



MASTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SIMULACIÓN MEDIANTE SIMULINK DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL HÍBRIDO EN UN CICLO WLTC

Autor: D. Adrián Rodríguez Cubillo

Tutor: D. Francisco Tinaut Fluixa

Valladolid, Julio de 2020

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España





Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



SIMULACIÓN VEHÍCULO HÍBRIDO EN UN CICLO WLTC CON SIMULINK

RESUMEN BREVE

Palabras clave: vehículo híbrido, WLTC, Simulink, simulación y emisiones.

El presente Trabajo Fin de Máster es un estudio del comportamiento de los vehículos a través de la realización de una simulación por medio del programa Simulink. Este entorno de cálculo, para diferentes configuraciones, simular cualquier vehículo, para obtener unos resultados muy semejantes a los obtenidos por un vehículo real.

Este TFM pretende, a través de la simulación, analizar la influencia de un sistema eléctrico incorporado en un vehículo convencional enfocándose en el consumo y en las emisiones principales. Para realizar las simulaciones se ha optado por representar ciclos reales, como son ciclos NEDC y WLTC, usados para analizar los vehículos en bancos de ensayo.

SHORT ABSTRACT

Keywords: hybrid vehicle, WLTC, Simulink, simulation and emissions.

This TFM is a study of the behavior of vehicles through the performance of a simulation through the Simulink program. This computing environment allows, for different configurations, to simulate any vehicle, to obtain results very similar to those obtained by a real vehicle.

This TFM aims, through simulation, to analyze the influence of an electrical system incorporated in a conventional vehicle, focusing on consumption and main emissions. In order to carry out the simulations, we have chosen to represent real cycles, such as NEDC and WLTC cycles, used to analyze vehicles on test benches.

SIMULACIÓN MEDIANTE SIMULINK DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL HÍBRIDO EN UN CICLO WLTC

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo de un vehículo híbrido para poder analizar el consumo y las emisiones. Para ello se ha dividido el vehículo híbrido en dos partes principales el motor térmico y el motor eléctrico y sus componentes. Con los principios de funcionamiento de cada parte analizadas se procede a desarrollar a través del programa de simulación de Matlab conocido como Simulink un modelo.

Se parte de la realización de los ciclos de homologación NEDC y WLTC, que normalmente se realizan en bancos de ensayo. A partir de los datos de velocidad se obtiene las potencias requeridas en un vehículo para posteriormente calcular el consumo instantáneo y acumulado durante el ciclo. Los resultados obtenidos muestran unos valores de consumo medio para poder analizar la posterior influencia de la hibridación de un vehículo.

Para electrificar el vehículo se introduce un motor y un generador eléctrico junto con una batería para almacenar la energía eléctrica. Las diferentes partes se simulan con Simulink con parámetros ajustables para poder evaluar cualquier tipo de vehículo. Finalmente se obtiene el consumo del vehículo híbrido ajustando cuando el vehículo funciona con motor térmico o con motor eléctrico, esto reduce significativamente el consumo, sobre todo en la parte urbana de los ciclos donde la velocidad es menor.

Para finalizar el trabajo se han simulado diferentes modelos tanto con motor térmico, con sistema Start & Stop y con sistema híbrido. Todo ello también se ha analizado cambiando algunos parámetros como son el peso, el estado de las baterías y la resistencia aerodinámica del vehículo.

ENGLISH TITLE

EXECUTIVE ABSTRACT

The main objective of this work is to develop a model of a hybrid vehicle in order to analyze consumption and emissions. For this, the hybrid vehicle has been divided into two main parts: the heat engine and the electric motor and its components. With the operating principles of each analyzed part, a model is developed through the Matlab simulation program known as Simulink.

It is based on the realization of the NEDC and WLTC approval cycles, which are normally carried out on test benches. From the speed data, the powers required in a vehicle are obtained to later calculate the instantaneous and accumulated consumption during the cycle. The results obtained show average consumption values to be able to analyze the subsequent influence of the hybridization of a vehicle.

To electrify the vehicle, an engine and an electric generator are inserted along with a battery to store the electrical energy. The different parts are simulated with Simulink with adjustable parameters to be able to evaluate any type of vehicle. Finally, the consumption of the hybrid vehicle is obtained by adjusting when the vehicle works with a thermal engine or an electric motor, this significantly reduces consumption, especially in the urban part of the cycles where the speed is lower.

To finish the work, different models have been simulated, both with a thermal engine, with a Start & Stop system and with a hybrid system. All this has also been analyzed by changing some parameters such as the weight, the state of the batteries and the aerodynamic resistance of the vehicle.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y los compañeros de la carrera

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Antecedentes y justificación del TFM	1
1.2.	Objetivos	1
1.3.	Alcance y desarrollo del TFM	1
1.4.	Competencias.....	1
2.	VEHICULOS HIBRIDOS	3
2.1.	Características de un vehículo híbrido	3
2.2.	Tipos de automóviles híbridos	4
3.	POSIBILIDADES PARA LA PROPULSIÓN DE VEHÍCULOS.....	9
3.1.	Motor térmico de combustión interna	9
3.2.	Motor eléctrico.....	12
3.3.	Frenado Regenerativo	15
4.	BATERIAS PARA ALMACENAMIENTO A BORDO DE VEHÍCULOS	17
5.	SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USADOS EN LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS.....	19
5.1.	Engranajes planetarios	19
5.2.	Sistemas continuamente variables (CVT).....	21
6.	CICLOS DE CONDUCCIÓN PARA VEHÍCULOS AUTOMÓVILES.....	23
6.1.	NEDC.....	23
6.2.	WLTC.....	24
7.	REQUERIMIENTOS PARA LA PROPULSIÓN DE UN VEHÍCULO	26
7.1.	Resistencia a la rodadura	26
7.2.	Resistencia aerodinámica.....	27
7.3.	Fuerza de ascensión	28
7.4.	Equilibrio de fuerzas.....	28
8.	PLANTEAMIENTO GENERAL DIMENSIONADO VEHICULO HIBRIDO	29
8.1.	Potencia asociada a los sistemas de propulsión	29
8.2.	Autonomía.....	30
9.	CONDICIONES GENERALES PARA EL MODELADO DE UN VEHÍCULO	31
9.1.	Modelo vehículo propulsión convencional	31
9.2.	Modelo vehículo propulsión eléctrica.....	33
10.	MODELADO POR SIMULINK DEL MOTOR TÉRMICO	34
10.1.	MODELO DE SIMULACIÓN DEL MOTOR TÉRMICO	34
10.2.	Modelado del ciclo	34
10.3.	Modelado potencia necesaria.....	34
10.4.	Modelado velocidad de rotación del motor térmico	37
10.5.	Modelado presión media efectiva.....	39
10.6.	Modelado consumo específico.....	40

10.7.	Modelado consumo y las emisiones de CO2.....	41
10.8.	Modelado consumo y emisiones sistema S&S	43
11.	MODELADO POR SIMULINK DEL VEHÍCULO HÍBRIDO.....	45
11.1.	Modelado activación del motor eléctrico	45
11.2.	Modelado consumo.....	46
11.3.	Modelado revoluciones y par motor eléctrico	48
11.4.	Modelado revoluciones y par generador eléctrico	49
11.5.	Modelado propulsión eléctrica	50
11.6.	RESULTADOS	54
12.	CONCLUSIONES.....	55
12.1.	Conclusiones.....	55
12.2.	Principales aportaciones del autor del TFM.....	55
12.3.	Sugerencias para trabajos futuros.....	56
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y justificación del TFM

La evolución de la tecnología es cada día más digital, esto es debido a que el cliente quiere o necesita estar más conectado con diferentes elementos. En el mundo automotriz esto es igual, por lo tanto, los vehículos de hoy en día tienen elementos de última generación para obtener los mejores resultados. Las empresas automovilistas utilizan diferentes elementos para satisfacer al cliente.

El desarrollo de los automóviles actuales exige un estudio más exhaustivo y complejo, para mejorar este proceso se utilizan diferentes softwares capaces de simular vehículos con un coste muy bajo. La utilización de estos softwares permite a los ingenieros y técnicos conocer el diseño, el comportamiento, las prestaciones, las emisiones y los costes de fabricación mucho antes de que el vehículo sea realmente fabricado.

Estas herramientas requieren de un conocimiento previo de su funcionamiento para poder obtener los mejores resultados, que como la complejidad de los vehículos es mayor cada día, estas herramientas también son más complicadas y completas cada día. El estudio de las herramientas de simulación sobre el entorno de Simulink es el objeto de este trabajo.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es el empleo y el conocimiento del software Simulink, que permite simular multitud de parámetros de un vehículo mediante la creación de un modelo y analizar el comportamiento del vehículo en un ciclo de conducción concreto como es el WLTC.

En este modelo, se pueden implementar multitud de componentes de un vehículo desde el motor térmico y sus complementos, como pueden ser la línea de escape hasta los vehículos con equipos más modernos como son los sistemas híbridos y eléctricos con sus respectivas tecnologías como son las baterías y los motores eléctricos.

Partiendo de esta idea, en este trabajo se pretende simular el comportamiento de un vehículo sometido a un ciclo de conducción, creando un modelo del mismo en Simulink para luego comparar los resultados con los obtenidos con un vehículo real.

1.3. Alcance y desarrollo del TFM

Este trabajo de Fin de Máster se inicia detallando los diferentes elementos de un vehículo híbrido como son la parte del motor térmico y la parte eléctrica que le concede las características de híbrido. Posteriormente se analiza la dinámica vehicular del conjunto para posteriormente analizar los consumos del mismo.

Se ha procedido a la creación de un modelo de nuestro vehículo, con todos los elementos esenciales para que la representación informática sea lo más realística posible. A continuación, se ha introducido un ciclo de conducción para simular el ensayo del vehículo real en un banco de pruebas, con el objetivo final de obtener unos resultados comparables con ensayos reales y así obtener un modelo fiable en cuanto a resultados.

Por último, con los resultados obtenidos en la simulación y con los datos reales del vehículo, se plasman las conclusiones obtenidos en la simulación con Simulink, su validez para el estudio de vehículos y las posibles líneas futuras de trabajo usando como herramienta principal de simulación Simulink.

1.4. Competencias

Este TFM también pretende contribuir al desarrollo de las siguientes competencias del Máster en Ingeniería de Automoción, además de las ya obtenidas durante el desarrollo de las demás asignaturas

[\(https://www.uva.es/export/sites/uva/2.docencia/2.02.mastersoficiales/2.02.01.ofertaeducativa/detalle/Master-en-Ingenieria-de-Automocion/\)](https://www.uva.es/export/sites/uva/2.docencia/2.02.mastersoficiales/2.02.01.ofertaeducativa/detalle/Master-en-Ingenieria-de-Automocion/):

- **Competencias generales:**

- **G.1.** Poseer, comprender y aplicar conocimientos para concebir, diseñar, organizar actuaciones, poner en práctica y adoptar un proceso sustancial de creatividad e innovación para el desarrollo de nuevos conceptos e ideas.
- **G.2.** Capacidad de integrar y aplicar conocimientos y su comprensión para la resolución de problemas en entornos nuevos o poco conocidos dentro de contextos más amplios y multidisciplinares a partir de la información disponible.
- **G.3.** Capacidad de comunicar sus conclusiones, conocimientos y razones últimas que las sustentan tanto a destinatarios especializados, mediante informes y documentos técnicos, como a públicos no especializados.
- **G.4.** Capacidad de aprendizaje para el futuro de un modo que habrá de ser en gran medida autodirigido o autónomo.
- **G.7.** Capacidad de promover y fomentar el avance tecnológico desde una perspectiva social justa y medioambientalmente sostenible.

- **Competencias específicas:**

- **E.1.** Poseer y comprender conocimientos sobre la industria de automoción, el contexto económico, energético y medioambiental del automóvil, y la normativa general asociada.
- **E.2.** Poseer y comprender conocimientos sobre los aspectos específicos de la fabricación y la logística en la industria de la automoción.
- **E.3.** Poseer y comprender conocimientos sobre los vehículos automóviles, su arquitectura, su comportamiento, y los sistemas que los integran.
- **E.4.** Poseer y comprender conocimientos específicos sobre sistemas de propulsión convencionales y sus combustibles, sobre combustibles alternativos, sobre nuevos sistemas de propulsión y sobre nuevas arquitecturas de vehículos, incluyendo el almacenamiento de energía.
- **E.8.** poseer, comprender y aplicar conceptos sobre la gestión de los proyectos en automoción y los sistemas de calidad.
- **E.9.** Poseer, comprender y aplicar conceptos sobre el diseño de componentes, y los procesos de innovación.

2. VEHICULOS HIBRIDOS

Desde la invención del automóvil siempre se han buscado formas de generar energía para propulsarlos, la energía por medio de combustibles fósiles ha sido la principal vía debido a la gran capacidad de energía por volumen en la misma y además por su relativamente sencilla forma de obtener y manipular.

Debido al agotamiento de los combustibles fósiles se han buscado fuentes alternativas de energía, en este campo las variantes principales son la energía eléctrica y las pilas de hidrógeno; este trabajo se centra en la energía eléctrica. Otra razón principal para la toma en cuenta de formas de energía alternativas es realizar vehículos más eficientes y que por lo tanto emitan menos emisiones para realizar las mismas distancias.

Los automóviles híbridos utilizan sistemas de propulsión de doble vía, por una parte, la convencional a partir de combustibles fósiles por medio del motor de combustión interna; la otra vía puede ser tanto eléctrica, pilas de hidrógeno... Los automóviles híbridos son un paso intermedio entre la situación actual con motores de combustión interna y los vehículos totalmente eléctricos. Debido a la tecnología actual no es posible desarrollar vehículos capaces de dar las prestaciones a toda la sociedad.

2.1. Características de un vehículo híbrido

La principal característica de los vehículos híbridos es la disminución del uso de combustibles fósiles para el movimiento de los vehículos, esto se traduce en disminución de consumo de combustible y por lo tanto reducción de emisiones contaminantes.

Durante la conducción de un vehículo híbrido se pueden distinguir las siguientes fases:

- Al arrancar el vehículo el motor eléctrico se usa para mover el coche. A cierta velocidad el motor térmico empieza a funcionar, se produce una transición de motor parado a movimiento suave y llegando a un punto de funcionamiento óptimo.
- Si se acelera el vehículo cuando el motor térmico está en funcionamiento, el motor eléctrico se incorpora y ayuda a propulsar el vehículo. Por lo tanto, el motor térmico realiza menor esfuerzo y por consiguiente menor consumo.
- En las zonas urbanas el motor eléctrico realiza la tarea del movimiento, siempre que el nivel de carga de la batería lo permita, en caso contrario el motor térmico se pondrá en funcionamiento.
- En el caso de frenada la energía se aprovecha para cargar las baterías para su posterior uso.
- Cuando el vehículo está parado ningún motor está en funcionamiento y por lo tanto no se consume combustible ni tampoco se emiten emisiones.

En este tipo de sistemas se hace trabajar al motor térmico en condiciones idóneas, es decir, a su régimen ideal. Esto hace que el motor sea más eficiente y por lo tanto el vehículo en general será más eficiente, se reducen las emisiones de NOx, hidrocarburos sin quemar, partículas sólidas, CO...

Los vehículos híbridos tienen una serie de componentes en común:

- El sistema de motorización: es el encargado de proporcionar energía para que el vehículo pueda tener movimiento. En los vehículos híbridos completos o enchufable tanto el motor de combustión interno como el motor eléctrico deben ser capaces de realizar dicha tarea tanto individualmente como en conjunto. Sin embargo, en los vehículos híbridos ligeros o asistidos el motor de combustión es el único que proporciona la suficiente potencia para generar movimiento, las otras partes solo ayudan a disminuir la carga de trabajo en determinadas condiciones.

- El sistema de alimentación de energía: con respecto al motor de combustión interna la energía proviene del poder calorífico del combustible, en el motor eléctrico la energía proviene de un sistema de baterías, utilizando la energía eléctrica como fuente.
- El sistema de control: es el encargado de la elección del motor en funcionamiento para cada situación en función de la velocidad, la potencia y el par, según la circunstancia la requiera.
- El sistema de transmisión: Puede ser similar a un vehículo convencional, pero dependiendo del control se puede eliminar componentes como la caja de cambios mecánica y la marcha atrás. En los híbridos completos o enchufable los sistemas de transmisión son bastante más complejos y desarrollados para generar en el cliente una sensación de conducción adecuada a sus gustos.

El sistema Start & Stop es un sistema incorporado en los vehículos actuales, no tienen por qué ser híbridos, que permite reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ mediante el apagado del motor de combustión cuando el vehículo está detenido por un tiempo.

El funcionamiento es muy simple, cuando el vehículo está en punto muerto, el motor se apaga, por lo que deja de consumir combustible. En el momento en el que el conductor pise el embrague para engranar una marcha el sistema arranca el motor otra vez. Si el vehículo es con transmisión automática el motor se pondrá en movimiento cuando el conductor levante el pie del pedal de freno.

El sistema Start & Stop funciona con un motor de arranque específico y mejorado para que debido al aumento del número de arranques no se deteriore. El alternador también es específico debido a que produce mayores cargas de energía a bajas velocidades.

2.2. Tipos de automóviles híbridos

Debido a la diversidad de configuraciones para los vehículos híbridos primero se clasifica en función del nivel de hibridación o según su arquitectura, esto analiza la implicación de la configuración eléctrica o alternativa dentro del vehículo convencional:

- Híbrido ligero: En esta configuración la parte eléctrica se compone de un pequeño motor eléctrico que ayuda al motor convencional de combustión interna a arrancar en los arranques, por lo tanto, es como el típico motor de arranque del vehículo convencional, pero con un tamaño mayor debido al aumento del funcionamiento. En este tipo de vehículos la gran diferencia es la implantación del sistema Stop & Start que detiene el motor de combustión y no genera emisiones durante las paradas.

El uso del motor eléctrico durante los arranques es debido a que es necesario un par medio o alto en función de la inclinación del vehículo a revoluciones muy bajas; estas condiciones no son nada favorables para los motores de combustión.

Durante las frenadas el sistema eléctrico transfiere energía de los frenos a las baterías eléctricas para luego generar energía en el arranque.

- Híbrido asistido: la parte eléctrica solo genera una potencia adicional cuando el motor convencional de combustión está en funcionamiento, por lo tanto, disminuye el par máximo del motor de combustión y por lo tanto las emisiones. Durante las frenadas el sistema eléctrico aprovecha la energía del movimiento para generar energía usada posteriormente. Si es necesario la energía eléctrica para generar el movimiento de los motores eléctricos se puede proporcionar a partir del motor convencional, esta parte puede parecer inusual pero los rendimientos de los motores eléctricos son mucho más elevados que los de cualquier motor de combustión interna.

- **Híbrido completo:** en esta configuración la parte eléctrica puede generar la suficiente energía para proporcionar movimiento, la parte eléctrica puede funcionar tanto conjunta como aisladamente. También aprovecha la energía de frenado para generar energía eléctrica.
- **Híbrido enchufable:** este modelo es similar al híbrido completo con la cualidad de que la energía eléctrica de las baterías puede ser proporcionada además por una fuente externa. La principal ventaja de este sistema es la independencia del motor de combustión para realizar cortos trayectos y puede funcionar completamente como eléctrico. En trayectos de mayor distancia sigue funcionando como un vehículo convencional o como un híbrido completo con sus respectivas ventajas.

A continuación, se clasifican los vehículos híbridos en función de la posición y la configuración de los elementos, dependiendo del tipo de configuración y las relaciones entre las mismas las utilidades serán diferentes:

- **Híbrido paralelo:** En esta configuración se puede distinguir fácilmente los dos sistemas de propulsión, por una parte, el motor térmico proporciona energía a través del sistema convencional de transmisión, por otra parte, el motor eléctrico proporciona energía de forma independiente, toda esta configuración se puede observar en la figura 1.

Cuando las baterías eléctricas tienen poca energía el vehículo se comporta como un híbrido asistido, solo proporciona energía para el arranque y para proporcionar un par adicional. Cuando la batería está cargada el vehículo se comporta como un híbrido completo y la parte eléctrica puede proporcionar toda la energía necesaria.

Como el aumento de potencia corresponde directamente al motor de combustión interna es posible una reducción del tamaño de las baterías.

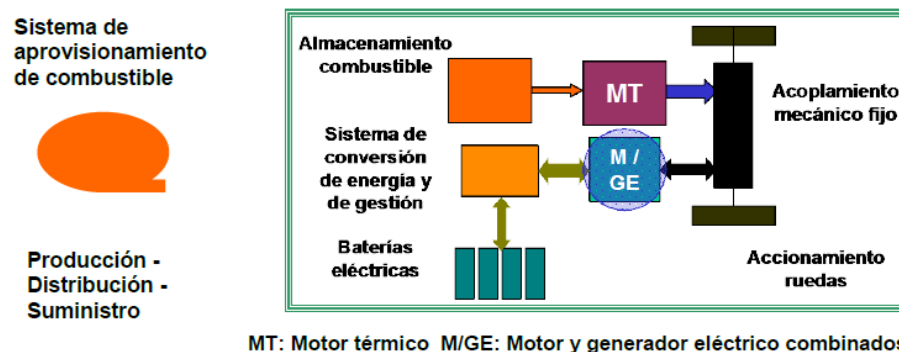


Figura 1. Configuración híbrido paralelo [2]

En resumen, el objetivo principal de este tipo de configuración es recuperar energía en las frenadas y asistir al motor térmico cuando sea necesario proporcionando un par adicional. Gracias a la presencia del motor eléctrico, el motor térmico puede operar en condiciones muy favorables, en la figura se muestra un mapa de consumo de combustible para un típico motor de combustión. Como se observa en la figura 2, la zona con mejor rendimiento se encuentra entre las dos líneas de puntos. El motor eléctrico funciona en la zona "A" en modo arranque, este modo se produce principalmente en circuito urbano, donde las aceleraciones y las frenadas son muy frecuentes. El motor eléctrico también funciona en la zona "B" a altas cargas, el motor térmico pierde eficiencia y esta se suple con el par adicional de la energía eléctrica.

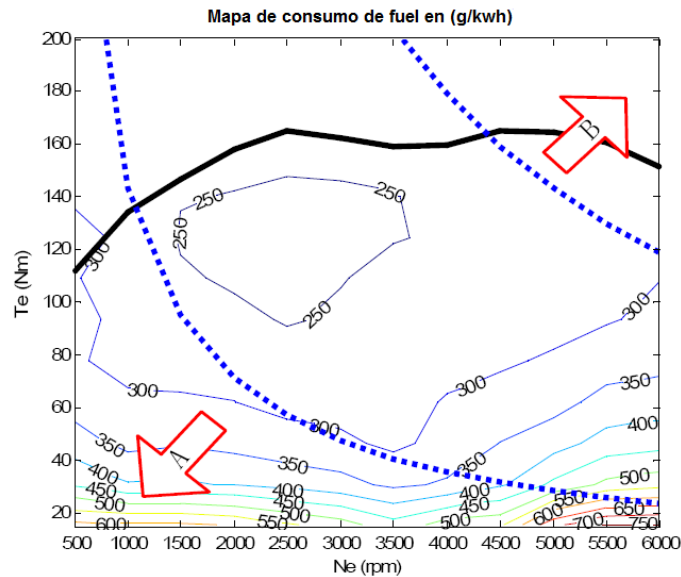


Figura 2. Mapa de consumo

Dentro del grupo de híbridos paralelos se puede distinguir dos grupos: los que aprovechan el motor eléctrico para funcionar también como un generador durante las frenadas; este último será el encargado del freno regenerativo permitiendo la desaceleración del vehículo y recuperando energía mientras el motor eléctrico actúa como generador.

El otro grupo de vehículos híbridos paralelos serían los que emplean un generador independiente para cargar las baterías, sin aprovechar la energía en las frenadas. Esto no parece ser la decisión más adecuada debido al aumento de elementos más pesados en el automóvil y por lo tanto requiriendo más potencia, con su consecuente aumento de consumo y emisiones. Sin embargo, un generador diseñado expresamente para funcionar para tal fin tendrá mejores rendimientos que un motor eléctrico que actúa tanto de motor y de generador.

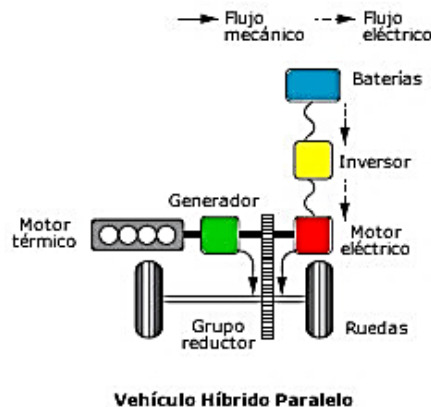


Figura 3. Configuración híbrido paralelo con generador aparte

- Vehículos híbridos en serie: En esta configuración la parte eléctrica es la única que impulsa el vehículo, el motor de combustión no está relacionado directamente. La energía del motor eléctrico es proporcionada por las baterías o bien por el motor térmico a través de un generador, o por una combinación de ambas controlado por un sistema de control. El motor eléctrico proporciona un alto par a bajas velocidades de giro. La principal ventaja es el punto de funcionamiento del motor térmico, ya que al no estar conectado directamente puede funcionar en las condiciones a desear, máximo rendimiento y mínimo consumo. Este tipo de configuración es típica en autobuses y camiones. Esta configuración se muestra en la figura 4.

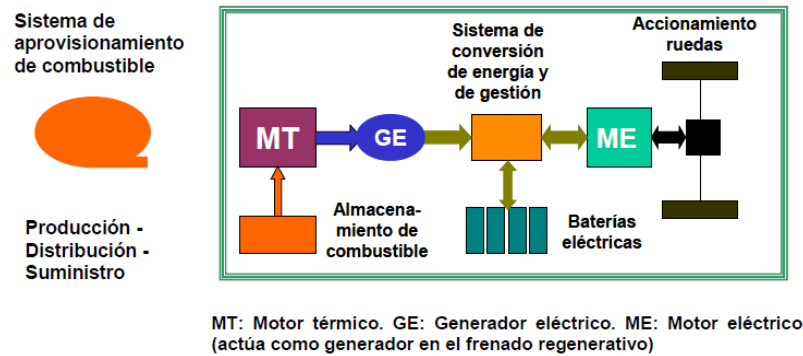


Figura 4. Configuración híbrido serie [2]

La principal desventaja de este tipo de configuración es la limitación impuesta por el rendimiento del motor eléctrico, sobre todo en puntos de funcionamiento de alta carga, por lo tanto, este sistema es óptimo para desplazamiento urbanos.

El generador o en su defecto del motor de combustión se utiliza principalmente para extender la autonomía del automóvil permitiendo ampliar las prestaciones, en la mayoría de los kilómetros se utiliza la energía proveniente de las baterías y en el caso de que las condiciones excedan las prestaciones de la batería el generador eléctrico entra en funcionamiento. La corriente producida por el generador es rectificadora por un inversor o rectificador debido a que la energía producida por el motor de combustión no es de corriente alterna.

Tanto el generador como la batería se dimensionan en función de la utilidad del vehículo, si es necesario una potencia para altos picos como aceleraciones y adelantamientos la batería se dimensiona de un tamaño mayor.

- Vehículos híbridos eléctricos de rango extendido: Este sistema combina las ventajas de la hibridación en paralelo y en serie.

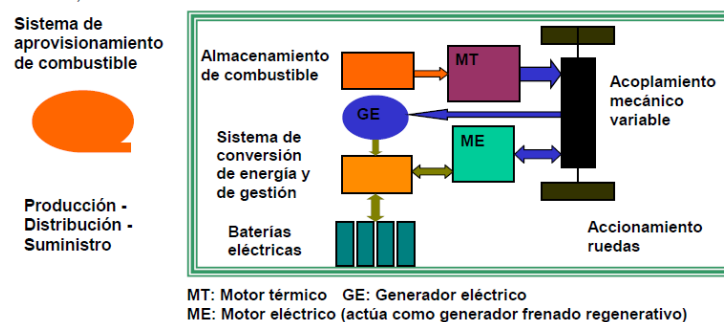


Figura 5. Configuración híbrida de rango extendido [2]

Como se observa en la figura 5 el movimiento puede ser proporcionado tanto por la parte del motor convencional o motor de combustión y el motor eléctrico. El generador eléctrico que proporciona energía tanto a las baterías como al motor eléctrico obtiene su energía de las frenadas y no del motor convencional.

Este tipo de configuración se caracteriza principalmente por la transmisión de engranajes planetarios que conectan el motor de combustión y el motor eléctrico tanto independientemente como simultáneamente que se muestra en la figura 6.

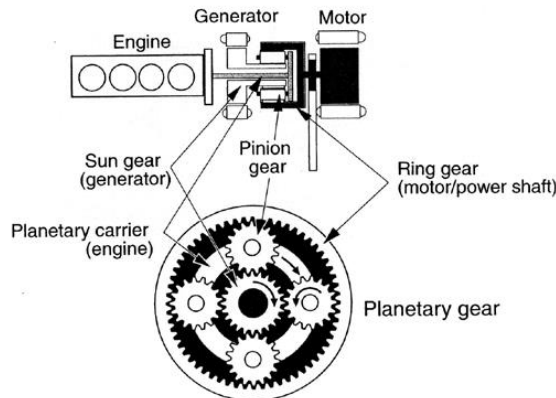


Figura 6. Distribución engranajes planetarios

El factor determinante para el diseño de esta transmisión es la interacción entre la transferencia de potencia del motor de combustión y del motor eléctrico hacia las ruedas motrices. Al transmitir la potencia simultáneamente de ambos motores los elementos de la transmisión están sometidos a esfuerzos constantes de torsión y flexión.

Con esta configuración se puede circular a bajas velocidades aprovechando las ventajas de motor eléctrico, y a altas velocidades el sistema se comporta como una configuración paralela con sus principales ventajas.

El sistema de control de transmisión y funcionamiento es más complejo que los dos sistemas anteriores.

- Vehículos híbridos enchufable (Plugged-in): Este sistema se caracteriza porque la parte eléctrica puede obtener la energía de una fuente externa al motor térmico, como serían estaciones de carga eléctrica.

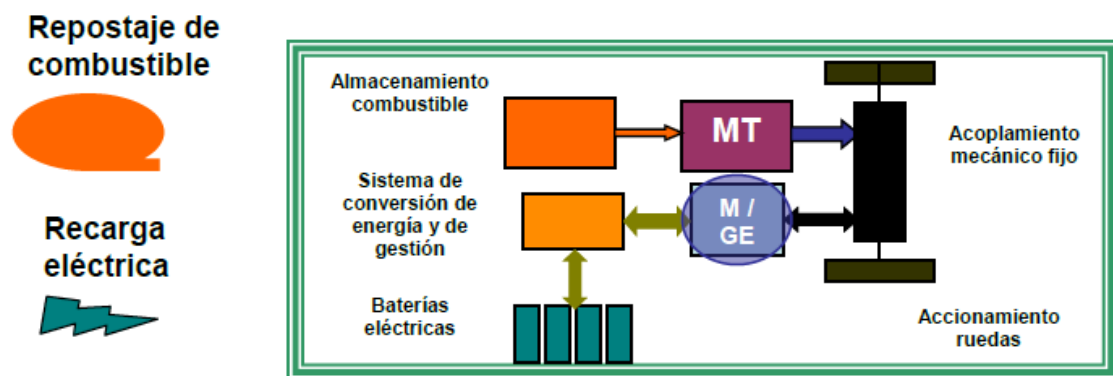


Figura 7. Configuración híbrido enchufable [2]

Este sistema presenta las ventajas de la configuración híbrida de rango extendido, pero además con la ventaja de que las baterías eléctricas pueden obtener energía de fuentes externas. Esto permite que el sistema eléctrico pueda realizar cortos trayectos sin el uso del motor de combustión.

3. POSIBILIDADES PARA LA PROPULSIÓN DE VEHÍCULOS

3.1. Motor térmico de combustión interna

Un motor de combustión interna funciona en base al consumo de combustible a partir de una mezcla con aire del exterior comprimiendo la mezcla en distintas relaciones. El proceso se lleva a cabo dentro de los cilindros del bloque motor que permiten incrementar la presión interna y con ello generar la potencia necesaria para realizar el movimiento del vehículo.

De acuerdo a la mezcla de aire y combustible y la disposición de los mismos en la cámara de combustión se pueden diferenciar cuatro tiempos en un motor de combustión interna los cuales son: admisión, compresión, combustión y escape.

Admisión: En esta etapa el pistón se encuentra en movimiento descendente a través del cilindro mientras que la válvula de admisión inicia su apertura, esto permite llenar el cilindro de una mezcla de aire fresco procedente del exterior a través del sistema de admisión de aire y de combustible.

Compresión: En esta etapa las válvulas están completamente cerradas, el proceso comienza en el PMI y el pistón inicia un movimiento ascendente comprimiendo la mezcla de aire-combustible. Esta fase termina en el PMS comprimiendo la mezcla al volumen mínimo.

Combustión: Cuando el pistón alcanza el PMS la mezcla ha alcanzado su máxima compresión en ese instante se genera una chispa por medio de las bujías. Esta chispa genera una explosión y debido a la fuerza ejercida en la cara del pistón este se desplaza rápidamente en sentido descendente.

Escape: Una vez el pistón se encuentra en el PMI se abre solamente la válvula de escape para permitir que los gases generados en la combustión sean liberados de la cámara de combustión.

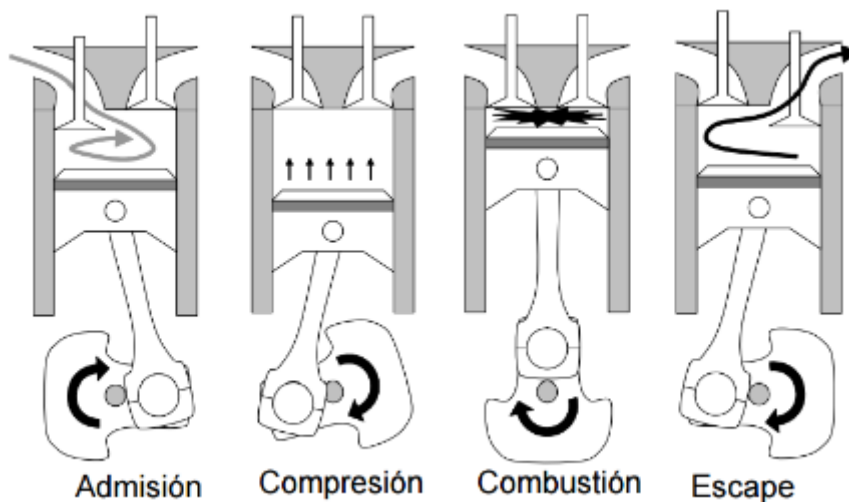


Figura 8. Tiempos en la cámara de combustión

Cada combustible tiene un poder calorífico distinto que representa la cantidad de energía que se puede desprender al producirse la combustión. En la tabla 1 se pueden observar los distintos poderes caloríficos de los distintos combustibles:

Tabla 1. Poderes caloríficos combustibles

	DENSIDAD [KG/M ³]	PCI [MJ/KG]	PCS [MJ/KG]
GASOLINA	750	44	47.3
GASÓLEO	810	43.2	46.1
GAS NATURAL	0.78	50	55.6
ETANOL	785	26.9	29.7

La energía química del combustible se transforma en energía de presión al realizar la combustión en el interior de la cámara, obteniendo la potencia indicada (\dot{W}_i). La potencia indicada es fácil de calcular si se conoce la presión media efectiva (P_{mi}), la cilindrada y las revoluciones a las que gira el motor:

$$\dot{W}_i = P_{mi} * V_D * n * i \quad (Ec. 1)$$

Donde P_{mi} es la presión media indicada, V_D es la cilindrada del vehículo, n las revoluciones del motor e i es el índice de tipo de ciclo. En este caso como es un motor de cuatro tiempos el valor i es de 0,5, esto indica que el ciclo termodinámico se produce cada dos vueltas.

El rendimiento indicado, expresa el rendimiento con el que se transforma la energía almacenada en el combustible en energía mecánica en el pistón:

$$\eta_i = \frac{\dot{W}_i}{m_{comb} * H_c} \quad (Ec. 2)$$

La potencia desarrollada en el interior del cilindro \dot{W}_i no se transmite directamente íntegramente al eje de motor de salida \dot{W}_e , parte de la energía perdida es debida a los rozamientos de las partes mecánicas del motor. Por lo tanto, se puede expresar \dot{W}_e como:

$$\dot{W}_i = \dot{W}_e + W_{roz} \quad (Ec. 3)$$

Por lo tanto, se puede expresar \dot{W}_e como:

$$\dot{W}_e = P_{me} * V_D * n * i \quad (Ec. 4)$$

El rendimiento mecánico relaciona ambas potencias:

$$\eta_m = \frac{\dot{W}_e}{\dot{W}_i} \quad (Ec. 5)$$

Un aspecto importante de cara al consumidor es el consumo, este depende de las fuerzas resistentes, del rendimiento de la transmisión y del consumo específico. Se suele expresar en volumen de combustible consumido por distancia, lo más común es $l / 100 \text{ km}$ y su expresión es la siguiente:

$$C_f = \frac{g_e \cdot \dot{W}_e}{\rho_f \cdot v} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde g_e es el consumo específico del motor, \dot{W}_e es la potencia efectiva, ρ_f es la densidad del combustible y v la velocidad del vehículo.

Las condiciones de funcionamiento de un motor vienen representadas normalmente mediante curvas de carga parcial. Estas curvas se obtienen con diferentes valores de par manteniendo el régimen constante y analizando el consumo específico en cada punto de funcionamiento. Se representan por medio de mapas como la figura.

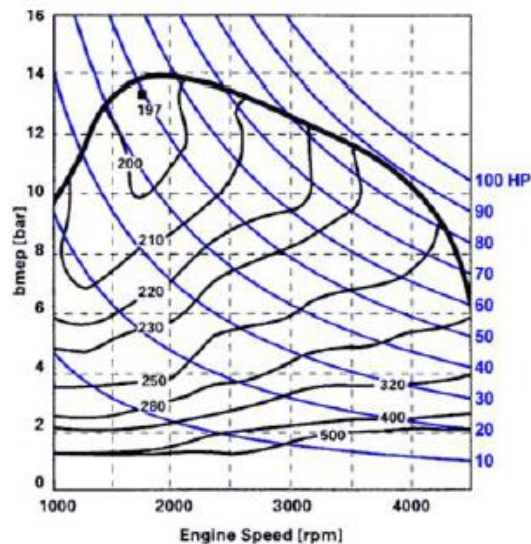


Figura 9. Curvas de carga parcial

En la siguiente figura se muestra el par, la potencia máxima y el consumo de combustible en función del régimen para curvas de plena carga. Como se puede observar en los motores de encendido provocado el par tiene una caída cuando las revoluciones son muy altas debido al rendimiento mecánico, sin embargo, la potencia obtenida es mayor en este tipo de motores.

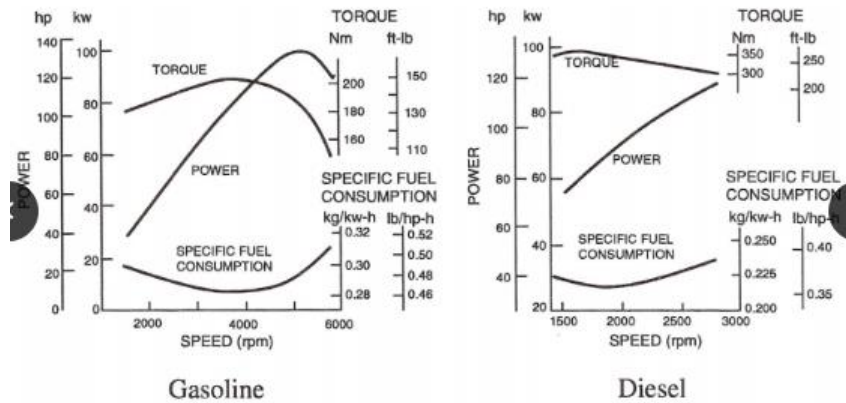


Figura 10. Curvas características motores gasolina y diésel

En el caso de los motores de encendido por compresión se puede modificar las curvas de plena carga modificando los instantes de apertura y cierre de válvulas. En el caso de motores de encendido provocado las curvas de par se adaptan modificando el dosado a través del control electrónico para limitar la potencia máxima o por motivos de emisiones.

Los motores de combustión transforman la energía del combustible en energía de movimiento, este cambio produce contaminantes o elementos que no pueden ser aprovechados al exterior. En el caso de motores de combustión los principales contaminantes son:

- Dióxido de carbono (CO₂): Este compuesto se forma debido a la combustión completa del combustible dentro de la cámara.
- Monóxido de carbono (CO): Este compuesto es mayor cuando la temperatura de combustión es más baja y también por la disminución de la concentración de oxígeno.
- Hidrocarburos sin quemar (HC): Principalmente se producen por una falta de combustión completa dentro de la cámara.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): Aparece cuando hay exceso de oxígeno y altas temperaturas dentro de la cámara de combustión.
- Partículas sólidas (humos): Se produce principalmente en los MEC debido a altas temperaturas y falta de oxígeno que limitan la buena combustión.

3.2. Motor eléctrico

Un motor eléctrico es una máquina eléctrica rotativa que transforma la energía eléctrica en energía mecánica mediante un proceso electromagnético. Este tipo de motor ofrece múltiples ventajas frente al motor de combustión interna convencional, como la mayor eficiencia y la fiabilidad a lo largo del tiempo.

Las máquinas eléctricas que nos podemos encontrar en la tracción eléctrica son los motores asíncronos o de inducción, síncronos de imanes permanentes, de flujo axial, de reluctancia conmutada o de corriente continua sin escobillas.

A continuación, se analiza cada tipo de motor eléctrico:

- Motores asíncronos o de inducción:
 Son los motores más extendidos en la industria, aproximadamente el 75% del total, destacan su robustez, su bajo coste y el escaso mantenimiento.
 Estos motores se componen principalmente de un estator, un rotor con sus respectivos aislamientos.

El estator se compone de unas chapas metálicas de silicio con ranuras que permiten el paso de corriente eléctrica, el número de estas chapas puede ser diferente en cada motor, esto también es conocido como el devanado trifásico del estator. El rotor también está formado por pequeñas chapas que reciben el campo magnético generado por el estator y así produciendo el giro.

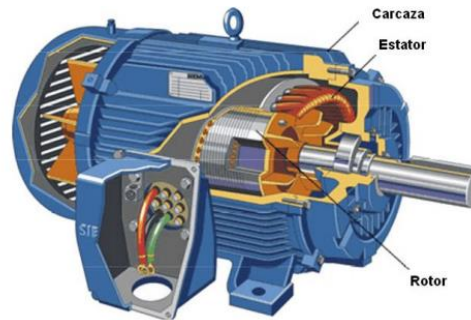


Figura 11. Partes motores asíncrono [9]

La velocidad de rotación como motor del rotor siempre es ligeramente menor que la velocidad del estator, esto es debido a que en el rotor se genera un campo magnético que impide que nunca se igualen las velocidades. Al actuar como generador la velocidad del rotor será mayor que la del estator y aparecerá un par en el eje para contrarrestarlo.

Para poder funcionar este tipo de motores es necesario un sistema de control que cambie de frecuencia y la tensión de alimentación del motor.

- Motores síncronos de imanes permanentes:

Estos motores son el segundo tipo de motor más utilizado en la tracción eléctrica. Tiene mayor densidad de potencia y mejor rendimiento que los motores asíncronos.

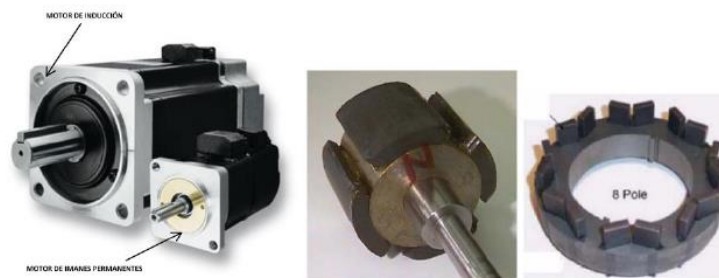


Figura 12. Partes motores síncrono [9]

Un motor síncrono está formado por un devanado del estator similar a la de los motores asíncronos y por un devanado del rotor o de excitación alimentado por corriente continua. La principal diferencia es que la velocidad del eje es igual a la del campo magnético creado. Incluyendo imanes permanentes de alta energía se consigue alimentar al devanado de excitación sin usar escobillas y anillos.

- Motores de reluctancia conmutada:

El componente más importante del par electromagnético se produce por la variación de la reluctancia (resistencia al paso de flujo en un campo magnético) a lo largo del entrehierro del motor. El estator está formado por seis bobinas concentradas y el rotor no tiene devanado y está

constituido por una chapa magnética que en función de la posición tendrá más o menos reluctancia.



Figura 13. Partes motores de reluctancia [9]

Las principales ventajas de este tipo de motor son la robustez, la sencillez de fabricación, la sencillez electrónica y de control y que son idóneas para elevados pares de funcionamiento. Sin embargo, es necesario un sistema de detección de posición, el par presenta un alto rizado y el factor de potencia es bastante bajo.

- Motores de corriente continua sin escobillas:

Este tipo de motores destaca por su sencillez y facilidad para regular la velocidad. Tiene unos imanes permanentes en el rotor y unas bobinas de inducido en el estator, constituyendo un devanado monofásico o polifásico.



Figura 14. Partes motores de CC [9]

Su funcionamiento se basa en la alimentación por fases de cada una de las bobinas del estator de forma sincronizada con el movimiento del rotor. Así los imanes siguen el movimiento del campo magnético y su desplazamiento depende del giro del rotor.

Los motores eléctricos se caracterizan por tener una curva de potencia muy buena a altas revoluciones, por lo que proporcionan una potencia constante y esto permite obtener el par máximo a bajas velocidades, y el par mínimo a altas revoluciones.

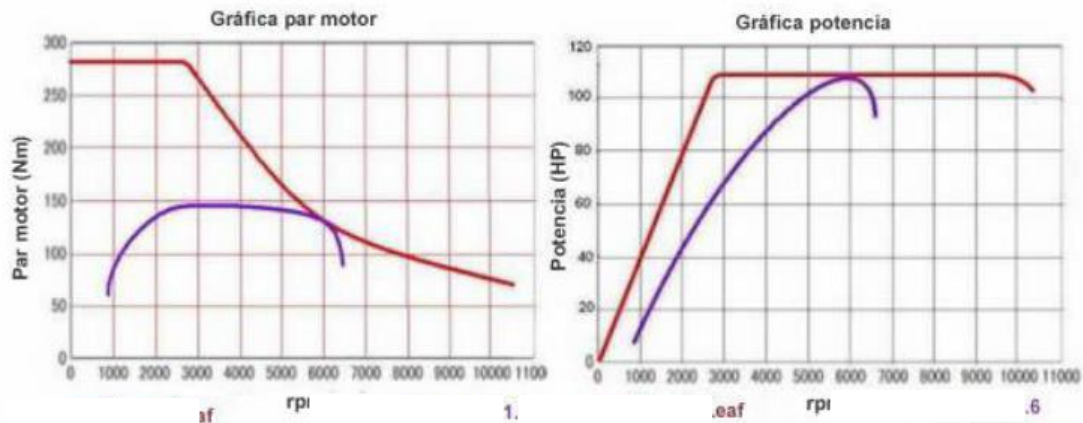


Figura 15. Curvas características para motores eléctricos (rojo) y motores térmicos (azul) [8]

Para la propulsión de los vehículos se utilizan motores de corriente alterna, los más utilizados son los motores síncronos de imanes permanentes, aunque a veces también se usan motores asíncronos.

El control de motores de corriente alterna requiere de un inversor electrónico que genera a partir de una corriente continua, proporcionada por la batería, una corriente alterna de frecuencia variable. Para aumentar la velocidad se aumenta la frecuencia por lo tanto el control es más complejo que los sistemas de motores de corriente continua.

La electrónica actual permite el control de la velocidad de los motores de corriente alterna y la asistencia del frenado regenerativo, esto aumenta la eficiencia de los motores eléctricos. Por lo tanto, los motores eléctricos tienen unas prestaciones y un rendimiento muy superior a los motores de combustión convencionales, a parte, tienen un coste y un mantenimiento menor. La eficiencia del motor eléctrico es superior al 90%, mientras que el motor de combustión interna está en torno al 20%. Por lo tanto, el punto fuerte para los motores eléctricos actuales es la batería.

3.3. Frenado Regenerativo

El frenado regenerativo es capaz de transformar la energía cinética del vehículo en movimiento, en energía eléctrica que se almacena en las baterías. Durante la frenada de un vehículo convencional la energía cinética se convierte en energía térmica por medio de mecanismos de fricción. La energía disipada por los frenos convencionales es muy alta y no es aprovechada en los vehículos.

El frenado regenerativo también es conocido como KERS (Kinetic Energy Recovery System), y los dos tipos más importantes son el mecánico y el eléctrico, aunque también hay un tipo hidráulico pero su uso es muy poco frecuente.

- Sistema de Frenado Regenerativo Mecánico:

El sistema que utiliza el frenado regenerativo mecánico es con un volante de inercia, que puede girar alrededor de 80,000 rpm, cuanto más velocidad angular, más energía puede recuperar. A diferencia con el sistema de frenado regenerativo eléctrico la energía no cambia de estado por lo tanto el sistema es más eficiente.

Los principales inconvenientes de este tipo de sistema es que se necesita que los volantes de inercia giren muy rápido o que sean muy pesados, en cualquiera de los dos casos aumenta los efectos giroscópicos que dificultan la maniobrabilidad.

- Sistema de Frenado Regenerativo Eléctrico:

El sistema de frenado regenerativo eléctrico utiliza un motor eléctrico como un generador. Al girar el motor genera unas fuerzas inducidas y por lo tanto una corriente eléctrica que se almacena

en baterías. Normalmente se utiliza el motor eléctrico como generador, aunque en algunos casos se incluye dos motores que pueden ser tanto motores como generadores.

El frenado regenerativo no ejerce la fuerza necesaria para frenar el vehículo, por lo tanto, no se puede eliminar los frenos convencionales.

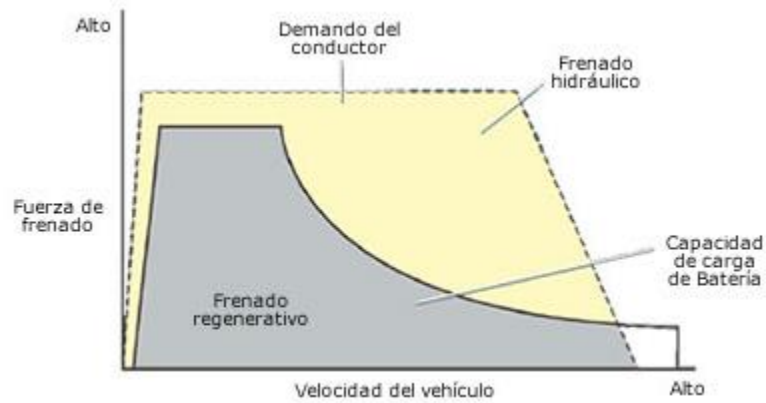


Figura 17. Curvas características frenado regenerativo

Las pérdidas por rozamiento en la transmisión son mínimas ya que el movimiento de las ruedas se transmite a través del diferencial y los engranajes intermedios al generador eléctrico. El sistema de frenado regenerativo consigue recuperar un 70% de la energía eléctrica disponible.

4. BATERIAS PARA ALMACENAMIENTO A BORDO DE VEHÍCULOS

Las baterías son un elemento fundamental en los vehículos híbridos y eléctricos ya que es el elemento que almacena energía en forma eléctrica para ser posteriormente usada, así disminuyendo el uso continuo de combustibles fósiles para realizar el movimiento de los vehículos.

Una batería está formada por un conjunto de células en cada una de las cuales se produce una reacción química reversible. Se trata de un intercambio de iones y electrones entre los dos polos. Cuando se descarga una batería se produce una corriente eléctrica que sirve para accionar un motor eléctrico que propulsa el vehículo. Sin embargo, durante la carga los iones y electrones vuelven a su posición inicial debido a un aporte de energía externo.

Cada célula está formada por un cátodo (electrodo positivo) un ánodo (electrodo negativo), un separador y un electrolito que separa los dos electrodos y es el medio para la transferencia de carga.

Durante el proceso de descarga el electrodo positivo se reduce mientras que el electrodo negativo se oxida. El electrolito permite la conducción iónica entre ambos y puede ser tanto líquido o sólido. El separador es el encargado de aislar eléctricamente los dos electrodos.

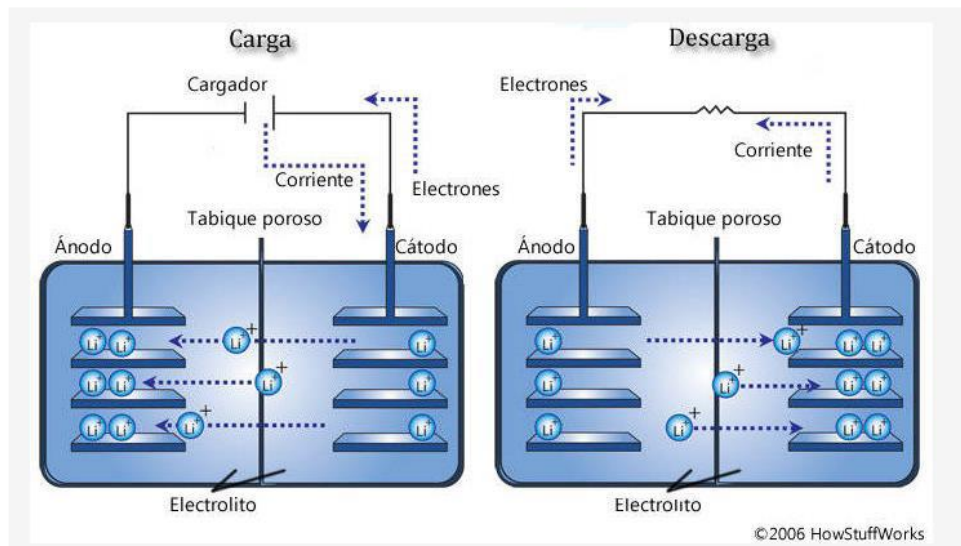


Figura 18. Funcionamiento batería [7]

Existen tres tipologías de baterías en función de su química: las baterías de Plomo-Ácido, las de Metal-Níquel y las de Ion-Litio. La selección entre los distintos tipos de baterías es una decisión de compromiso entre la potencia específica, los costes, la densidad energética, la seguridad y la durabilidad.

Las baterías de Plomo-Ácido son las comúnmente usadas en los vehículos convencionales para alimentar la electrónica simple. Estas baterías tienen un bajo coste, tienen una buena potencia específica (W/Kg), tienen un buen comportamiento en un amplio margen de temperaturas y además son fáciles de reciclar. Como principal inconveniente es que estas baterías tienen una densidad energética muy baja, pueden almacenar solamente hasta 40 Wh/Kg.

Las baterías de Níquel-Metal son las baterías normalmente utilizadas en los vehículos híbridos como el "Toyota Prius". Estas baterías tienen una buena potencia específica, el ciclo de vida es largo y presenta muy bajo riesgo medioambiental tanto en su uso como en su reciclaje. Sin embargo, tienen un alto índice de descarga en periodos de inactividad y su coste de producción es bastante elevado. La densidad energética de este tipo de baterías es de 60 Wh/Kg.

Las baterías de Ion-Litio tienen un voltaje, una densidad energética, una potencia específica, una eficiencia de carga y un ciclo de vida mayor que las dos anteriores. Sin embargo, el coste de producción

es bastante mayor y además son menos robustas ante variaciones de voltaje y por lo tanto necesitan un sistema de gestión de baterías para su correcto funcionamiento.

Hay mucha variedad de baterías en el mercado en función de las necesidades, pero sin embargo actualmente las baterías de Níquel metal hidruro (NiMH) son el tipo de batería más utilizado en vehículos eléctricos e híbridos debido a sus características de rendimiento.

En la figura se muestra el funcionamiento de una batería de NiMH. El electrodo negativo es el metal hidruro (MH) y el material del electrodo positivo es Ni(OH)₂. El separador en este caso es de polietileno injertado (PE) y polipropileno (PP). El electrolito es una solución acuosa de KOH con valores ácidos.

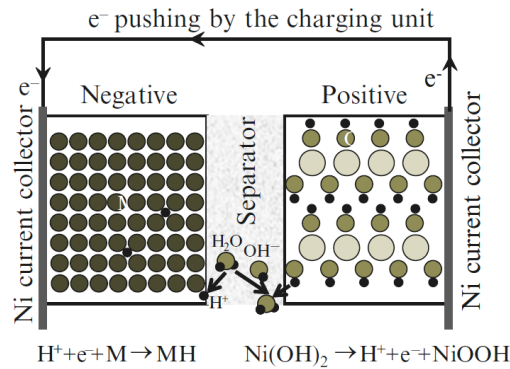


Figura 19. Funcionamiento batería NiMH [7]

Los parámetros más importantes de una batería como fuente de energía para la propulsión de un vehículo son: su precio unitario (€/kWh), su densidad de energía (kWh/Kg), la velocidad de carga y descarga (que está limitada por las reacciones químicas) y el número de cargas / descargas que admite.

Los ultra condensadores son condensadores de muy alta capacidad, su carga y descarga no conlleva como tal una reacción química, por lo cual tienen la ventaja que el proceso de carga y descarga es muy rápido. Pueden dar mucho potencial al descargarse y no se degradan. En la actualidad no están totalmente desarrolladas, su capacidad aun es pequeña y su precio muy elevado.

Tabla 2. Características diferentes baterías

Tipo de batería	Coste (€/Wh)	Densidad de energía (Wh/Kg)	Ciclos de vida	Temperature range
Plomo-ácido	0.14	41	500	-30-+50
NiMH	0.80	95	800	-40-+50
NiCad	1.20	39	800	-40-+50
Lithium-ion	0.35	128	1,000	-40-+60
Ultracondensadores	50,000	5	500,000	-40-+85
GASOLINA	0.00015	12,700	1	

5. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USADOS EN LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS

Hay muchos tipos de transmisiones en los vehículos, que son los encargados de transferir la energía procedente de los motores, tanto de combustión como eléctricos, a las ruedas y así proporcionar movimiento. Sin embargo, en la mayoría de los vehículos híbridos hay dos tipos de transmisiones: engranajes planetarios y sistema de variador continuo (CVT).

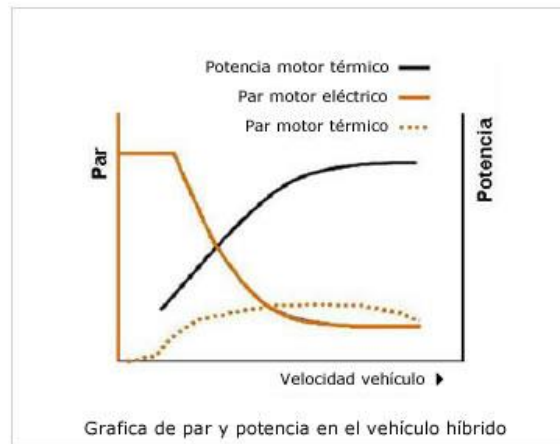


Figura 20. Curvas características motor térmico, eléctrico y conjunto

5.1. Engranajes planetarios

Un engranaje planetario o engranaje epicicloidal es un sistema de engranajes llamadas satélites que rotan sobre un eje central o planeta. Los satélites se montan sobre un brazo móvil, porta satélites o carrier que a su vez puede rotar con respecto al eje. Se incorpora también un engranaje externo con un dentado interior denominado corona o anillo, que engrana con los satélites.

El engranaje planetario en un vehículo híbrido tiene la siguiente configuración:

- Engranaje central o planeta unido al generador eléctrico (MG1).
- El porta satélites está unido al motor térmico.
- La corona está unida al motor eléctrico (MG2).

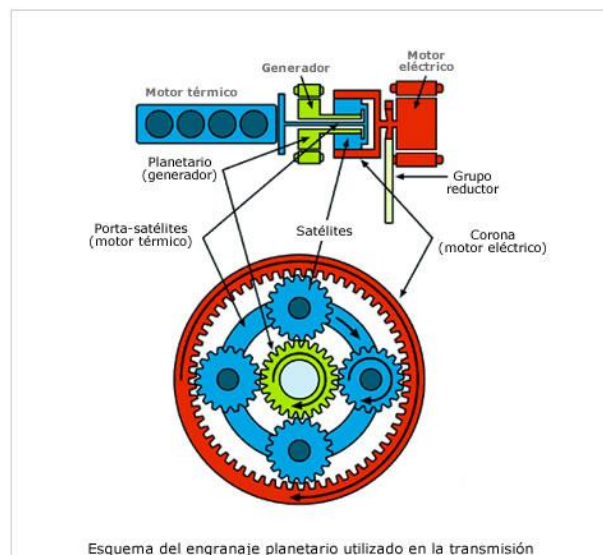


Figura 21. Engranaje planetario [10]

La corona está conectada con las ruedas del vehículo a través de diferentes engranajes.

Los diferentes puntos de funcionamiento del sistema de transmisión engranajes planetarios, basados en [10] son:

- Carga de baterías vehículo parado

Cuando el SOC de la batería es bajo el ICE se activa, aunque el vehículo no esté en movimiento. Por lo tanto, el motor eléctrico MG1 actúa como generador.

- Arranque con motor eléctrico

El motor eléctrico MG2 genera un movimiento que hace girar la corona, y esta a su vez mueve las ruedas. En este caso el ICE está desactivado y el motor eléctrico MG1 se mueve libremente, es decir, no genera ni consume energía.

- Arranque con motor térmico

El motor eléctrico MG1 genera un movimiento rotacional que actúa sobre el ICE, generando el arranque; en este tipo de transmisiones se elimina el motor de arranque tradicional. Una vez que el ICE ha alcanzado la velocidad de ralentí se transfiere la energía a las ruedas. El motor eléctrico MG2 genera una resistencia al movimiento, esto permite que, para desarrollos cortos es decir velocidades bajas, la energía sea la adecuada.

En este caso el motor eléctrico MG1 gira libremente para no generar pérdidas.

- Arranque con motor eléctrico y motor térmico

El motor eléctrico MG2 también genera un movimiento en la corona, el ICE también genera energía moviendo el porta satélites; las dos fuerzas se unen y se dirigen hacia las ruedas.

El motor eléctrico MG1 actúa como generador; siempre que el ICE esté moviéndose el MG1 se moverá.

- Aceleración brusca

Cuando el vehículo se encuentra en condiciones estables, velocidad estacionaria, y de repente se le demanda una aceleración relativamente alta todos los componentes de la transmisión generan potencia. El ICE actúa sobre el porta satélites, el motor eléctrico MG2 genera movimiento en la corona, y el generador eléctrico MG1 genera energía eléctrica para el motor eléctrico MG2.

- Deceleración

Si la aceleración es cero el vehículo aprovecha la energía cinética para cargar las baterías. En este caso el ICE se desconecta, y tanto el motor eléctrico MG1 como el MG2 actúan como generadores, convirtiendo la energía rotacional en energía eléctrica.

- Marcha atrás

La marcha atrás siempre se realiza con el motor eléctrico MG2, ya que puede actuar en ambos sentidos.

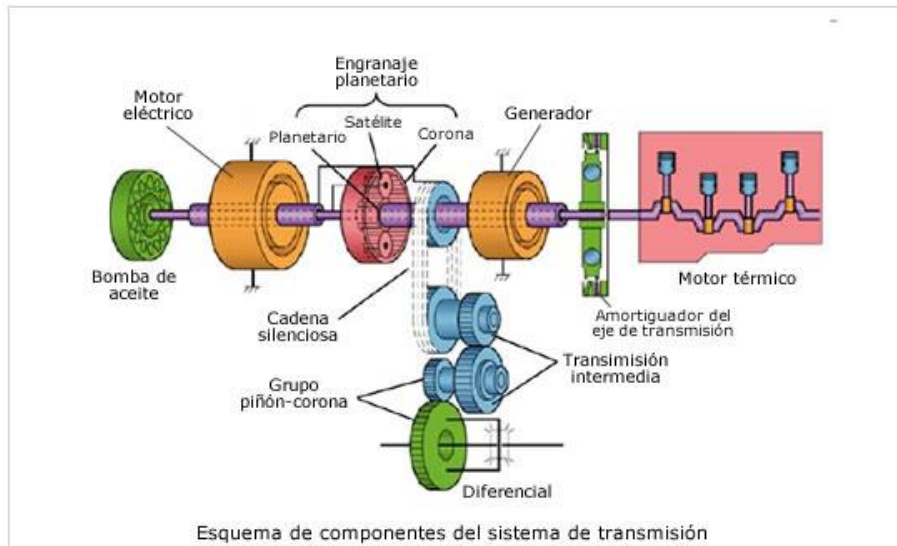


Figura 22. Conexión engranaje planetario [10]

El diseño de la caja de engranajes planetarios permite que la velocidad del motor térmico funcione en una proporción constante con respecto a la velocidad del vehículo, lo que beneficia en un consumo de combustible más óptimo. Obviamente, la potencia del motor de combustión que se envía a la parte eléctrica es menos eficiente que la que se envía a la parte mecánica, sin embargo, la energía almacenada de la batería puede ser usada después de una forma más eficiente, lo que ayuda que, en su conjunto, el vehículo mejore su eficiencia.

El sistema de transmisión con engranajes planetarios tiene como ventajas principales el menor peso con respecto a otro tipo de transmisiones y la menor pérdida por rozamientos y por lo tanto el aumento del rendimiento.

5.2. Sistemas continuamente variables (CVT)

Una transmisión continuamente variable o CVT es un tipo de transmisión semiautomática que puede cambiar la relación de cambio a cualquier valor dentro de unos valores, es decir, puede introducir una marcha a nivel continuo sobre unos valores.

Las diferentes relaciones se consiguen por medio de las relaciones de los diámetros que pueden adoptar las roldanas y por eso se considera como casi infinito el número de marchas entre los valores extremos. Los CVT actuales cuentan con la posibilidad de realizar los cambios en manual simulando tener 6 o 7 marchas a unas posiciones prefijadas de las poleas.



Figura 23. Sistema de variación continua

El cambio en la anchura de las poleas se consigue mediante la presión de los circuitos hidráulicos, y la transmisión de fuerza al motor se realiza por medio un embrague convencional, uno electrohidráulico o un convertidor de par.

La ventaja de este sistema de transmisión es debido al limitado número de marchas simuladas ya que realiza la transmisión en el punto exacto en el cual se tiene el mejor rendimiento y por lo tanto las mejores prestaciones.

Pero las principales desventajas son la limitación de par máximo que puede transmitir este tipo de configuración. Otra desventaja, es el tiempo de reacción de estas transmisiones, es bastante lenta comparada con la transmisión con engranajes planetarios.

6. CICLOS DE CONDUCCIÓN PARA VEHÍCULOS AUTOMÓVILES

Las emisiones de un vehículo obedecen a múltiples y diversos factores. Desde factores ambientales, como la temperatura, la altitud y la humedad; a factores más específicos del vehículo como son la aerodinámica y el estado de los neumáticos. Otro factor importante es el relativo a la conducción como son la velocidad y la aceleración.

Para poder comparar los diferentes modelos de vehículos es necesario tener unas condiciones de ensayo similares, por eso se utilizan los ciclos de conducción. Los ciclos de conducción son creados por diversos países y organizaciones para poder analizar el rendimiento de los vehículos. Un ciclo de conducción es una pauta de funcionamiento del vehículo en el cual se relacionan unas variables de tiempo con unas variables de velocidad.

6.1. NEDC

El ciclo NEDC (New European Driving Cycle) es el llamado comúnmente ciclo “Europa”, es el ciclo de homologación obligatorio que debían de superar todos los vehículos para poder ser comercializados en Europa.

El New European Driving Cycle (NEDC), es un ciclo de conducción compuesto de cuatro ciclos de conducción ECE-15 repetidos (representación conducción urbana), y un ciclo de conducción extraurbana, que se representa por el ciclo Extra-Urban Driving Cycle (EUDC).

Estas pruebas se realizan en entornos controlados de humedad y temperatura; la temperatura debe estar entre los 20 y los 24 grados centígrados y con el vehículo sobre unos rodillos. Antes de realizar el test el vehículo debe haber estado al menos 6 horas y media sin funcionar y a la temperatura de ensayo. Esto simula un arranque común de un vehículo.

Las dos partes de las que consta el ciclo NEDC son:

- Parte Urbana:

Esta parte del ciclo se basa en aceleraciones, frenadas, velocidades bajas mantenidas y estados de reposo (velocidad nula). Todo ello simula una conducción en ciudad con sus respectivas aceleraciones y continuas paradas y arrancadas. La velocidad máxima alcanzada en esta parte del ciclo es de 50 km/h y se recorren aproximadamente 4 km en cuatro ciclos de poco más de 3 minutos cada uno.

- Parte Extraurbana:

Esta parte del ciclo se basa en periodos de velocidad mantenida (50 km/h, 70 km/h, 100 km/h y 120 km/h). Esta parte del ciclo se realiza a continuación de la parte Urbana. La velocidad máxima en esta parte es de 120 km/h y se recorre una distancia aproximada de unos 7 km en apenas 6 minutos.

Ciclo de conducción NEDC

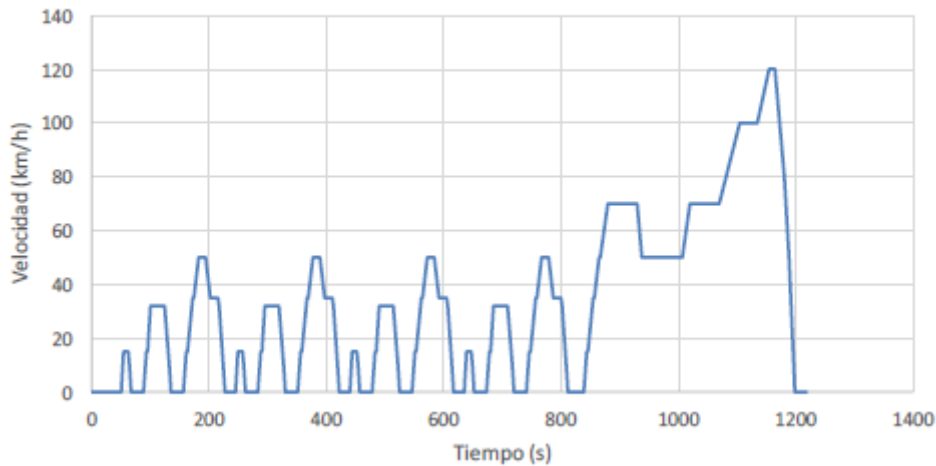


Figura 24. Ciclo de conducción NEDC

6.2. WLTC

El ciclo WLTC (Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycle) es un nuevo procedimiento, más dinámico que el ciclo NEDC, al contar con muchas más aceleraciones y frenadas. El ciclo es una representación más real del modo de conducción. Este procedimiento nace a partir de la base de datos de conducción procedentes de todas las partes del mundo y cubriendo todas las posibles realidades que se le dan al uso del automóvil. Este tipo de ciclo está adaptado a las nuevas tecnologías, ofreciendo la regulación para vehículos eléctricos e híbridos.

Este ciclo de conducción no distingue parte urbana de extra-urbana, sin embargo, existen 4 clases de ciclos de conducción que son:

- Parte Low:
Esta parte del ciclo tiene una duración de 589 segundos, en los que recorre aproximadamente 3 kilómetros, con una velocidad máxima de 56,4 km/h y unas aceleraciones máximas de -1,5 y +1,5 m/s².
- Parte Medium:
La duración de esta parte es de 433 segundos, se recorren aproximadamente 4,7 kilómetros, con una velocidad máxima de 76,6 km/h y unas aceleraciones entre -1,5 y 1,6 m/s².
- Parte High:
Esta parte del ciclo dura 455 segundos, el recorrido es de aproximadamente 7 kilómetros. La velocidad máxima es de 97,4 km/h y las aceleraciones máximas son las mismas que en la parte "Medium".
- Parte Extra High:
Esta parte dura 323 segundos y con un recorrido de 8,2 kilómetros. La velocidad máxima es de 131,3 km/h. Las aceleraciones máximas están comprendidas entre -1,2 y 1 m/s².

Dependiendo del tipo de vehículo y más concretamente del ratio potencia-peso se configuran cuatro tipos de conducción. Las clases de vehículos son:

- Clase 1:
Vehículos con una relación potencia-peso menor de 22 kW/Tm. Se realizan solo la parte Low y la parte Medium.
- Clase 2:

Vehículos con una relación potencia-peso entre 22 y 34 kW/Tm. Realizan la parte Low, Medium y High.

- Clase 3:

Vehículos con una relación de potencia-peso mayor que 34 kW/Tm. Realizan las cuatro partes del ciclo de conducción.

Si el vehículo no es capaz de alcanzar la velocidad máxima se sustituiría esa parte por la parte inmediatamente anterior. Por lo tanto, si un vehículo de clase 3 no es capaz de alcanzar la velocidad máxima de 131,3 km/h, la secuencia que tendría que realizar sería el siguiente: Low, Medium, High y High.

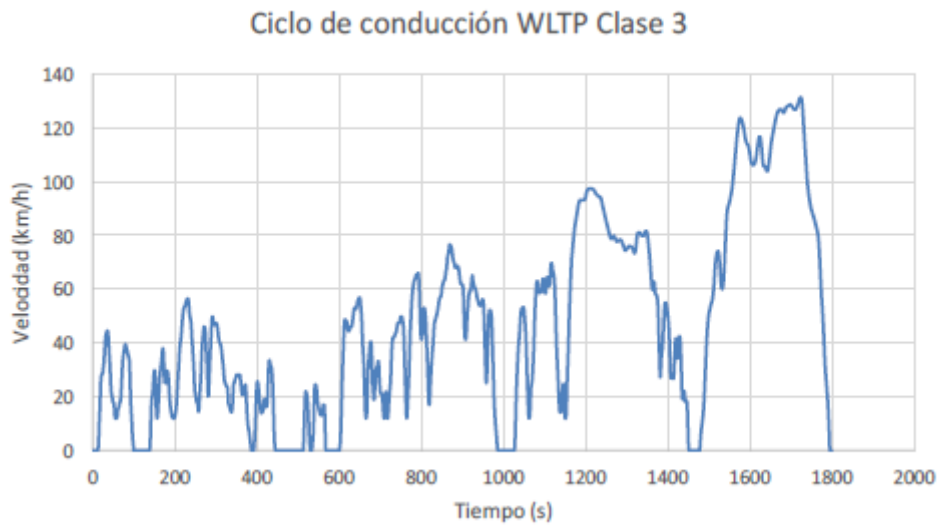


Figura 25. Ciclo de conducción WLTC

7. REQUERIMIENTOS PARA LA PROPULSIÓN DE UN VEHÍCULO

Para analizar el vehículo es necesario conocer las interacciones con el entorno. Analizando los fundamentos de la dinámica vehicular se puede obtener la resistencia al avance que es necesaria para realizar un recorrido. A continuación, se muestra la fórmula de la segunda ley de Newton aplicada en la dirección longitudinal del vehículo.

$$F_t - \sum F_r = m * km * a \quad (\text{Ec.7})$$

Donde F_t corresponde a la fuerza tractora y F_r al sumatorio de fuerzas resistentes. Se agrupan las fuerzas resistentes en tres principalmente:

- Resistencia a la rodadura
- Resistencia aerodinámica
- Resistencia gravitatoria

7.1. Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura se produce principalmente en los neumáticos de los vehículos debido al contacto de la rueda por la superficie por la que circula. Esta resistencia es generada principalmente por la histéresis de los materiales que componen el neumático y las flexiones sucesivas a las que están sometidas al rodar. La resistencia por rozamiento también es generada debida rozamientos y conexiones mecánicas del vehículo. Su expresión matemática es la siguiente:

$$F_{rod} = (f_0 + f_v * V^n) * M * g * \cos\theta \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde f_0 es el coeficiente de fricción independiente de la velocidad, f_v es el coeficiente de fricción dependiente de la velocidad V , que es la velocidad del vehículo; M es la masa del vehículo, g es la aceleración de la gravedad y θ es el ángulo de la pendiente.

Se puede agrupar los términos de coeficiente de fricción en un solo termino:

$$f_r = f_0 + f_v * V^n \quad (\text{Ec. 9})$$

Los principales factores que al coeficiente de resistencia a la rodadura son:

- La estructura del neumático. Los neumáticos radiales tienen menor f_r que los diagonales, debido a que los neumáticos radiales son más flexibles y por lo tanto no tienen tanta fricción.
- Estado y características de las superficies de rodadura, si la superficie es más dura tendrá menor f_r .
- Presión de hinchado de los neumáticos. Si la presión es baja aumenta f_r .
- La velocidad. Al aumentar la velocidad aumenta f_r .
- La temperatura. A mayor temperatura f_r es menor.

El coeficiente de rozamiento se puede expresar con fórmulas empíricas para simplificar los cálculos:

$$f_r = 0,01 * \left(1 + \frac{v}{160}\right) \quad (\text{Ec. 10})$$

Por lo tanto, la fuerza resistente de rozamiento se determina con la siguiente fórmula:

$$F_{rod} = \left(0,01 * \left(1 + \frac{v}{160}\right)\right) * M * g * \cos\theta \quad (\text{Ec. 11})$$

7.2. Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica es generada por la resistencia que ejerce el vehículo debido a la fricción a su paso a través del aire. Esta resistencia depende de dos componentes que son la forma del vehículo y el coeficiente aerodinámico.

En el movimiento del vehículo se generan dos zonas de presión, una que se opone al movimiento por empuje y otra que está a favor del movimiento del vehículo.

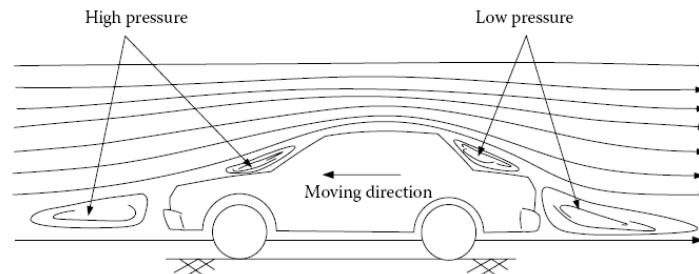


Figura 26. Líneas presión aerodinámica

La resistencia aerodinámica es función del área frontal, los elementos salientes del vehículo como son los espejos retrovisores laterales, las entradas de aire y otros elementos. La fórmula para la resistencia de la penetración aerodinámica es:

$$D_A = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A_f * v_{ref}^2 \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde ρ es la densidad del aire que depende de la altura y la temperatura, pero para este estudio se ha seleccionado un valor a unas condiciones comunes de $1,225 \text{ Kg/m}^3$, A_f es el área frontal del vehículo proyectada como se muestra en la figura.

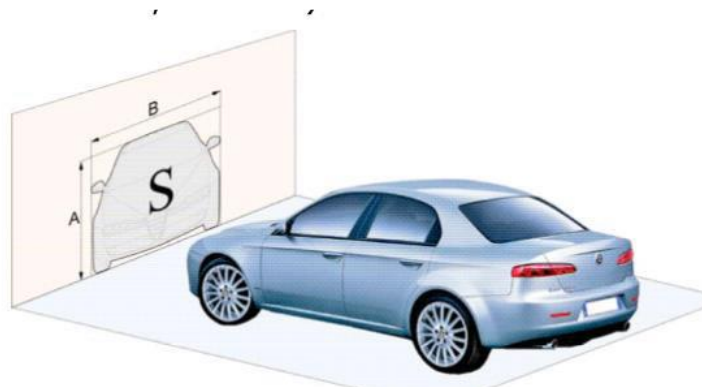


Figura 27. Área frontal vehículo

V_{ref} es la velocidad relativa entre el vehículo y la masa de aire que está atravesando.

$$v_{ref} = v - v_{aire} \quad (\text{Ec. 13})$$

C_D es el coeficiente de penetración aerodinámico o también llamado coeficiente de arrastre. Es un coeficiente adimensional que indica el grado de perturbación que la forma del vehículo produce en el aire que atraviesa, y los valores en automoción suele estar entre 0,25 y 0,40.

Hay dos influencias en el coeficiente de penetración aerodinámico:

- Debido al rozamiento viscoso de la carrocería con el aire al desplazarse. La influencia es bastante baja comparado con el siguiente punto.

- Debido a la diferencia de presiones entre la parte delantera del vehículo y la parte trasera. En la parte delantera se produce un incremento de presión muy grande debido a que la velocidad en dicha zona es nula. En la parte trasera, sin embargo, se produce un desprendimiento de la capa límite y se genera un flujo turbulento. Esta diferencia entre presiones genera una fuerza que se opone al movimiento del vehículo.

7.3. Fuerza de ascensión

La fuerza de ascensión es la fuerza necesaria para ascender una pendiente, esta es proporcional a la masa del vehículo y está relacionada con el ángulo de la pendiente:

$$F_p (N) = M * g * \text{sen}\theta \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde M es la masa del vehículo, g es la aceleración de la gravedad y θ es el ángulo de la pendiente.

7.4. Equilibrio de fuerzas

Las fuerzas resistentes calculadas anteriormente deben ser vencidas por el motor del vehículo para ello se debe tener en cuenta el desarrollo de la transmisión (i). Las revoluciones del motor se convierten en movimiento lineal gracias al sistema de transmisión. La velocidad será mayor o menor en función de la marcha engranada, el grupo diferencial y el radio de la rueda del vehículo. Estos tres parámetros conforman el desarrollo de la transmisión.

Cada marcha tiene una relación de transmisión distinta ya que depende del número de dientes de cada piñón que se engrane. Por ejemplo, la primera marcha tiene una velocidad de rueda menor que la quinta marcha en las mismas condiciones de revoluciones del motor.

El desarrollo se expresa con la siguiente fórmula:

$$d_i = \frac{v}{n} \quad (\text{Ec. 15})$$

Siendo v la velocidad lineal del vehículo, n el régimen de giro del motor o las revoluciones e i es la marcha engranada. Las unidades del desarrollo en SI son $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ aunque también se puede expresar como $\text{km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (1000\text{rpm})^{-1}$.

La fuerza que se transmite del motor a las ruedas debe ser superior a las fuerzas de resistencia que se oponen al desplazamiento, produciéndose así la aceleración del vehículo. Por lo tanto, una parte de la fuerza del motor se destina para superar las fuerzas resistentes, otra parte para acelerar el vehículo y otra parte se invierte para aumentar la velocidad angular de los elementos rotativos del tren de transmisión. Por lo tanto, la ecuación de equilibrio de fuerzas sería:

$$F_{tot} = F_{aer} + F_{roz} + F_{pend} + m * a + J_{TOT,R} \frac{\alpha_R}{r_R} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde a es la aceleración lineal del vehículo, $J_{TOT,R}$ es el momento de inercia total de las partes rotativas reducidas a la rueda, α_R es la aceleración angular de las ruedas y r_R es el radio de las ruedas.

Para simplificar los cálculos para la simulación:

$$m * a + J_{TOT,R} \frac{\alpha_R}{r_R} = m_{eq} * a = m * k_m * a \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde m es la masa del vehículo, k_m es un coeficiente de masas rotativas que incluye la aceleración angular de cada uno de los elementos rotativos y a es la aceleración longitudinal.

8. PLANTEAMIENTO GENERAL DIMENSIONADO VEHICULO HIBRIDO

Para dimensionar un vehículo híbrido hay que analizar las potencias necesarias para que el vehículo pueda moverse. Esta parte es muy importante porque un mal dimensionado puede ocasionar fallos como la falta de potencia o el exceso de peso lo que conlleva un aumento del consumo.

8.1. Potencia asociada a los sistemas de propulsión

La primera aproximación es analizar las potencias necesarias para realizar los diferentes movimientos.

A partir de la ecuación 16 se calcula la fuerza necesaria, esta se desglosa en aerodinámica, de rozamiento, con respecto a las pendientes, la aceleración y la fuerza de inercia de las partes rotativas.

Para obtener la potencia basta con multiplicar la fuerza calculada por la velocidad en el instante calculado. Para simplificar las ecuaciones se agrupan las potencias necesarias con el término N_{VH} .

Hay que tener en cuenta los sistemas eléctricos a bordo del vehículo que consumen energía como son el aire acondicionado, la radio... Estas potencias se agrupan con el término N_{SIST} .

A continuación, se determinan las potencias disponibles en un vehículo híbrido que se muestran en la siguiente ecuación.

$$(N_{MT} - N_{GE}) * \eta_{tMT} + N_{ME} * \eta_{tME} + N_{bBT} + N_{aAT} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

N_{MT} = La potencia del motor térmico.

N_{GE} = La potencia del generador eléctrico.

η_{tMT} = El rendimiento del motor térmico.

N_{ME} = La potencia del motor eléctrico.

η_{tME} = El rendimiento del motor eléctrico.

N_{bBT} = La potencia de la batería de baja tensión.

N_{aAT} = La potencia de la batería de alta tensión.

Se analizan brevemente las diferentes situaciones que se pueden presentar en un vehículo híbrido mixto.

- Vehículo parado en ralentí, sin cargar las baterías:

En este caso la potencia consumida por el vehículo es la de los sistemas eléctricos a bordo por ello la batería de baja tensión tiene que ser capaz de proporcionar la suficiente potencia para asegurar el mantenimiento del sistema eléctrico.

$$N_{bBT} > N_{SIST} \quad (\text{Ec. 19})$$

- Vehículo parado en ralentí, con carga de ambas baterías:

Para cargar las baterías se utiliza el motor térmico que además impulsa el generador eléctrico, por lo tanto:

$$N_{MT} = N_{GE} + N_{SIST} - N_{bBT} - N_{aAT} \quad (\text{Ec.20})$$

- Vehículo en funcionamiento:

En este caso las potencias de N_{VH} tienen que ser compensadas con el motor térmico y/o el motor eléctrico, por lo tanto:

$$N_{MT} + N_{ME} = N_{VH} + N_{SIST} \quad (\text{Ec. 21})$$

Si además se cargan las baterías el equilibrio queda de la siguiente forma:

$$(N_{MT} - N_{GE}) * \eta_{tMT} + N_{ME} * \eta_{tME} = N_{VH} + N_{SIST} - N_{bBT} - N_{aAT} \quad (\text{Ec. 22})$$

- Vehículo en deceleración y con carga de baterías:

En este caso el valor de N_{VH} es negativo y, por lo tanto:

$$(N_{MT} - N_{GE}) * \eta_{tMT} + N_{ME} * \eta_{tME} = -N_{VH} + N_{SIST} - N_{bBT} - N_{aAT} \quad (\text{Ec. 23})$$

Por lo tanto, el motor eléctrico y las baterías tienen que ser capaces de generar suficiente potencia para las situaciones antes descritas. Una vez calculada la potencia mínima necesaria se analizan las diferentes variedades de equipos eléctricos en el mercado y se elige la mejor opción, para que el peso y la capacidad de las baterías tengan un valor adecuado.

8.2. Autonomía

Si se elige una batería o equipo eléctrico con un peso excesivo este influirá negativamente en el rendimiento del vehículo y por lo tanto en su eficiencia y autonomía.

Para calcular la autonomía del vehículo híbrido hay que tener en cuenta no solo el motor térmico sino las recargas de la batería producidas cada vez que el vehículo tiene aceleraciones negativas.

En este caso para calcular la autonomía y por lo tanto la eficiencia del sistema se ha usado el consumo medio en un ciclo WLTC y el volumen de combustible almacenado dentro del tanque de combustible del vehículo.

Si el vehículo fuera híbrido enchufable este valor podría cambiar debido al estado inicial de carga de la batería durante la prueba. Pero en esta simulación se ha optado por la elección de híbrido no enchufable ya que el consumo durante el ciclo sería el mismo en las mismas condiciones iniciales de carga.

9. CONDICIONES GENERALES PARA EL MODELADO DE UN VEHÍCULO

La función de este apartado es mostrar y explicar las diferentes partes del modelado por Simulink. Para ello se explicarán los pasos seguidos usando los conceptos teóricos explicados anteriormente. La simulación se ha realizado a través del programa Matlab y con su interfaz Simulink que permite simular sistemas dinámicos.

El objetivo de esta simulación es analizar cómo influyen los sistemas de hibridación con respecto al vehículo convencional; analizando tanto los consumos como las emisiones de contaminantes.

9.1. Modelo vehículo propulsión convencional

Con respecto a la parte del motor de combustión interna alternativo se ha seleccionado un vehículo real para obtener resultados más realistas, en este caso se ha seleccionado el vehículo Renault Clío 1.5 DCI como el de la figura.



Figura 28. Renault Clío

La función principal de esta simulación es analizar la funcionalidad tanto positiva como negativa de la instalación de un sistema eléctrico de propulsión. Los resultados pueden ser extrapolables a cualquier tipo de vehículo ya que el simulador parte del estado dinámico del vehículo. Sin embargo, los valores numéricos son específicos de cada vehículo y por lo tanto es necesario cambiar los valores de entrada al simulador para obtener valores fiables.

El simulador se ha construido de manera encadenada, partiendo de la velocidad del ciclo elegido. Los pasos generales que se han dado para realizar la simulación son los siguientes:

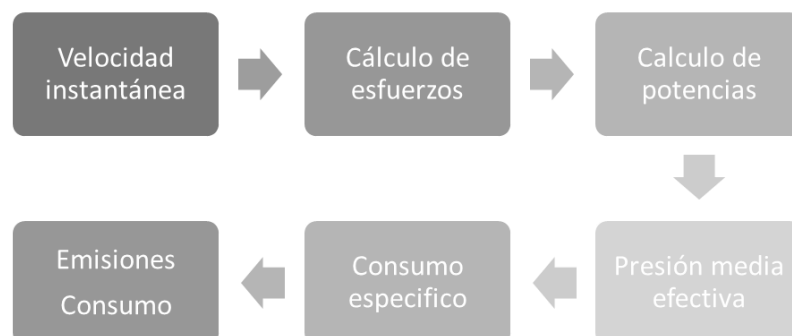


Figura 29. Esquema simulación

Las características del vehículo son las siguientes:

Tabla 3. Características vehículo [6]

RENAULT CAPTUR	
Cilindrada	1461 cm ³
Masa en vacío en orden de marcha (MVODM)	1327 Kg
Masa Max Autorizada en carga (MMAC)	1877 Kg
Cx (Coeficiente aerodinámico)	0,32
Km (Factor de masa)	1,15
Dimensiones	
Longitud	4227 mm
Anchura	1797 mm
Altura	1576 mm
Densidades	
Aire	1,1917 Kg/m ³
Combustible	810 Kg/m ³
Desarrollos	
1	8,2 Km/h / (1000km)
2	15,7 Km/h / (1000km)
3	25 Km/h / (1000km)
4	36,5 Km/h / (1000km)
5	46,9 Km/h / (1000km)
6	54,8 Km/h / (1000km)
R	8,3 Km/h / (1000km)

Para poder simular correctamente el punto de funcionamiento del vehículo es necesario conocer las curvas de carga parciales. En estas curvas a través del régimen de giro del motor y la presión media efectiva se obtiene el consumo específico. Estas tablas son difíciles de obtener debido a la confidencialidad de las propias empresas automovilísticas, pero, sin embargo, en la siguiente figura se observa dicha tabla para el vehículo simulado.

Tabla 4. Curvas de carga parciales [6]

n [rpm]/PME [bar]	1000	1150	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	
1	437,3	422,4	426,1	431,5	444,4	442,1	476,3	491,8	537,5	555	569,2	603,6	620,5	652,5	690,2	
2	305,6	304,5	307	309,7	315,4	308	313,8	314,6	348,3	357,2	366,2	379,8	389,4	409,1	427,9	
3	268	272,3	285,2	284,2	275,2	262	266,9	273,3	286,4	292,9	300,7	311,9	320,9	333,2	348	
4	252,2	254,9	259,5	259	252,5	244,1	244,7	250,9	259,1	264,5	271,7	280,7	291,4	299,4	313,9	
5	244	246,3	249,7	250,6	224	233,8	234,5	240,6	244,1	251,4	257,4	266,7	273,5	282,5	294,3	
6	240,4	233,1	229,1	228,9	228,7	228,2	228,1	232,3	236	242,2	247,6	254,5	261,2	269,7	280,2	
7	238,9	231,2	228,2	226,7	225,9	222,6	223,5	226,8	230,2	236,9	241,6	248	255,1	260,3	269,5	
8	242,4	231,7	227,7	225,3	221,9	219,1	220	222,9	226,8	233,8	237,7	242,7	246,5	252,8	262,7	
9	263,9	235,4	227,8	223,3	219,1	216,9	217,7	220,3	224,4	230,8	233,9	238,1	241,4	248,5	260,6	
10		232,5	227,4	222,8	217,5	216	215,9	218,1	222,9	227,8	230,7	235,3	238,3	245,9	261,4	
11		235,1	226,7	220,2	216	214,7	214,6	217	221,6	225,6	228,4	233,4	236,5	246,1	267,2	
12		238,8	226	218,9	215,1	213,4	213,6	216,1	220,1	224	226,47	232,5	236,5	248,3	263,8	
13			241,6	225,7	218,3	214,3	212,9	213,3	215,7	219,1	222,9	225,9	232,5	237,6	248,4	262
14			245,1	226,2	217,7	213,9	212,9	213,2	215,5	218,7	222,3	225,7	232,8	239,9	249,6	
15				227,7	217,5	214,6	213,2	213,9	215,6	217,8	222,2	226,7	234,1	240	251,7	
16				227,3	218,8	215,3	215,3	215,8	217,1	218,7	223,6	229,3	235,5	240		
17				229,3	219,6	217,1	217,6	218,2	219,1	220,7	226,1	233,3	240,5			
18				229,6	221,3	218,2	218,6	219,3	220,4	223,8	229,7	237,9				
19				229,6	222,3	219,8	220,8	221	222,7	228,6	234,9					
20					223,6	221,2	221,7	223,9	227,3	231,7						
21					223,4	220,9	223,2	228,3	228,4							
22					223,4	220,3	223,5	226,9								
full load		267,9	253,7	231,8	224,8	222,4	228	227,2	227,5	230,3	235,7	241,2	244,1	243	251,5	261,7

9.2. Modelo vehículo propulsión eléctrica

En esta parte del modelo se selecciona un motor eléctrico y una batería capaz de cumplir las exigencias del vehículo híbrido.

Para esta simulación se han seleccionado los siguientes datos:

Tabla 3. Características motor, generador y batería eléctrica [6]

MOTOR ELÉCTRICO	
Potencia Mecánica Máxima	61 kW / 82 CV
Par Máximo	400 Nm
Rango Velocidad Par Máximo	0-1200 rpm
Velocidad Nominal	1528 rpm
Tensión nominal	200 V
Voltaje Máximo	300 V
Peso	104 Kg
GENERADOR ELÉCTRICO	
Potencia Mecánica Máxima	61 kW / 82 CV
Par Máximo	400 Nm
Rango Velocidad Par Máximo	0-1200 rpm
Velocidad Nominal	1528 rpm
Tensión nominal	200 V
Voltaje Máximo	300 V
Peso	104 Kg
BATERIA	
Tipo batería	Li-Ion
Energía Neta (Rango 10-90% SOC)	12 kWh
Potencia estable	40 kW
Potencia pico (30 s)	80 kW
Tensión	300 V
Rango de tensiones de trabajo	270-330 V
Peso	120 Kg
Rango de temperaturas externas	-20 / 50°C
Rerigeración	Aire Convección Forzada
Temperatura Máxima Interna	50°C
Ciclos carga/descarga 80% a 25°C	2500 ciclos

10. MODELADO POR SIMULINK DEL MOTOR TÉRMICO

En este apartado se desarrolla el modelo para el motor térmico y su consumo. En los siguientes puntos se explica el funcionamiento del modelo y los resultados obtenidos para un ciclo WLTC.

10.1. MODELO DE SIMULACIÓN DEL MOTOR TÉRMICO

El modelado comienza con la elección del ciclo, con la velocidad de salida se analiza tanto la potencia necesaria para mover el vehículo como las revoluciones del motor térmico en cada instante. Con la potencia y las revoluciones se obtiene la presión media efectiva en cada punto, a partir de este dato se puede obtener el consumo específico en cada instante. Finalmente se analiza el consumo en todo el ciclo y las emisiones de CO₂.

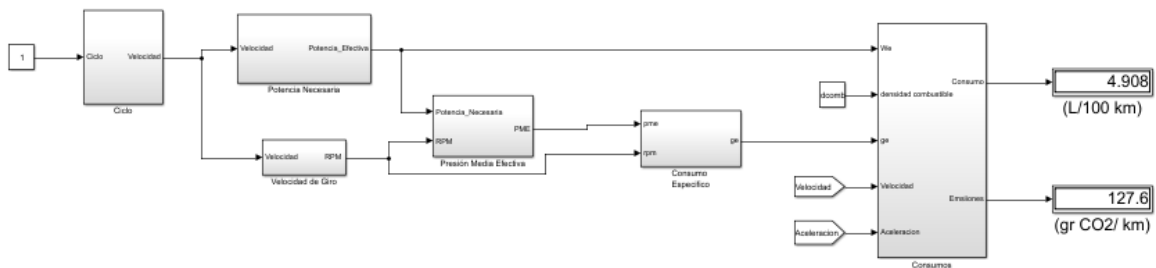


Figura 30. Simulación motor térmico

10.2. Modelado del ciclo

En la figura se observa como a partir de un selector se elige el ciclo a simular. En el primer caso el ciclo es el WLTP, en el segundo el ciclo NEDC y en el tercero un ciclo arbitrario para poder simular cualquier condición.

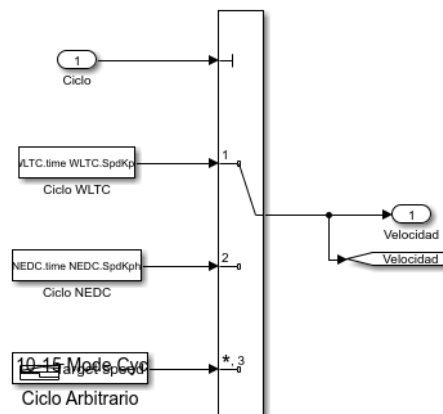


Figura 31. Elección de ciclo

La salida del ciclo es la velocidad del ciclo, en este caso en "km/h". En esta simulación se ha elegido el ciclo 1 que corresponde al ciclo WLTC.

10.3. Modelado potencia necesaria

En este subconjunto se analizan los esfuerzos resistentes y la potencia requerida en el ciclo. Para la obtención de esfuerzos resistentes se recurre a las ecuaciones de la dinámica explicadas anteriormente.

Se parte de los datos del bloque anterior de elección de ciclo de velocidad WLTC, que es el ciclo elegido para la simulación.

Mediante las ecuaciones (2), (7) y (8) se obtiene la fuerza aerodinámica, la fuerza de rodadura y la fuerza de ascensión en una pendiente respectivamente. Estas fuerzas se oponen al desplazamiento del vehículo, mediante ellas se obtiene la potencia requerida. Las ecuaciones se pueden ver transformadas en la figura.

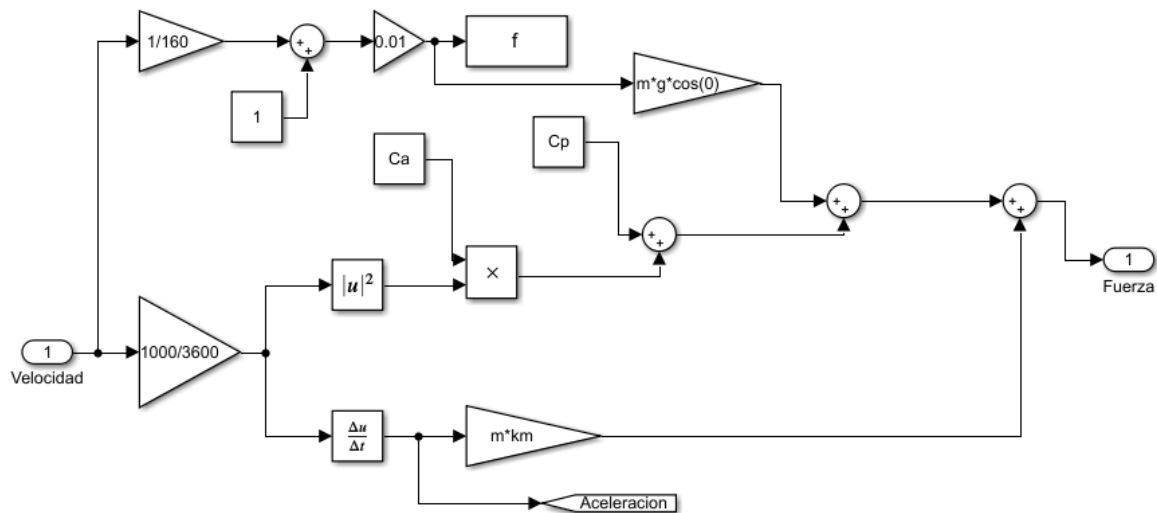


Figura 32. Cálculo potencia necesaria

En la figura se representa la suma de las cuatro fuerzas que se oponen a la marcha del vehículo: la resistencia aerodinámica, la resistencia ascensión, la resistencia a la rodadura y la resistencia que se produce por la propia inercia del vehículo al acelerar.

Las dos primeras fuerzas han sido representadas mediante constantes que se incorporan desde el "Workspace" de Matlab. De esta forma se puede cambiar los parámetros sin necesidad de cambiar el modelo de Simulink. La constante de la resistencia a la ascensión en esta simulación tiene un valor de cero ya que el ciclo WLTC tiene una pendiente de 0° . La resistencia a la rodadura se ha calculado según la formula (8) a partir de la velocidad del vehículo.

Finalmente, para obtener la resistencia a la inercia del vehículo debida a la inercia de los diferentes elementos rotativos del vehículo, se deriva la velocidad para obtener la aceleración y después multiplicar por la masa del vehículo y el factor de masa equivalente.

En la figura se puede observar la velocidad, la aceleración y la fuerza necesaria para realizar el ciclo con las características del vehículo.

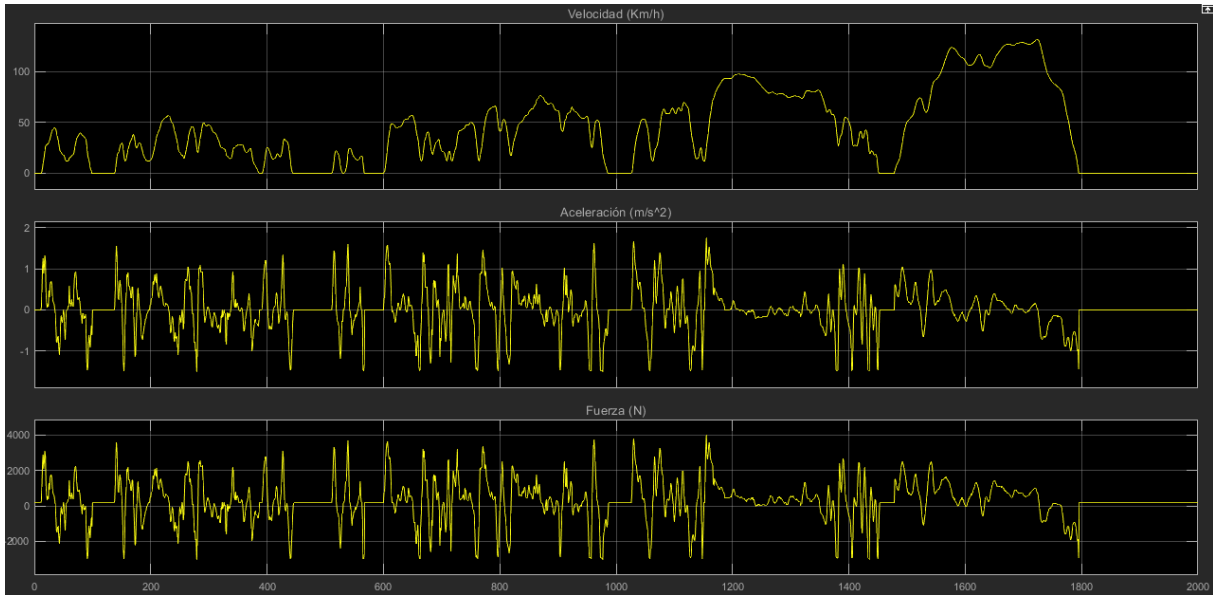


Figura 33. Velocidad, aceleración y fuerza

En la figura se puede observar la velocidad del ciclo elegido, en este caso WLTC, la aceleración y la fuerza resistente del vehículo. En la gráfica de la aceleración se observa las aceleraciones y deceleraciones que se producen en el ciclo y que afectan a la fuerza total. Cuando el vehículo se encuentra decelerando la fuerza de tracción es negativa debida a que se requiere una fuerza para frenar el vehículo.

En la figura se muestra el cálculo de la potencia efectiva que se obtiene multiplicando la velocidad instantánea por la fuerza total anteriormente calculada, y por el rendimiento de la transmisión, que en esta simulación toma un valor de 1.1, es decir, un rendimiento del 90%.

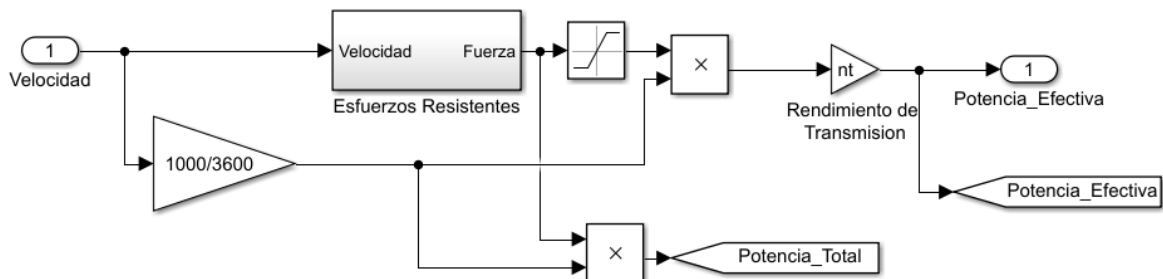


Figura 34. Modelo cálculo de potencia necesaria

En la figura se observa los valores de la potencia efectiva calculada para el ciclo WLTC. En la gráfica se expresa la potencia tanto en kW como en CV.

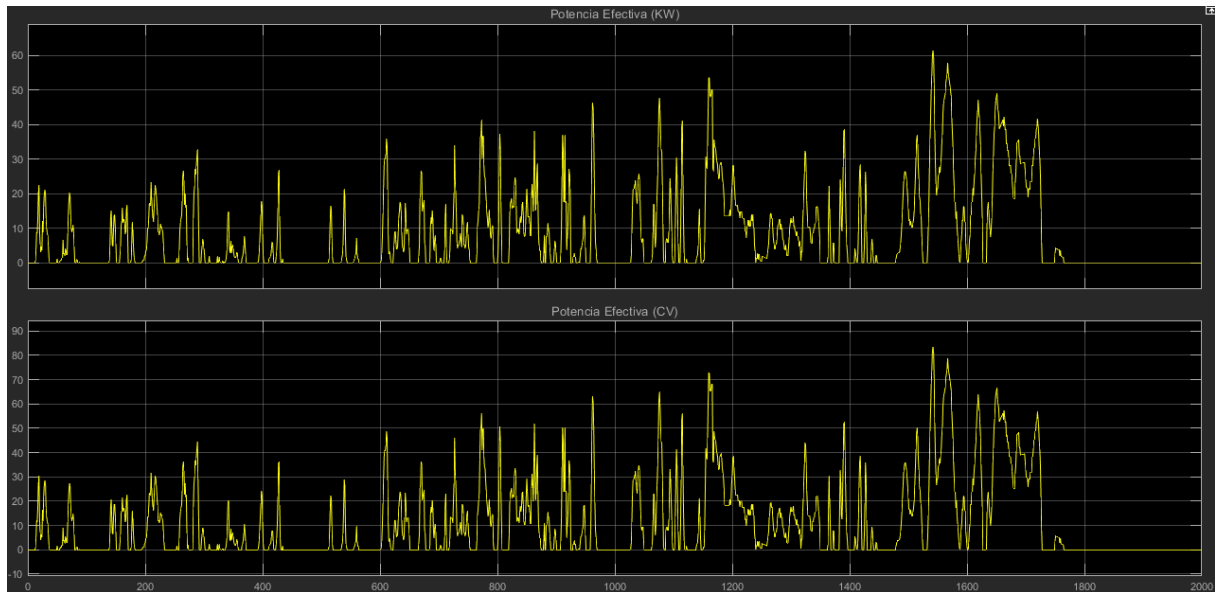


Figura 35. Potencia efectiva en kW y en CV

10.4. Modelado velocidad de rotación del motor térmico

Para poder calcular la presión media efectiva del motor y con ello el consumo es necesario conocer el régimen del motor. Para ello se ha desarrollado el subsistema “Modelado Velocidad de Giro” el cual se divide en tres subsistemas como se aprecia en la figura.

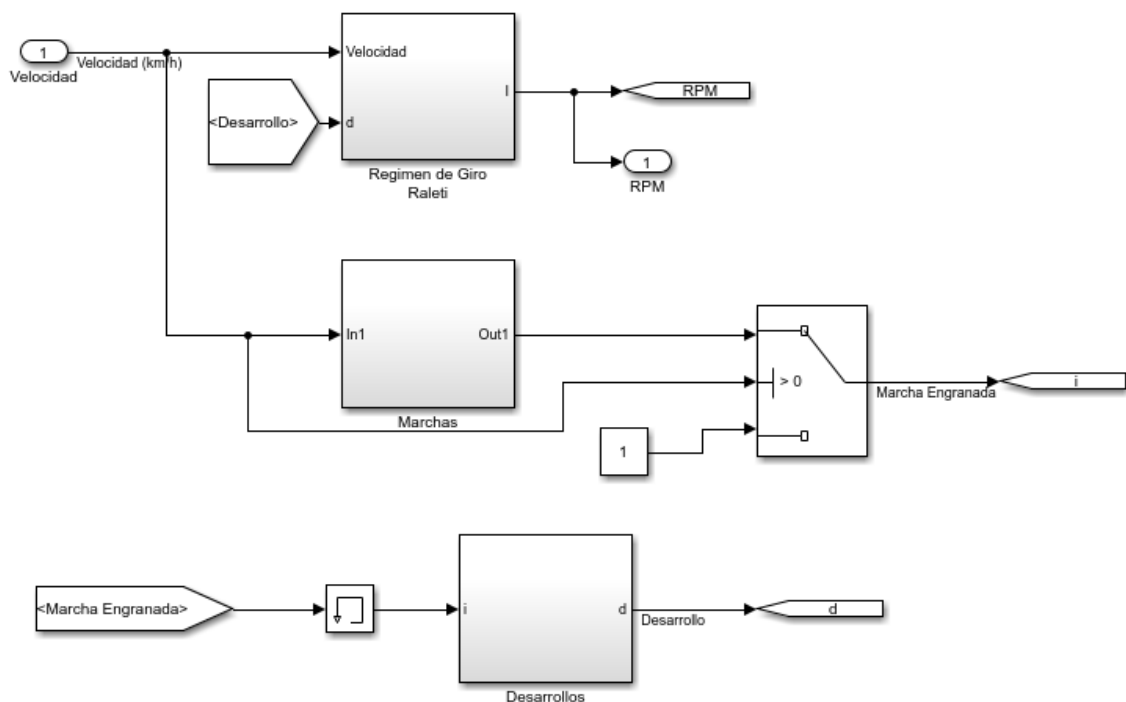


Figura 36. Cálculo marcha engