Esto se corresponde con el modo *Start_mode*.

El comportamiento a nivel gráfico del sistema de control se muestra a continuación:

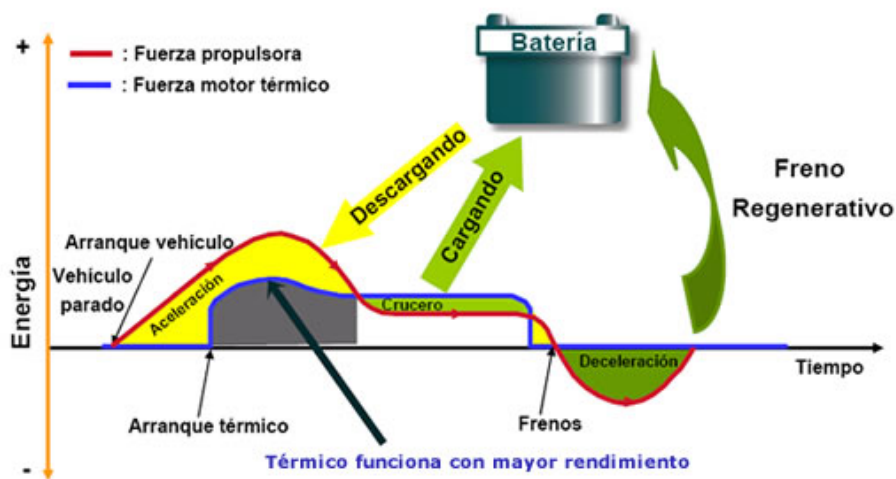


Figura 57: Gráfica de funcionamiento de control del vehículo

Las señales de salida de la máquina de estados activarán los controladores de los motores en el momento adecuado :

- **Engine Speed Controller:** controla las funciones del motor de combustión. El nivel del acelerador a la salida viene determinado primero por si está activo el controlador, y también por las RPM actuales y las demandadas por el conductor y condiciones del terreno.

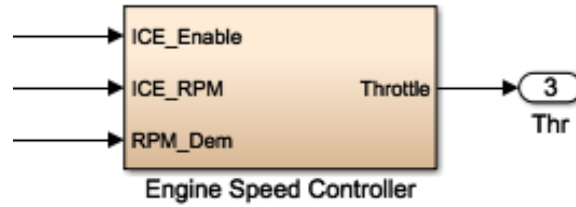


Figura 58: Controlador motor de combustión

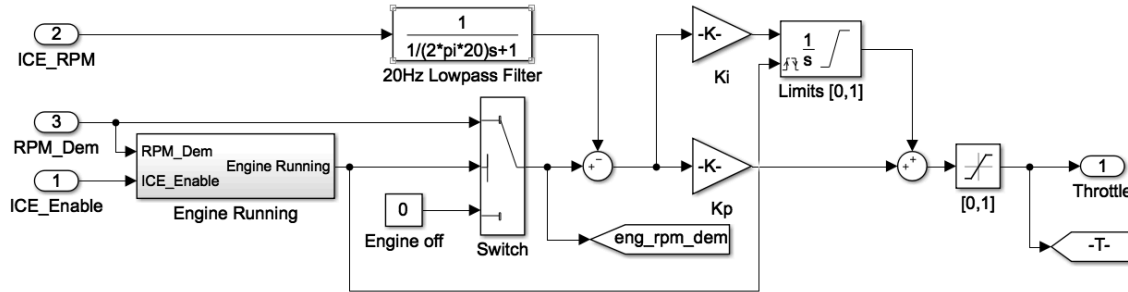


Figura 59: Modelo del controlador del motor de combustión

El modelo en términos generales genera una cantidad de aceleración mediante una “comparación” entre las revoluciones actuales del motor y la demanda exigida. El resultado corresponde con la diferencia de ambas. Las revoluciones por debajo de 800 rpm se consideran nulas.

- **Generator Controller:** controla las funciones del generador eléctrico. La habilitación del bloque determina si está activo. Influyen en el control del generador las RPM demandadas, tanto las del motor de combustión como las del eléctrico para determinar el torque requerido por generador. En función de la carga de la batería se determina la resistencia que debe ejercer el generador para cumplir los requerimientos de carga. Por último, las revoluciones actuales del generador.

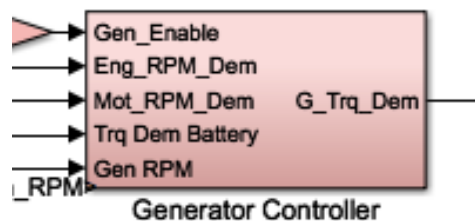


Figura 60: Controlador del generador

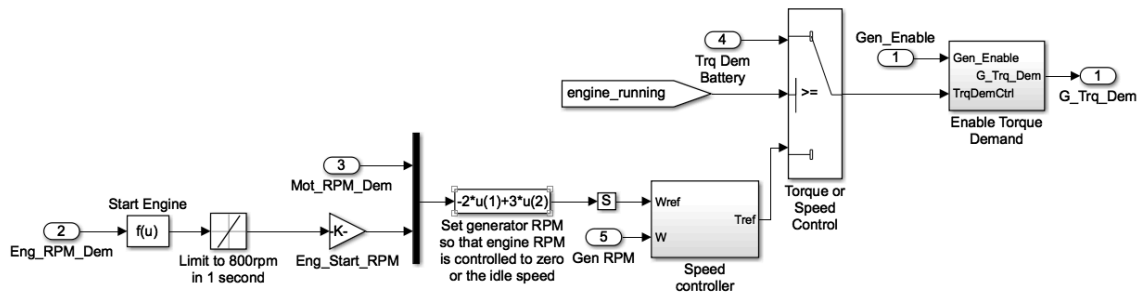


Figura 61: Modelo del controlador del generador

El controlador establece dos criterios. El primero y más sencillo aplica el torque demandado por la batería (*Trq Dem Battery*) cuando el motor de combustión se encuentra encendido. El segundo, mediante la diferencia entre las revoluciones demandadas por el generador (teniendo en cuenta un valor mínimo y relanti) y las actuales, si esa diferencia es positiva da paso también a *Trq Dem Battery*. Todo esto solo será aplicado si la señal *Gen_Enable* está activa.

- **Motor Controller:** controla las funciones del motor eléctrico. Para determinar el torque requerido por el motor se utilizan las variables de RPM del motor y las demandadas por las condiciones del terreno y conductor.

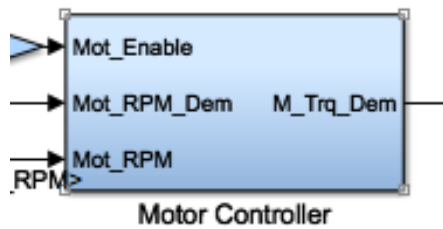


Figura 62: Controlador motor eléctrico

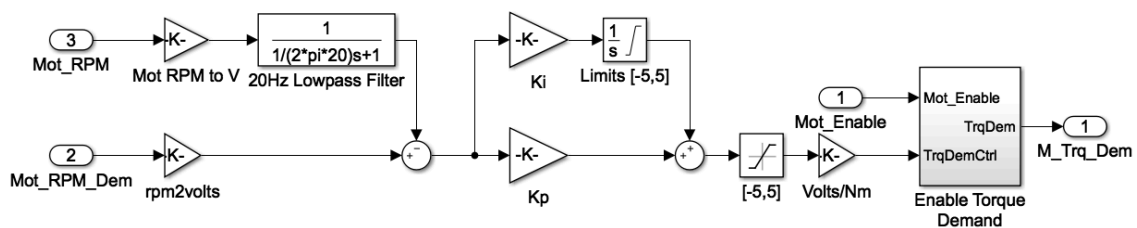


Figura 63: Modelo del controlador del motor eléctrico

Establece una retroalimentación con las revoluciones del motor, calculando el error con la demanda de velocidad establecida. El lazo tiene un valor máximo de 5 voltios que corresponde a unas revoluciones demandadas de 6500 rpm.

- **Battery Charge Controller:** este módulo no es habilitado por la máquina de estados, pero determina por medio de la carga de batería y las revoluciones del motor de combustión la resistencia que deberá ejercer el generador para cargar la batería de forma eficiente.

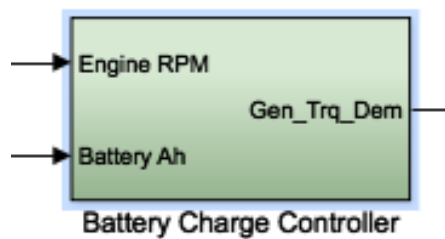


Figura 64: Controlador de carga de la batería

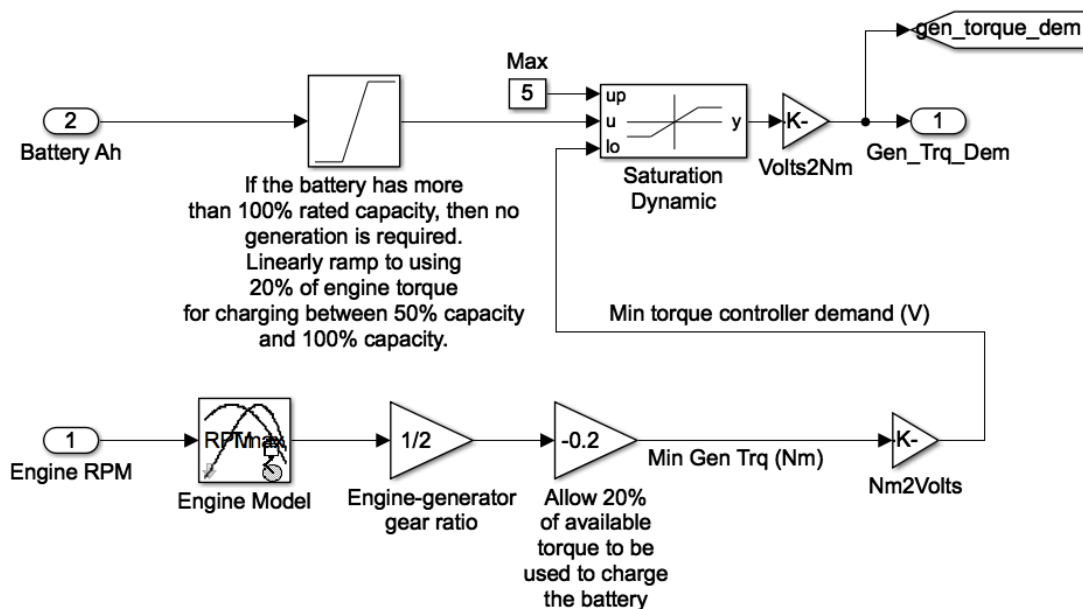


Figura 65: Modelo del controlador de carga

Mediante un sistema de saturación con un nivel bajo dinámico establecido por el 20% del torque generado por el motor de combustión y cuyo nivel superior es fijo a 5V, se fija el

nivel de torque más adecuado para el generador (Gen_Trq_Dem). Cuando la batería tiene el 100% de carga no se requiere generación.

6.2.2 Sistema eléctrico de propulsión

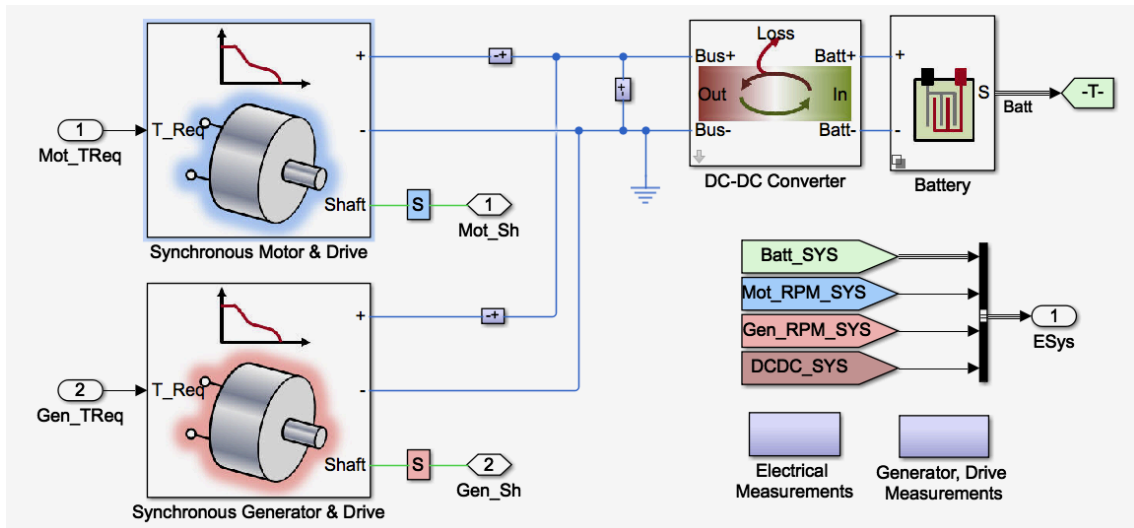


Figura 66: Esquema de propulsión eléctrica

El bloque contiene los modelos del motor y generador síncronos que disponen de un sistema de control vectorial usando como referencia las señales Mot_TReq y Gen_TReq que proceden del módulo de control comentado anteriormente.

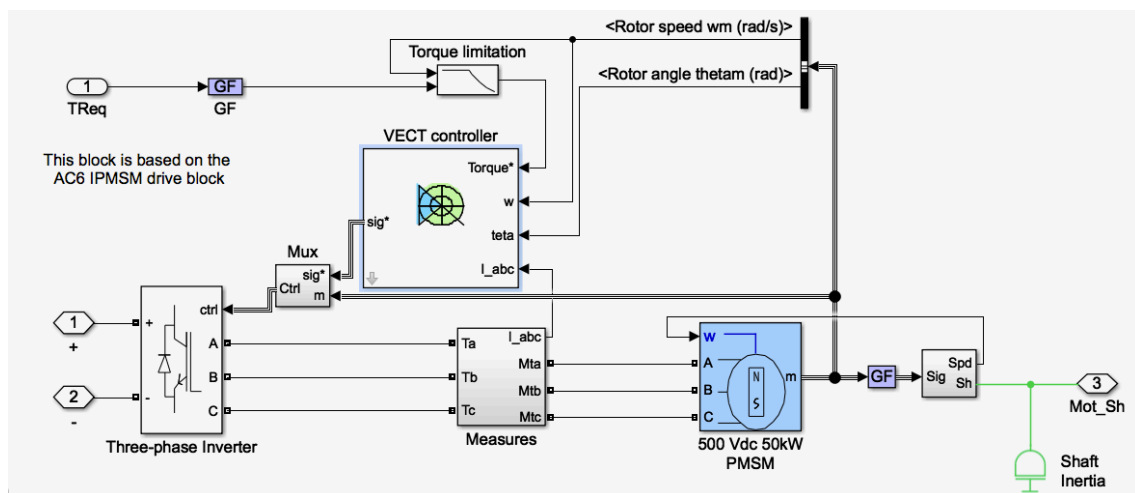


Figura 67: Modelo Motor Síncrono

Contiene el inversor trifásico de la tensión del DC-BUS mediante un control vectorial. Se alimenta un motor síncrono de imanes permanentes de 500 Vdd y 50 kW.

El bloque *DC-DC Converter* es el encargado de ofrecer la carga eléctrica desde la batería al motor o viceversa, si está en funcionamiento el generador.

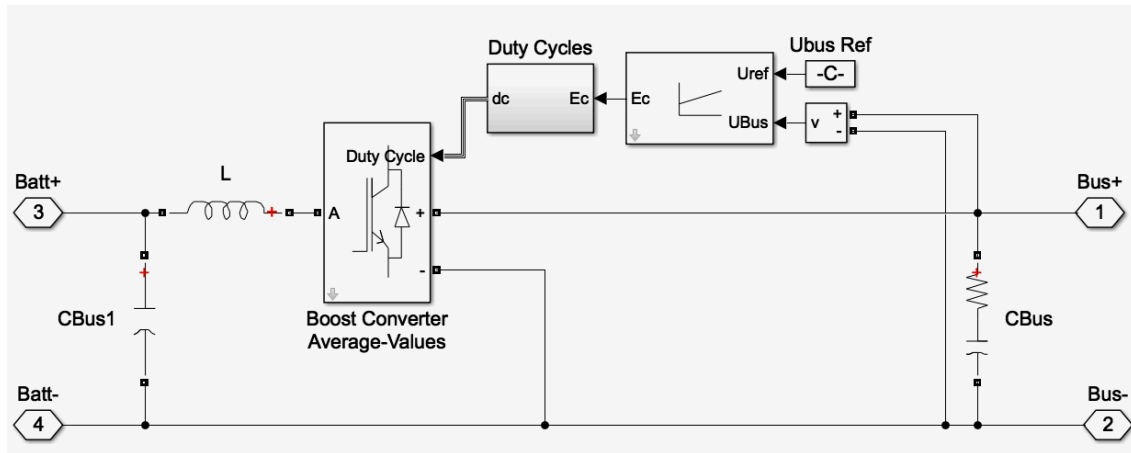


Figura 68: Modelo Convertidor DC-DC

Corresponde con un convertidor elevador (Boost) para aumentar la tensión de 230V de la batería a los 500V que requiere el motor eléctrico. El control se realiza en función del DC- Bus de la batería y un valor de referencia, modificando el ciclo de trabajo mas adecuado para la señal de disparo de los IGBTs.

6.2.3 Repartidor de potencia

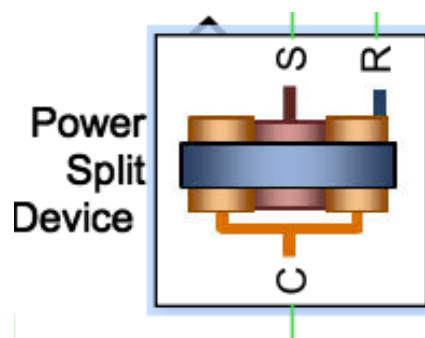


Figura 69: Repartidor de potencia

Es el encargado de distribuir la potencia en el vehículo. Recibe la potencia del motor eléctrico, motor térmico y generador. Contiene un engranaje planetario (*Planetary Gear*) de dos grados de libertad como muestra la figura 41, donde el movimiento viene determinado por dos elementos, bloqueando el tercero de ellos. Los elementos principales de este engranaje son:

- **Planeta:** elemento central, conectado a un eje.
- **Corona:** elemento exterior que puede bloquearse mediante un freno
- **Satélites:** elementos intermedios montados libres sobre el portasatélites, que a su vez están conectados a sus propios ejes.

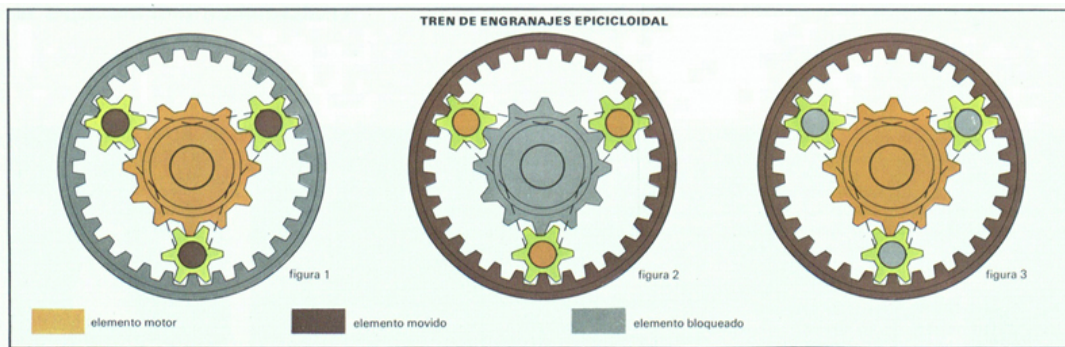


Figura 70: Engranaje planetario de dos grados de libertad

En el vehículo el generador está conectado al planeta, el motor eléctrico a la corona y el motor de combustión a los satélites como se muestra a continuación:

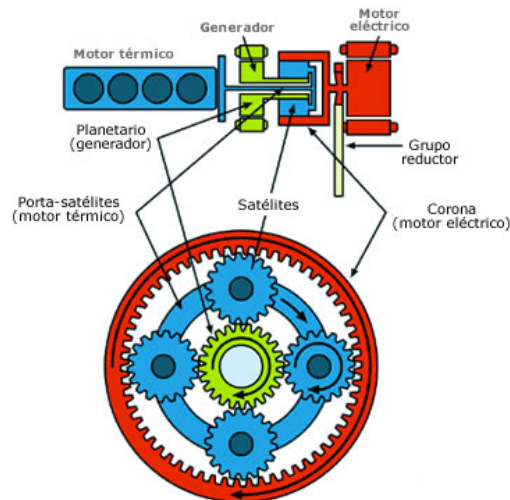


Figura 71: Conexión de la transmisión

6.2.4 Dinámica del vehículo

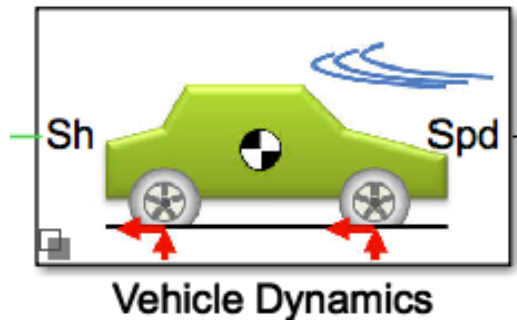


Figura 72: Bloque de dinámica del vehículo

Es el bloque que simula un modelo real para determinar el comportamiento de un vehículo sujeto a las leyes de la mecánica, tales como la masa, aerodinámica o inercia del mismo.

6.3 Simulación

Para comenzar la simulación, primero se necesita un modelo de velocidad de consigna que establezca ciertas condiciones de circulación y observar cómo se comporta el sistema para cumplirse. Se realizarán varias curvas de velocidad para verificar resultados en condiciones especiales, pero para verificar el correcto funcionamiento a nivel global se empleará la siguiente curva:

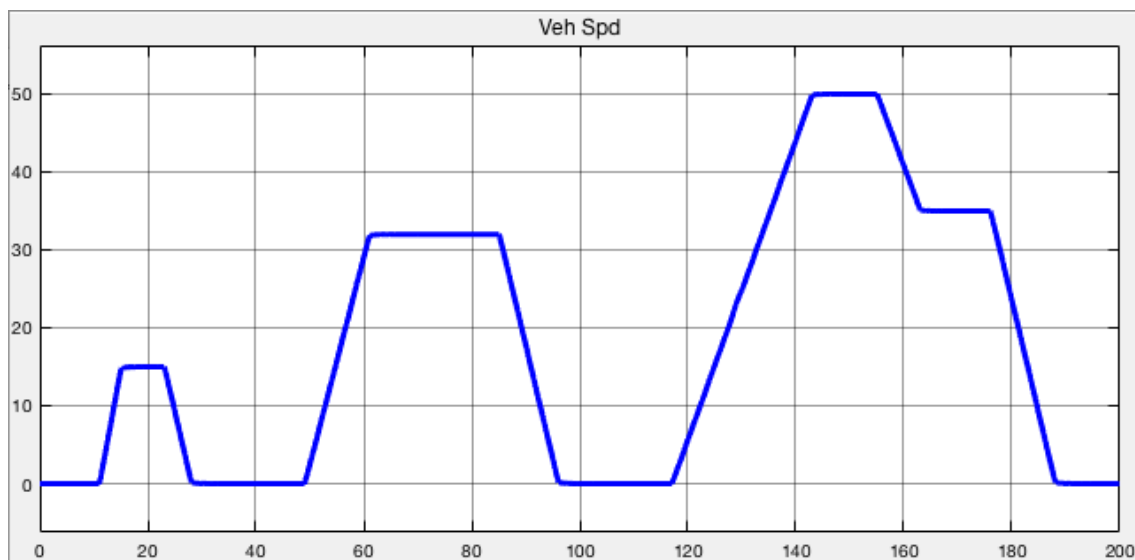


Figura 73: Curva de velocidad

Se simulará en unas condiciones no muy exigentes estableciendo tres aceleraciones cada vez más pronunciadas y con un nivel constante en sus puntos de máxima velocidad. Se comenzará con el vehículo exclusivo eléctrico seguido de un vehículo híbrido y compararán los resultados.

6.3.1 Vehículo Eléctrico

El modelo de este sistema se simplificará mucho debido a que la parte de control se mantiene en un mismo estado con el motor eléctrico y generador activados sin tener en cuenta las RPM del motor. Por ello, el análisis se centrará en un estudio energético.

Según el consumo eléctrico de los elementos involucrados:

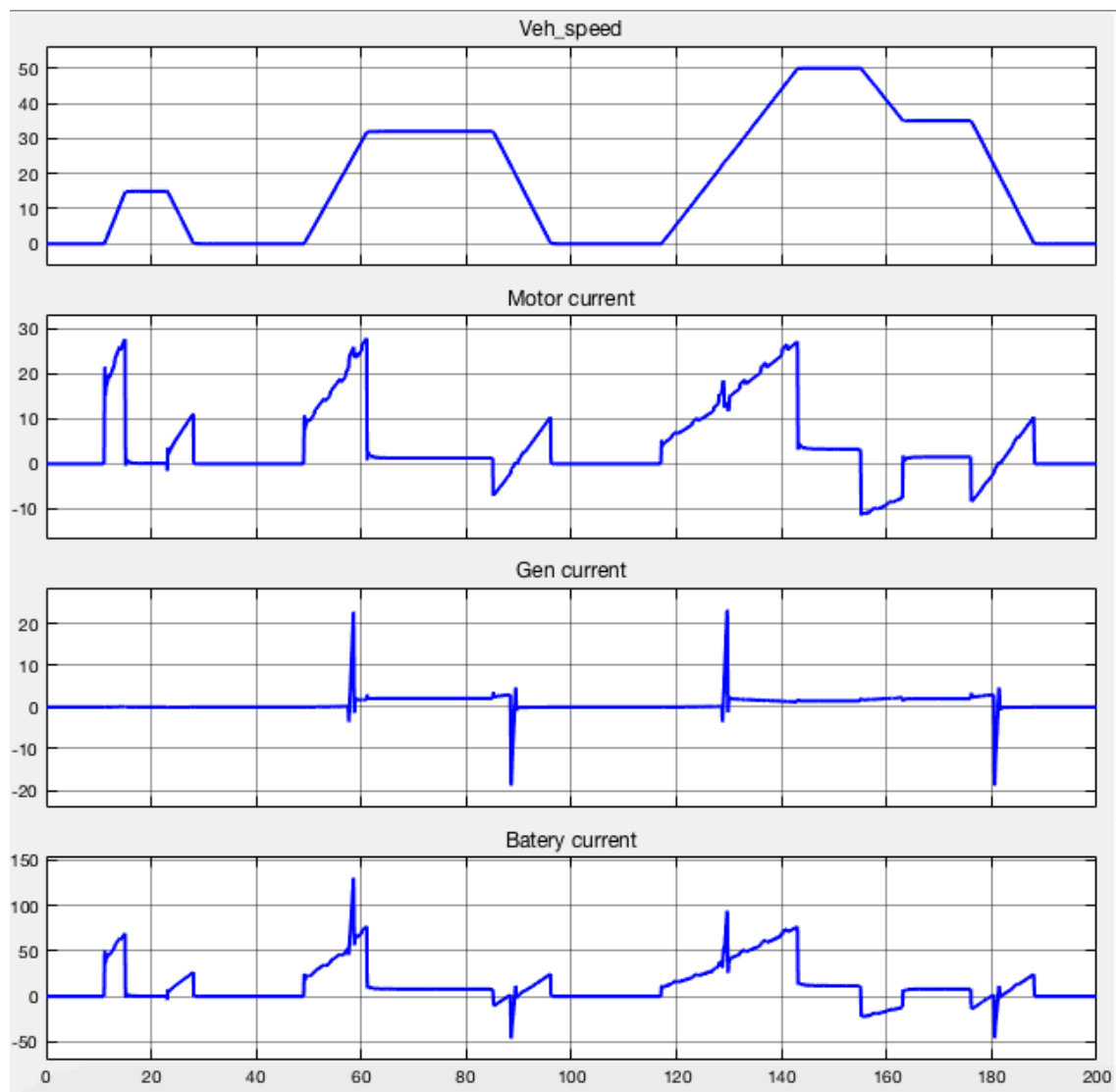


Figura 74: Corrientes vehículo eléctrico

Durante las aceleraciones el motor debe realizar el mayor esfuerzo. Para ello, exige el mayor consumo incrementándose a mayor velocidad reflejado de forma paralela en la batería, la cual debe de ofrecer su energía al motor en dichos instantes. El comportamiento del generador difiere al del motor, donde la corriente es constante y de menor valor durante su funcionamiento en momentos de una velocidad contante. En cambio, se ve reflejada la gran cantidad de corriente que consume en instantes de encendido y apagado afectando directamente a la batería.

Durante las deceleraciones la corriente del motor es de sentido contrario, inyectando energía a la batería.

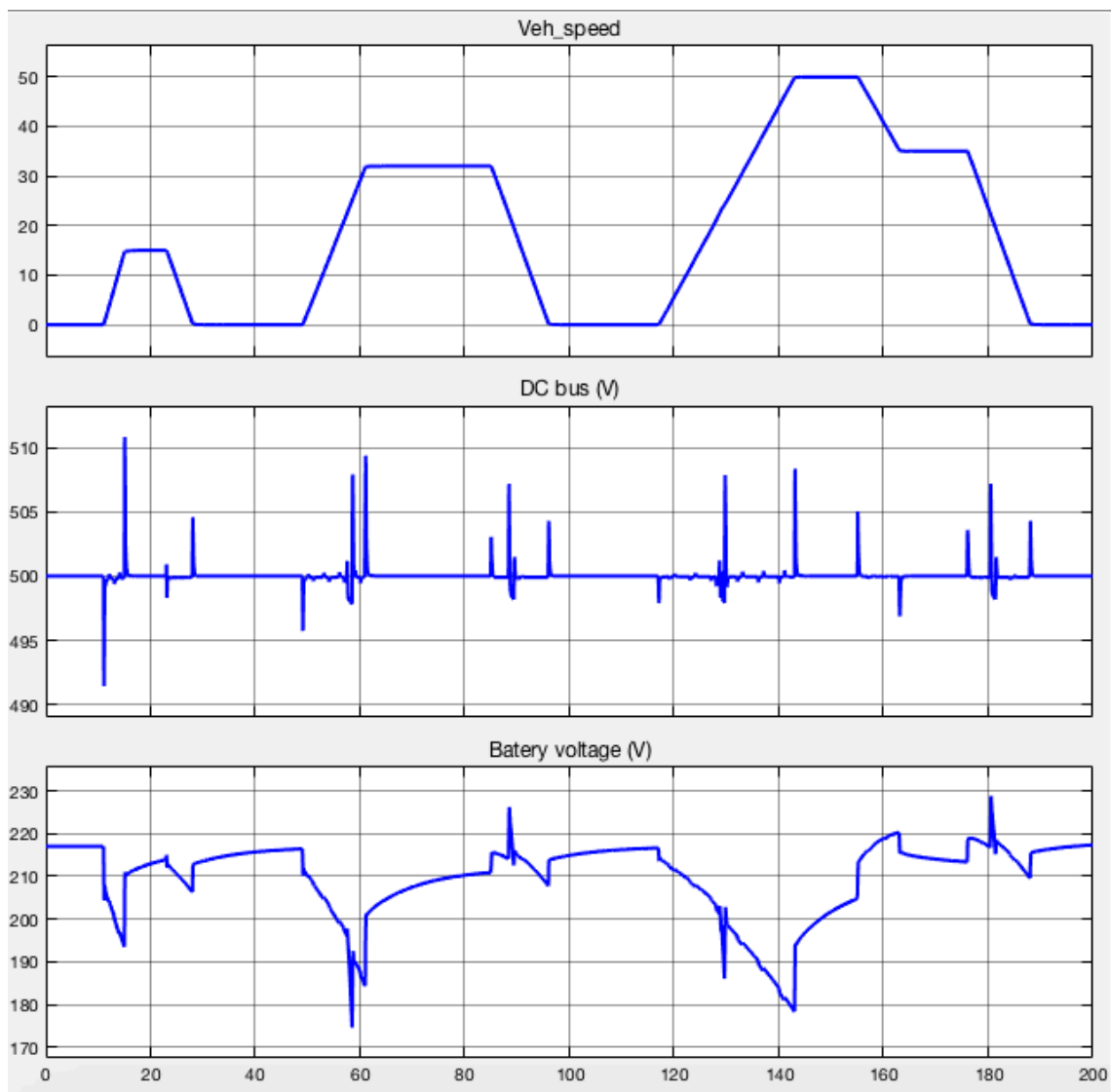


Figura 75: Voltajes vehículo eléctrico

La tensión de la batería decrece significativamente durante las aceleraciones provocadas por el gran consumo reflejado anteriormente. Durante el funcionamiento del generador se observa claramente cómo se recupera energía incluso llegando al final a niveles cercanos con los que se comenzaron. El DC bus muestra la tensión del convertidor DC-DC que conecta la batería con los motores, los picos de tensión reflejan el sentido de la corriente.

El nivel de energía general se representa con el estado de carga (SoC):

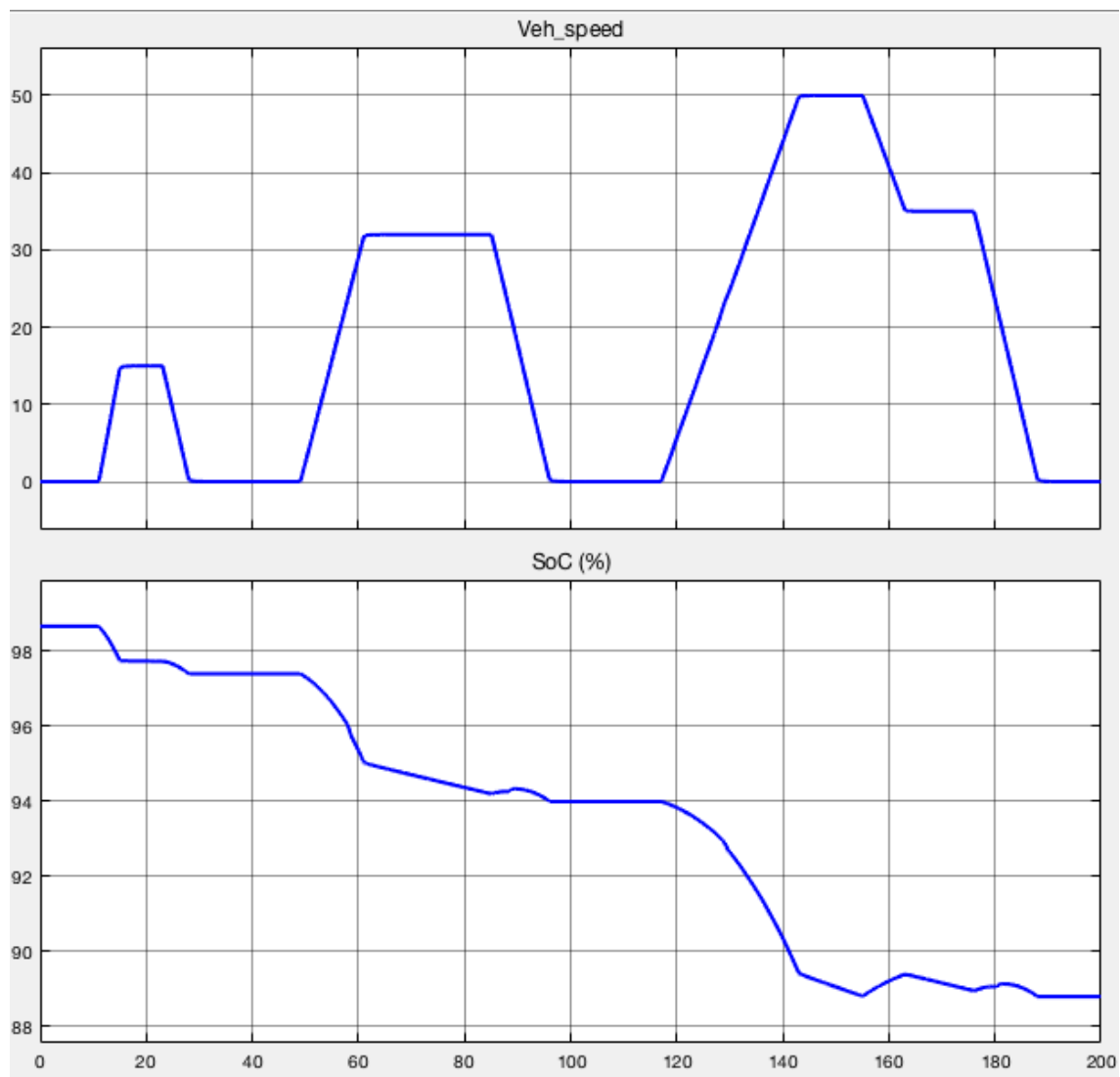


Figura 76: SoC vehículo eléctrico

A pesar de momentos puntuales donde se recupera algo de energía durante las deceleraciones, en general se va perdiendo energía progresivamente mientras aumenta, como es lógico, durante las máximas exigencias la pérdida de energía se incrementa.

A continuación, se realizará un estudio con un vehículo híbrido donde se espera conseguir estabilizar y alargar la vida de la carga del vehículo con el hándicap de utilizar un motor de combustión.

6.3.2 Vehículo híbrido

Ahora se utiliza también un motor de combustión provocando que el modelo se complique respecto al eléctrico puro. En este caso es fundamental utilizar el bloque de control con los distintos estados. El estudio ahora se basa también en un modelo lógico donde cada fase se explicará de forma más detallada.

La curva de velocidad utilizada es la misma y está dividida en tres etapas bien diferenciadas donde bloque de control *Mode_logic* gestiona las señales de habilitación en los momentos más óptimos para aprovechar eficientemente sus características.

El funcionamiento deseado se basa en tres partes:

1. Comienza con una aceleración a baja velocidad donde sólo se necesitará el uso del motor eléctrico. A pesar de mantenerse una velocidad constante al realizarse a tan baja velocidad, el generador no se habilitará, al igual que con la deceleración, la cual contiene muy poca inercia como para regenerar energía.
2. La segunda fase comienza también con una aceleración, pero más pronunciada y llegando a una velocidad mayor. Por lo tanto, el vehículo exigirá el uso del motor de combustión junto con el eléctrico, consumiendo bastante energía y provocando un incremento de descarga de batería. En la cresta se mantiene una velocidad constante ideal para habilitar el generador y recargar un poco las baterías.
3. La última fase es la más exigente energéticamente, tanto de consumo como de generación, debido a las velocidades más elevadas. La aceleración, al igual que en la fase anterior, requiere el uso de los dos motores con la correspondiente energía ofrecida por la batería. Al llegar a la máxima velocidad, seguido de una larga

deceleración, beneficia a la regeneración de energía por el uso del generador y freno regenerativo dejando el nivel de carga casi al 100%.

Los resultados de la simulación:

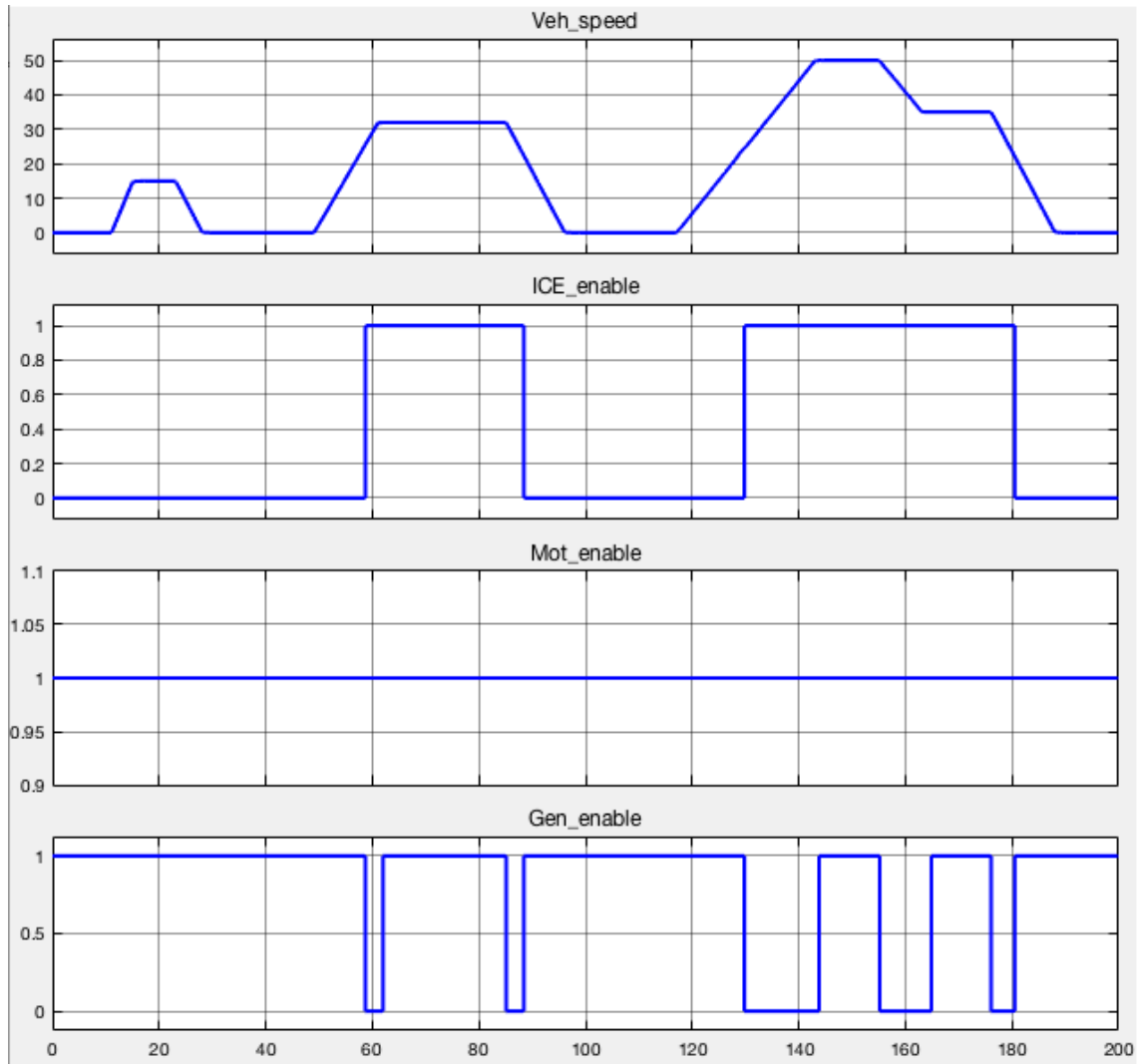


Figura 77: Estado de habilitación

A primera vista se puede observar cómo los resultados se asemejan con lo deseado. El motor eléctrico está habilitado continuamente. Esto se debe a que el modelo híbrido está constituido como un sistema orientado al ahorro máximo de combustible, por lo tanto, la propulsión eléctrica siempre es una prioridad si las condiciones de batería lo permiten.

El motor de combustión es activado cuando la velocidad del vehículo rebasa el umbral establecido y se mantendrá activo hasta que disminuya. El generador se habilita en las

condiciones energéticamente más favorables, que corresponden a cuando el vehículo lleva una velocidad crucero más o menos constante. Exige poca potencia para mantenerla y, aprovechando la inercia, se hace girar el generador eléctrico, siempre que esa velocidad sea lo suficientemente alta (por este motivo no se habilita en la primera fase).

Una vez establecido el control de habilitación, el controlador de cada motor establece la velocidad de giro para cumplir la demanda de velocidad.

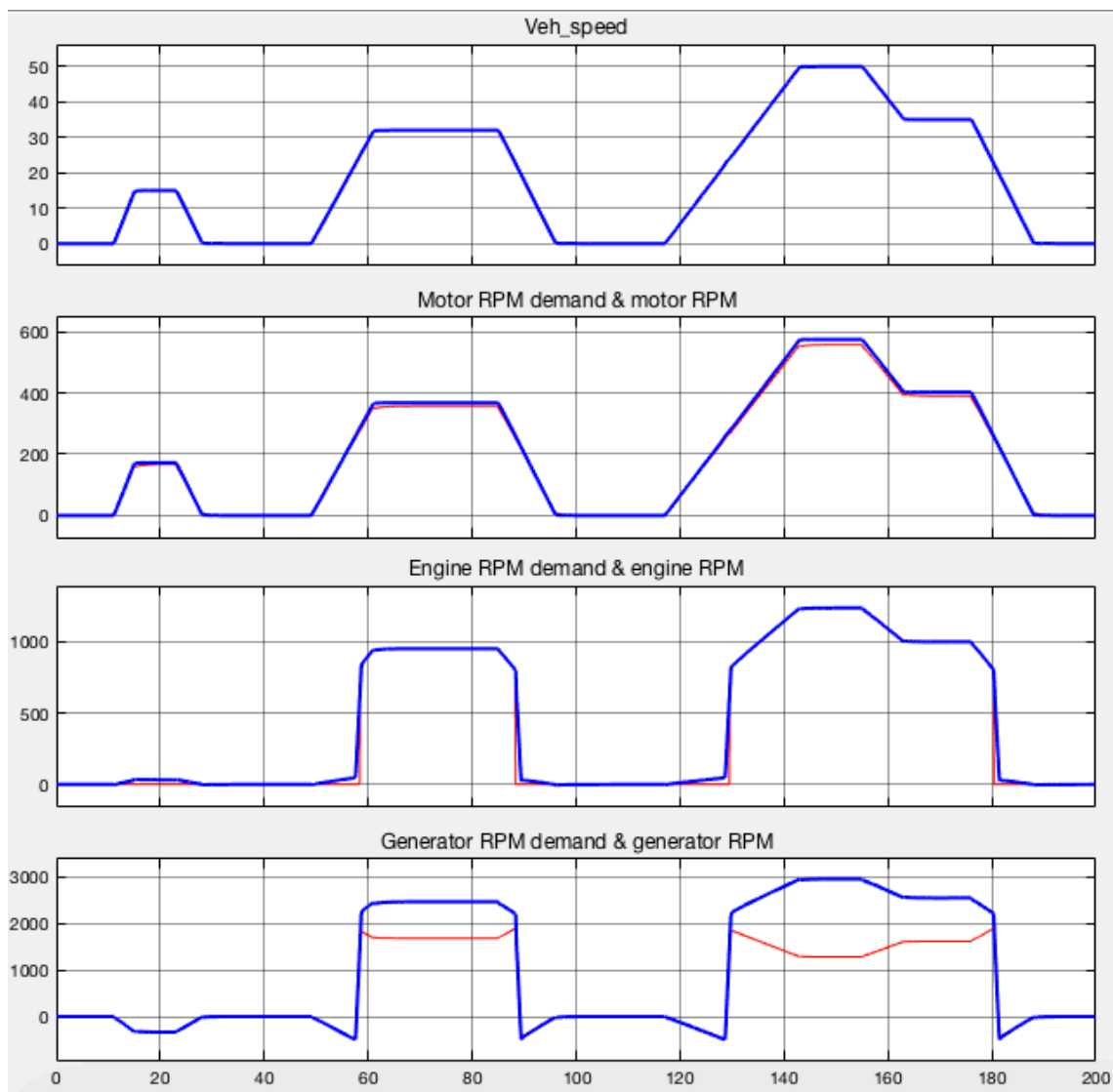


Figura 78: Gráficos de las revoluciones

La imagen muestra las revoluciones demandadas [rojo] cada controlador y la velocidad a la que giran en cada instante [azul]. Se observa cómo durante la aceleración el motor de combustión ayuda a la propulsión eléctrica, pero sólo para demandas que estén por

encima de las 800 RPM, siendo la velocidad de giro mínima para encenderse. El ajuste de RPM del generador viene determinado por la velocidad mínima de ralentí del motor térmico, aunque su uso real se produce cuando la velocidad es constante, momento que se aprovecha para recargar la batería.

Hay momentos en los que el generador gira en sentido contrario. Esto sucede cuando se acelera desde el reposo. El generador también actúa como arrancador del motor térmico. Si este motor está funcionando, el controlador del generador se utiliza para administrar la carga de la batería usando el modo de control de par; de lo contrario, el controlador del generador controla la velocidad del generador. Cuando el vehículo circula a una velocidad crucero es considerado un momento adecuado para recargar las baterías debido al bajo consumo energético que se ejerce. Esto se puede afirmar comprobando la fuerza de torque de los motores.

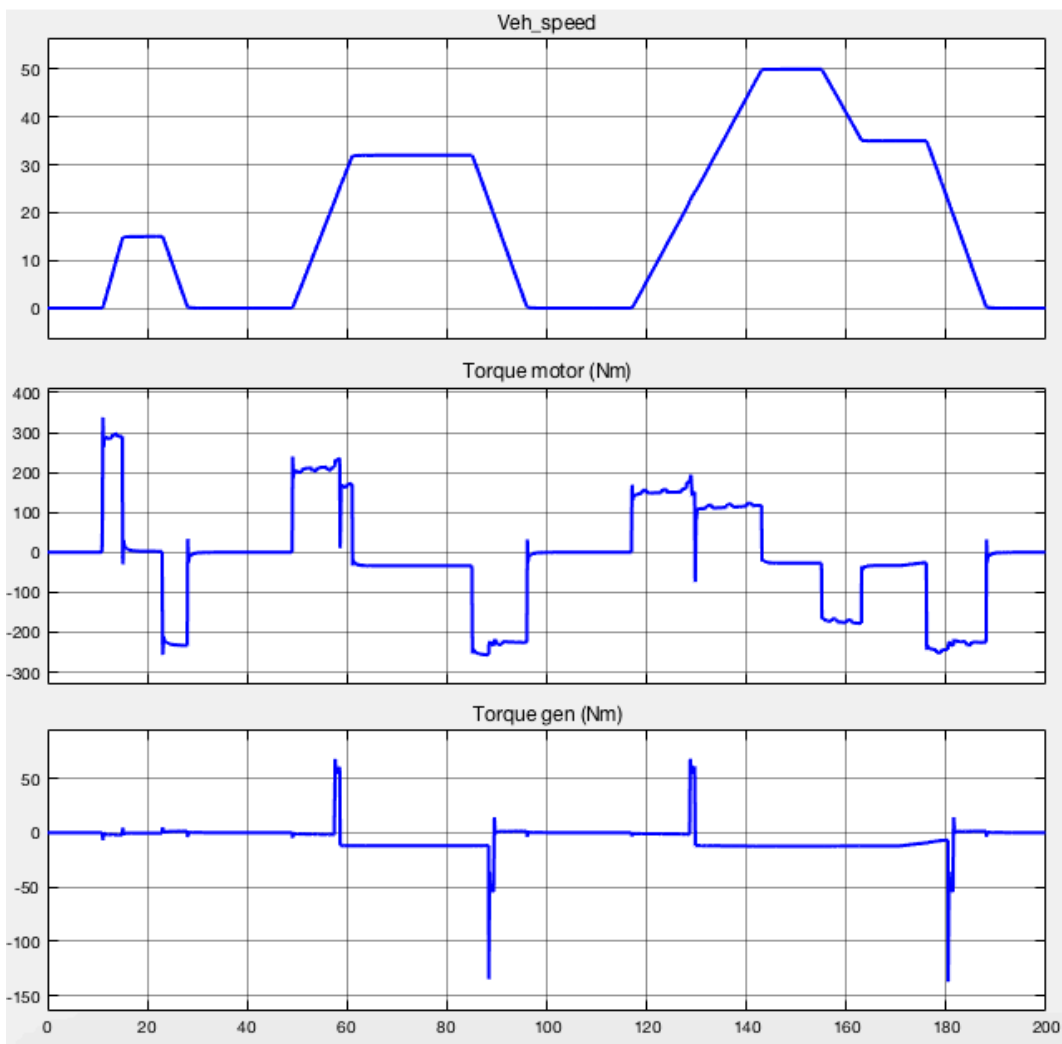


Figura 79: Gráficos de Torque o par

Durante la aceleración el motor eléctrico se ejerce el mayor nivel de par consumiendo mayor cantidad de energía. En cambio, durante el momento de velocidad constante el par está próximo a cero, necesita poca energía para mantener dicha velocidad. Si nos fijamos en el motor eléctrico, durante la aceleración se produce un escalón que baja un poco el nivel. Esto se produce porque justo en ese instante el motor térmico se enciende y comienza a ayudar en la propulsión, aliviando al motor eléctrico. Algo importante de señalar es cómo el motor eléctrico tiene un par negativo durante la deceleración, actuando como freno regenerativo al inyectar energía en vez de consumirla.

Hasta este punto de la exposición se ha abordado un análisis mecánico y dinámico del comportamiento del vehículo. A partir de aquí nos centraremos en el aspecto eléctrico, para observar cómo se distribuye las tensiones y corrientes en el sistema. Cada gráfica estará acompañada de su curva de velocidad con el fin de realizar un análisis más visual del momento temporal en que se encuentra el vehículo. La primera gráfica muestra la tensión más determinante:

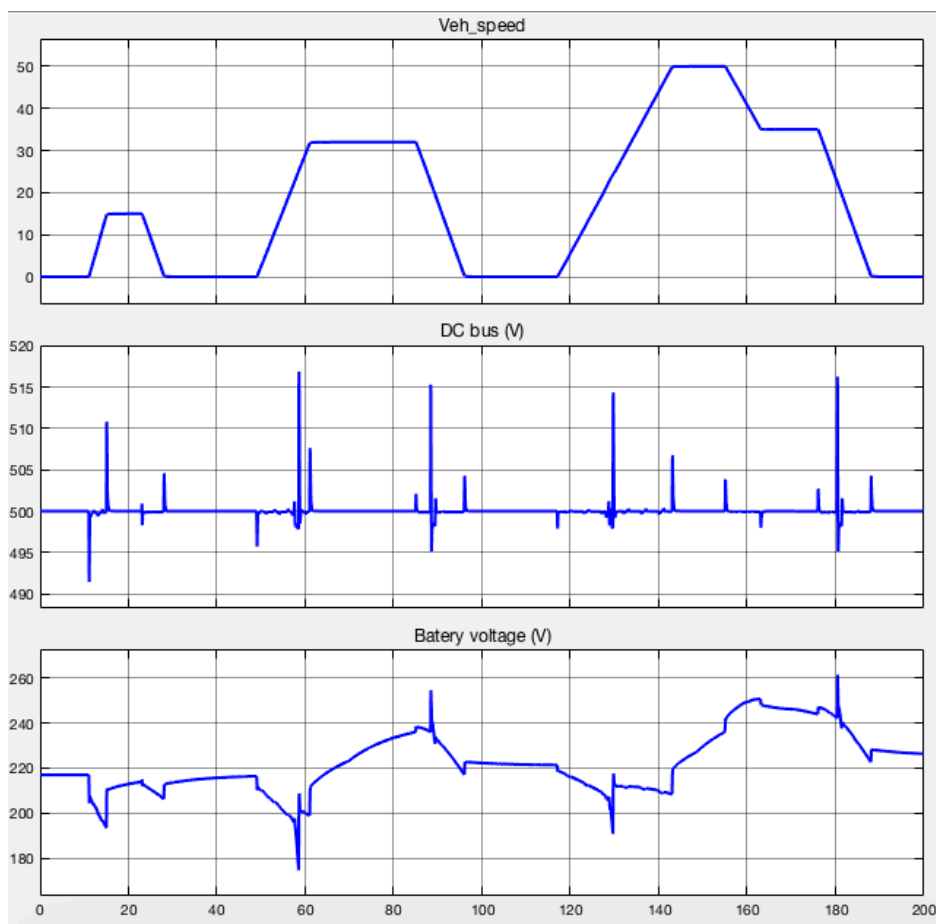


Figura 80: Gráficos de las tensiones

El DC bus muestra la tensión relacionada con el convertidor DC/DC entre batería y motores. Tiene un voltaje de estable de 500 V, pero tiene picos provocados por cambios bruscos de corriente. Tiene un funcionamiento bidireccional en función de si la corriente circula en sentido a los motores o en sentido a la batería. La tensión de la batería es de 230 V. Durante las aceleraciones la batería pierde tensión consumida por los motores; mientras que en las velocidades crucero y en la deceleración la corriente circula en su dirección teniendo en los bornes una tensión por encima de la nominal y que provoca su carga.

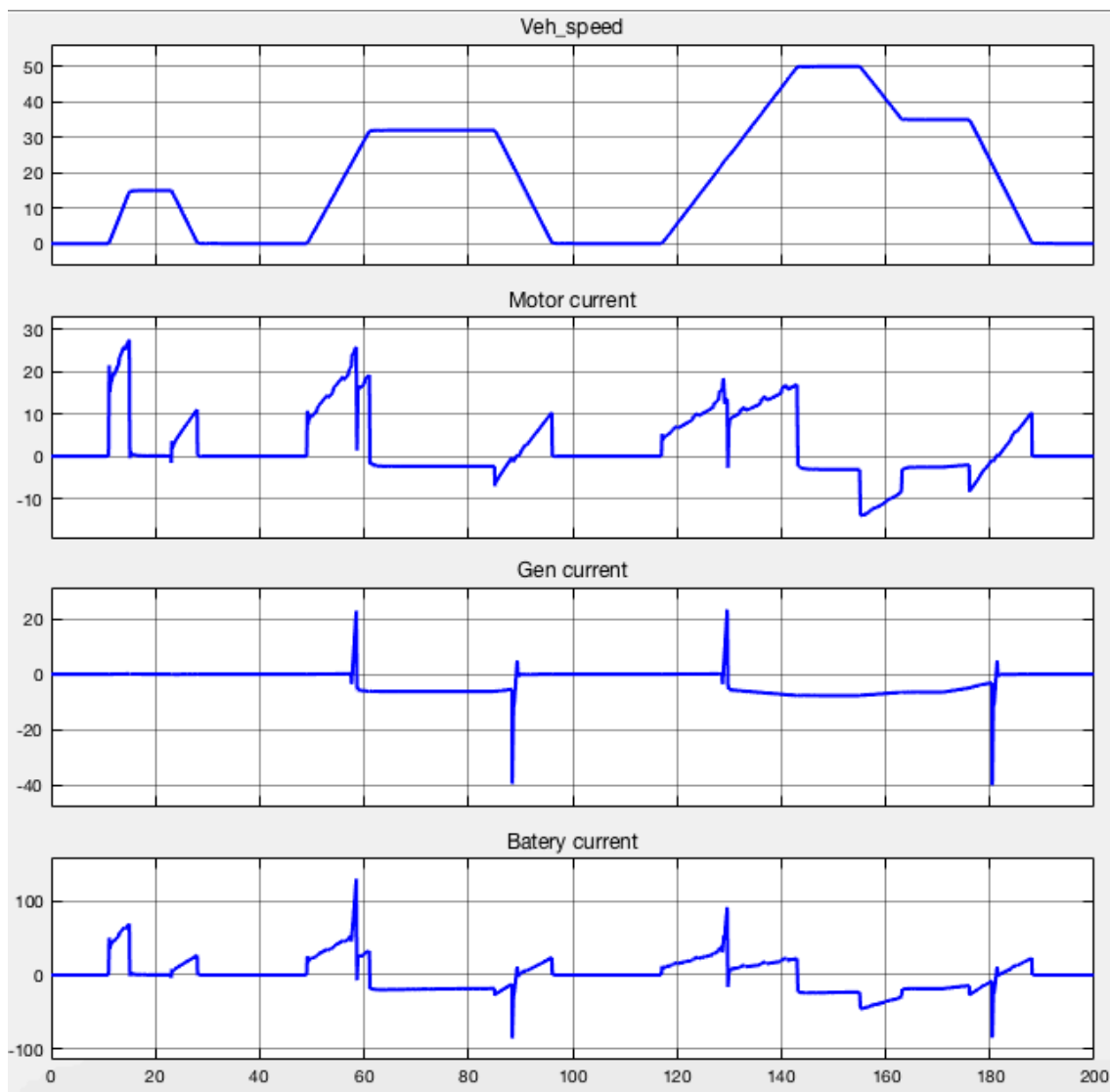


Figura 81: Gráficos de las corrientes

Los cambios de corrientes afectan a las tensiones. Durante la aceleración se observa claramente cómo el motor consume los mayores valores de corriente recibida de la batería, donde también se mantiene el consumo positivo. Los niveles negativos indican un cambio de sentido de la corriente, donde la fuente de energía es el motor y la batería la recibe. A pesar que el consumo durante la aceleración es ciertamente más elevado, no sucede si se compara con el vehículo eléctrico. En el momento que entra en funcionamiento el motor de combustión ayuda a disminuir la corriente y se ahorra energía de la batería.

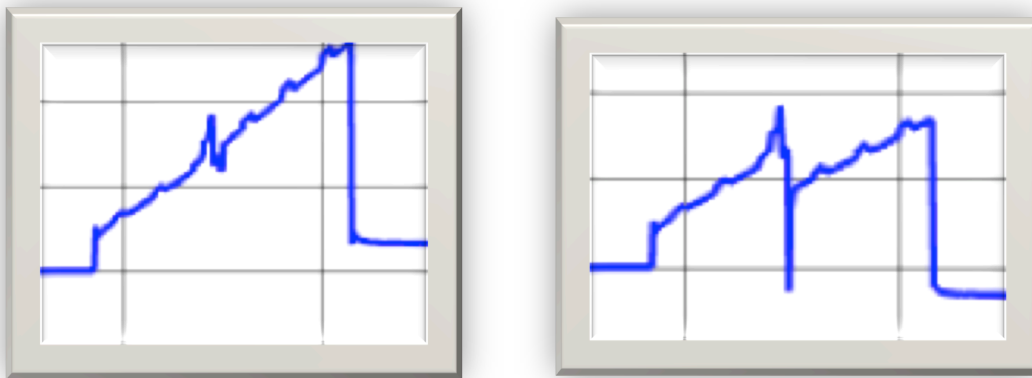


Figura 82: Comparación de la corriente motor del eléctrico

El generador tiene un nivel negativo durante la velocidad crucero, momento en el que está en funcionamiento. Los picos de corriente están provocados por el alto par que requiere su arranque o apagado.

Por último, se muestra el estado de carga (SoC), un indicador equivalente al depósito de combustible en vehículos tradicionales. Está representado en tanto por ciento. El SoC es útil para indicar la situación actual de una batería en uso y así representarla de una forma muy visual.

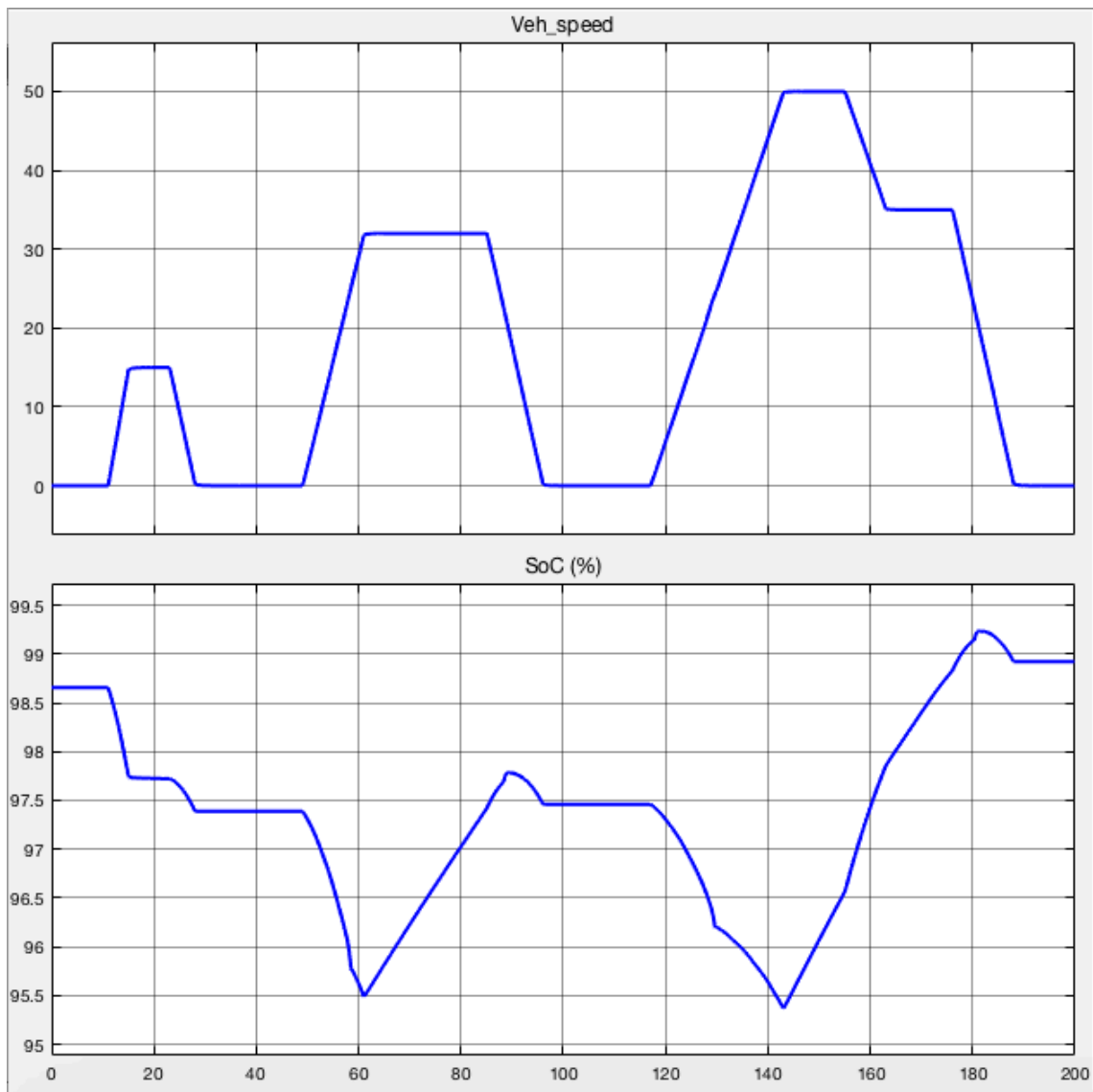


Figura 83: Estado de carga

Es evidente dónde se produce un mayor gasto durante las aceleraciones y cómo aumenta su nivel de carga en los momentos más eficientes de consumo, llegando casi al nivel inicial de máxima carga después de las tres fases de la curva de velocidad.

Como se esperaba, el modelo de vehículo híbrido ha mejorado sustancialmente el estado de carga cambiando la tendencia negativa mostrada en el vehículo eléctrico puro por una curva donde se recupera energía eléctrica de forma considerable. El resultado muestra un vehículo energéticamente más eficiente con una vida de batería más larga.

6.3.3 Modelo más exigente

Esta curva de velocidad es más exigente en cuanto a consumo de energía, más cercana a la realidad y muy útil para observar su comportamiento. Dicha exigencia consiste en alargar el tiempo de funcionamiento, realizar grandes aceleraciones menos constantes y hacia unas velocidades mayores para evitar zonas de recuperación de energía.

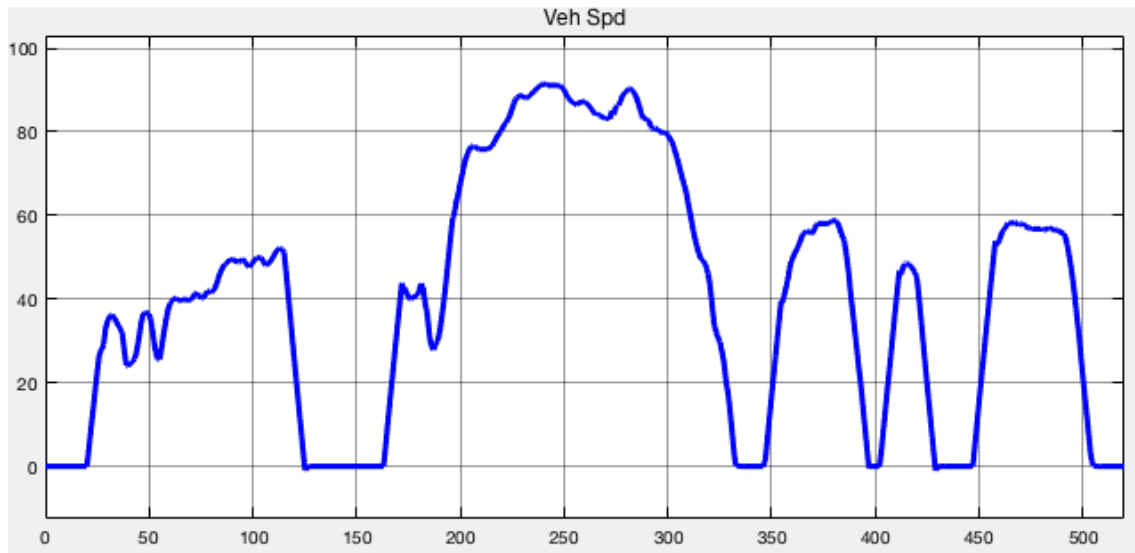


Figura 84: Curva de velocidad mas exigente

El estudio se inicia con el vehículo eléctrico para mostrar el resultado de las corrientes que circulan.

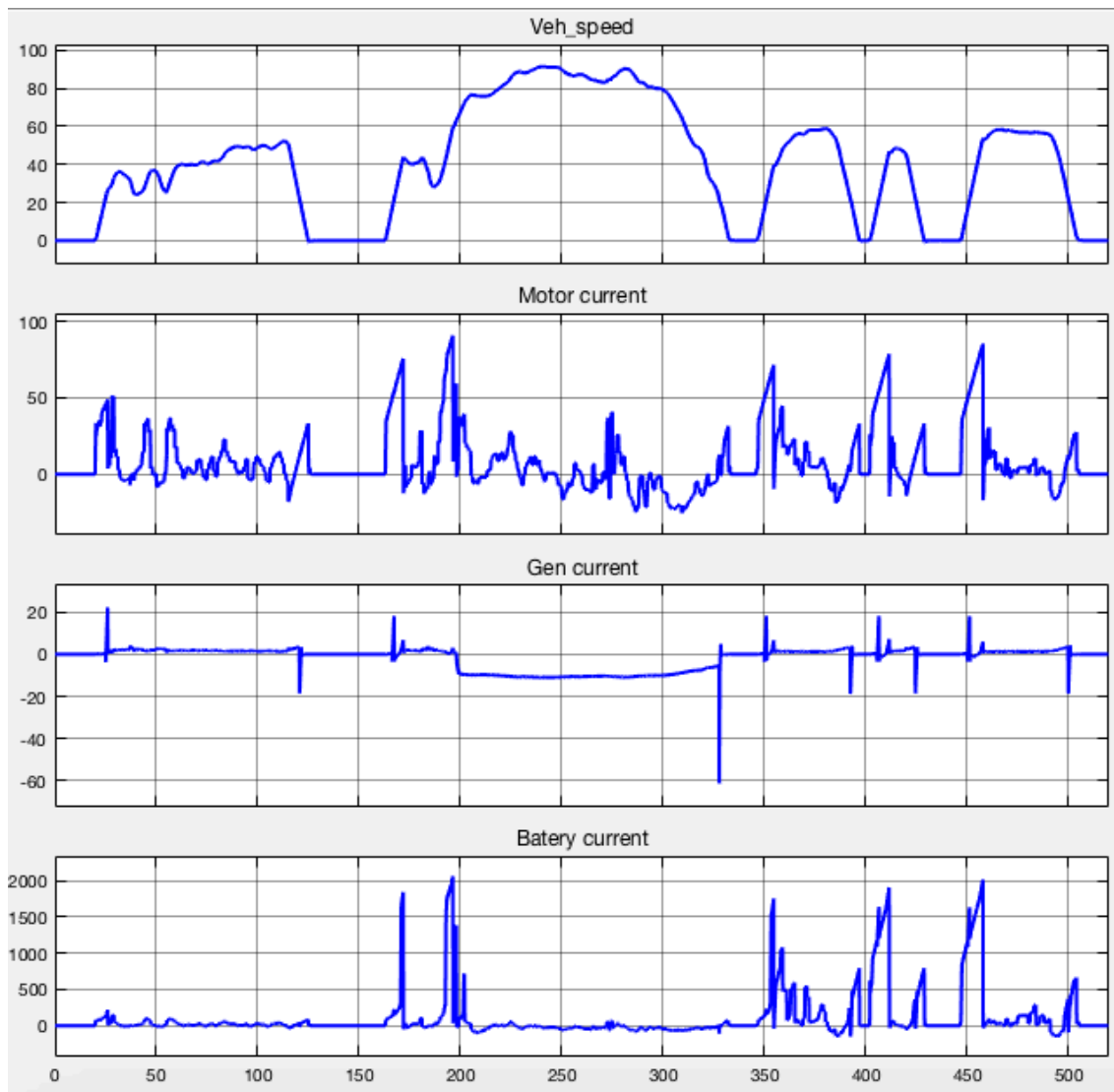


Figura 85: Corrientes del vehículo eléctrico

El consumo es mucho más irregular sin zonas muy representativas provocado por los constantes cambios. Se perciben cuatro zonas donde, debido a las pronunciadas aceleraciones, el consumo se dispara, agotando la batería que se observará en la gráfica del SoC.

La única zona donde se recupera algo de energía es en la parte intermedia, donde durante un considerable tiempo las velocidades no cambian tan bruscamente, zona aprovechada por el generador porque su valor es negativo.

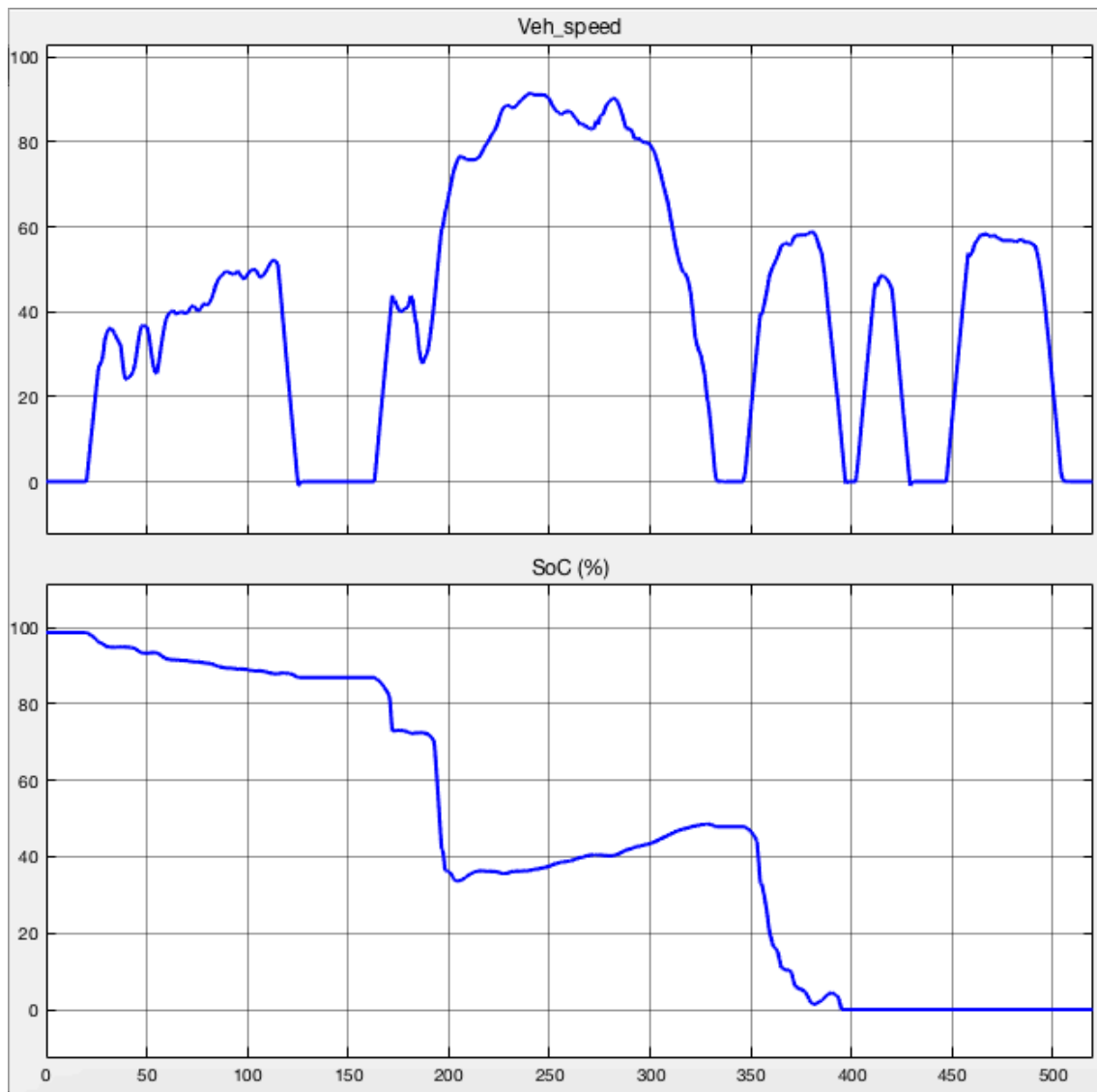


Figura 86: Nivel de carga del vehículo eléctrico

Como se predecía, la batería acaba por agotarse en su totalidad incluso antes de finalizar. La zona intermedia debido al uso del generador se recupera parte de energía pero no suficiente para la siguiente gran aceleración. En el vehículo híbrido el nivel de carga debería verse favorecido.

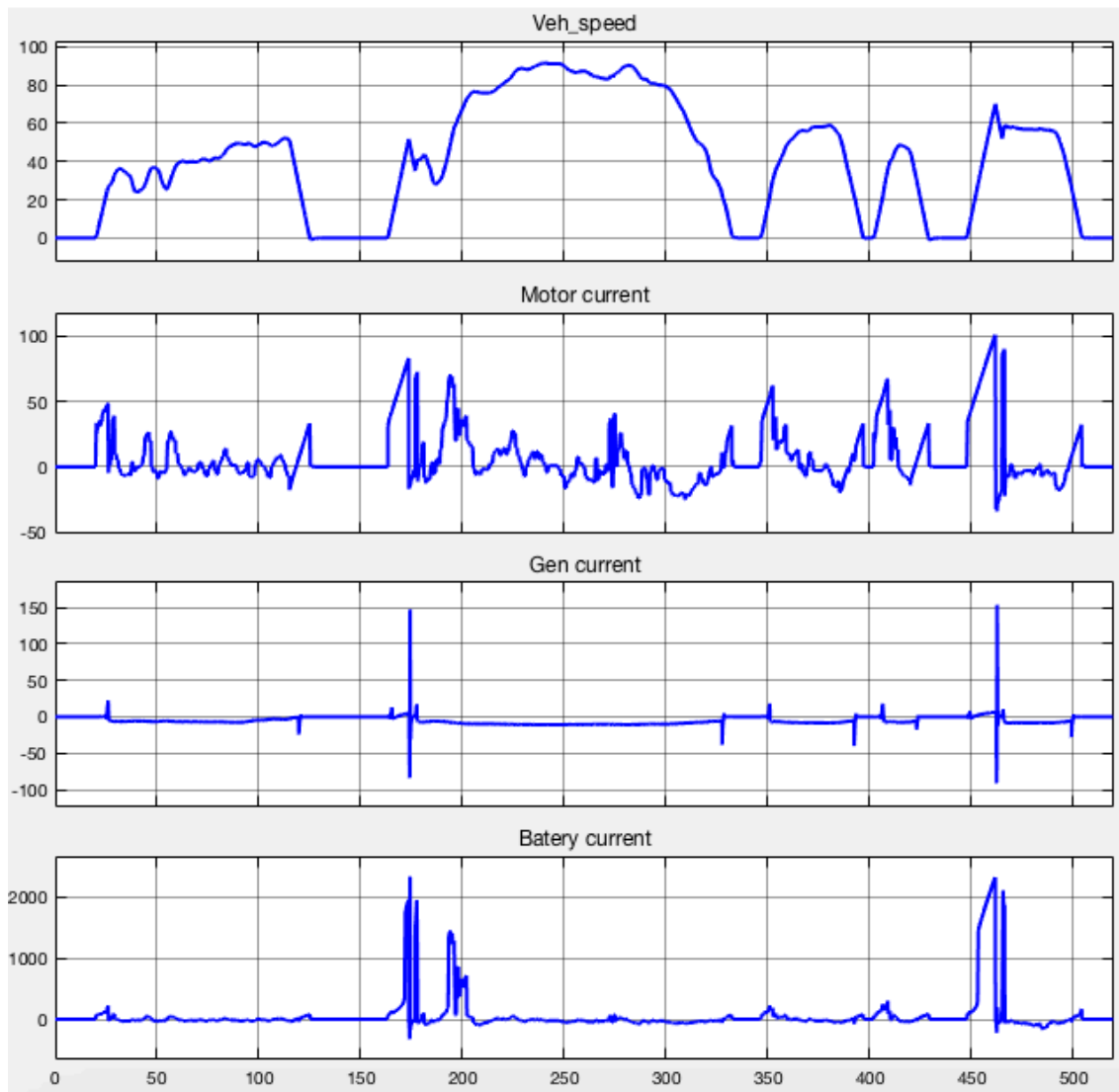


Figura 87: Corrientes del vehículo híbrido

El resultado híbrido muestra una mejoría respecto al eléctrico. Ahora la batería se ve sometida a solo dos zonas tan exigentes, anulando las zonas comprendidas entre 350 y 400 segundos y debería resultar una mejora en el nivel de carga.

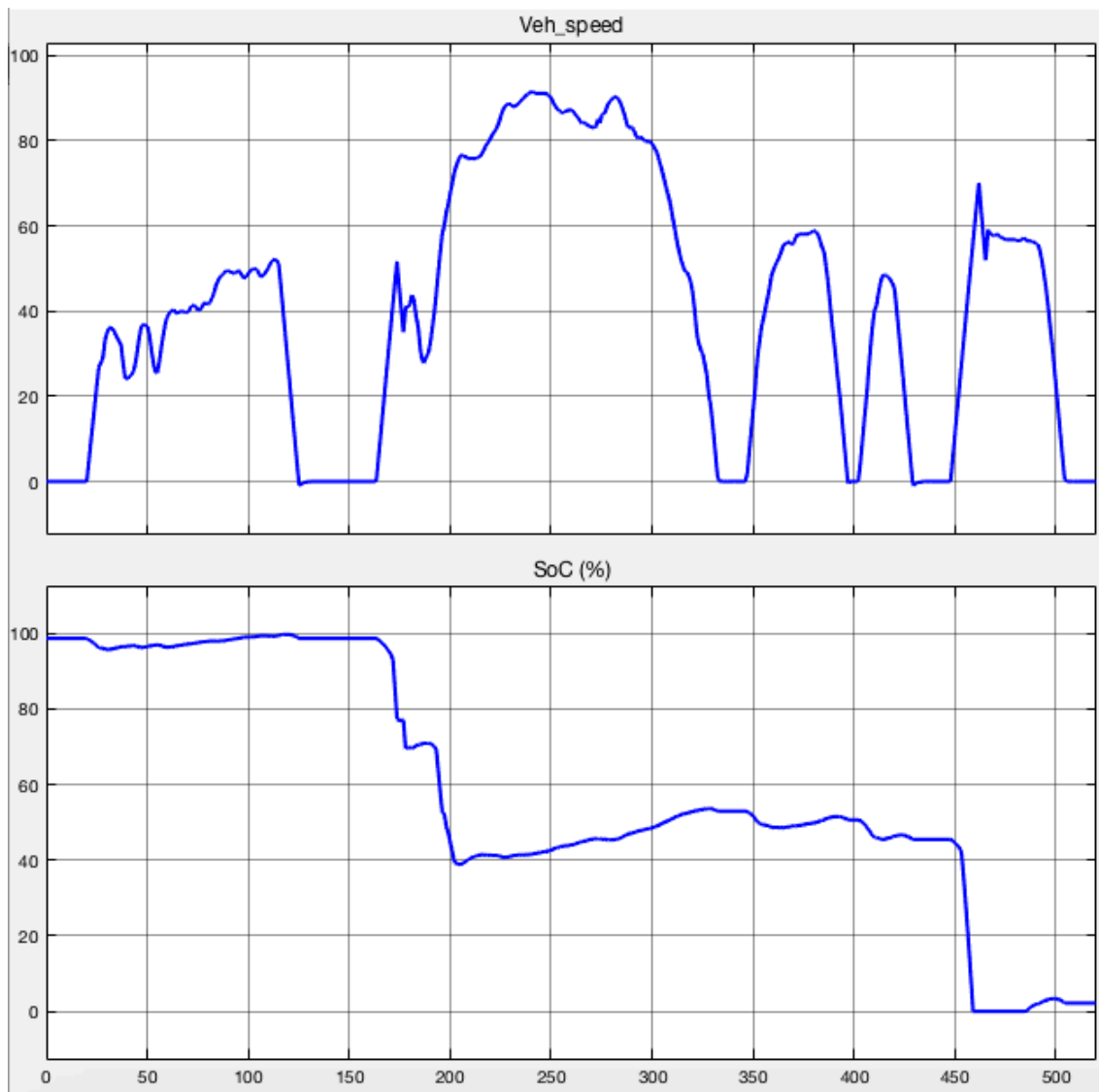


Figura 88: Nivel de carga del vehículo híbrido

El resultado no es tan prometedor como esperábamos debido a que la batería llega a consumirse también por completo. Si bien es verdad que los niveles de carga se mantienen más altos en los mismos instantes y la durabilidad de la carga se incrementa. Una batería de más capacidad podría solucionar el problema, pero también habría que tener en cuenta que la función puramente eléctrica de estos vehículos está pensada para un uso más urbano, en el que las bajas velocidades favorecen a mantener los niveles de carga.

Capítulo 7 – CONCLUSIONES

Durante el siglo XX el coche se ha convertido en el medio de transporte principal para la sociedad. El número de vehículos ha crecido significativamente durante las últimas décadas, de hecho, en la mayoría de hogares se posee más de un coche. Hasta ahora no se le ha dado demasiada importancia a lo que implica el uso del petróleo, que además no es una fuente ilimitada ni la más barata. Poco a poco la sociedad se está percatando del impacto perjudicial que ejerce sobre el medio ambiente, por lo que las compañías se están inclinando por desarrollar sistemas alternativos eléctricos, ya sean a través de baterías o de pila de hidrógeno.

Las nuevas investigaciones sobre sistemas alternativos están colocando al coche eléctrico como la opción con más potencial. No es que sea idea reciente, ya que durante la historia automovilística han existido apuestas interesantes; sin embargo, es cierto que en la actualidad poseemos una tecnología que podría favorecer la viabilidad de su implementación, compitiendo de cerca con los vehículos de gasolina, que sí gozaron de una exclusiva plenitud durante el siglo XX. Los principales atrasos que aún encontramos en este ámbito son las baterías o los sistemas de almacenamiento de energía, así como la escasez de estaciones de carga. Como se ha visto a lo largo de la exposición, las baterías de acido-plomo supusieron un gran avance, pero su autonomía era demasiado baja. Con la llegada del litio, se han abierto las puertas a modelos con autonomías de más de 500 km.

El presente trabajo recoge las alternativas de sistemas de motorización y sus distintas técnicas de control. Su investigación e implantación ayudaría a las compañías a elegir entre un abanico más grande de opciones, así como a desarrollar sistemas propios con los que diferenciarse de la competencia. En el modelo de simulación del epígrafe quinto se da a conocer el funcionamiento de un vehículo híbrido, que goza de éxito en la actualidad al no conllevar las limitaciones energéticas de una propulsión exclusivamente eléctrica. Significa un gran avance, ya que se diseñan pensando en una prioridad eléctrica y sólo emplea el motor de combustión para ciertas situaciones más desfavorables.

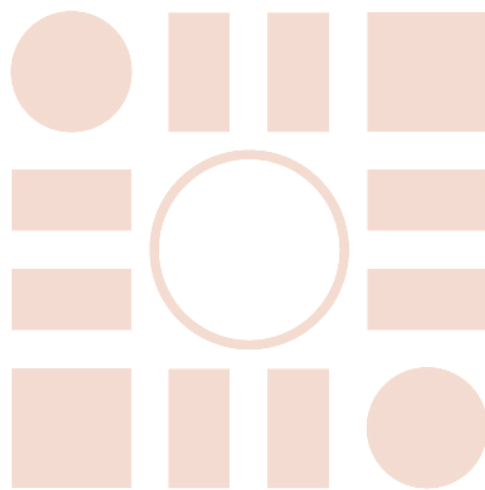
Todo parece indicar que el futuro es eléctrico. No obstante, no todo son buenas noticias, puesto que la fabricación de vehículos acarrea todavía estimables costes que los convierte en un bien de acceso limitado para la sociedad con una economía media. La participación de las grandes marcas está incrementando notablemente, pero no es suficiente si los diferentes gobiernos y empresas eléctricas no apuestan por una infraestructura de estaciones de recarga que vayan de la mano de la evolución de los propios vehículos. Con los coches eléctricos podemos, además, garantizar la preservación del medio ambiente en un panorama que actualmente lo podemos definir como desolador. Si apostamos por esta vía de investigación, quizás en unas décadas estemos hablando de una revolución tecnológica, social y ambiental que deje vehículos tradicionales de gasolina en un segundo plano.

BIBLIOGRAFÍA

- Apuntes de la asignatura **Electrónica para Energías Renovables**. EPS Alcalá de Henares
- **Máquinas Eléctricas y Controles Comúnmente Utilizadas para Tracción de Autos Eléctricos**. CIINDET 2016 – ID:109
- **Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos**. UNE-EN 61851-1
- **Combustibles y vehículos alternativos**. IDEA, proyecto TREATISE, 2005.
- **Tecnologías de propulsión híbrida**. FITSA
- **Diseño e implementación del freno regenerativo para un vehículo eléctrico**. Facultad de ingeniería eléctrica y electrónica. Escuela Politécnica Nacional.
- **Control de velocidad de motores eléctricos**. Máquinas eléctricas. Universidad Nacional de Asunción.
- **HEV Model in Simulink**

- Baterías de coches eléctricos e híbridos:
<https://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/03/14/baterias-de-coches-electricos-e-hibridos-hoy-estado-de-la-tecnologia-del-automovil/>
- Principios del control directo del par (DTC):
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6286/05CAPITULO2.pdf>
- EPICICLIDAL (Tren de engranajes):
<https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/epicicloidial-tren-de-engranajes-definicion-significado/gmx-niv15-con194026.htm>
- Recarga del coche eléctrico:
<http://electromovilidad.net/recarga-del-coche-electrico/>
- Toyota Prius:
<http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos-prius.htm>

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá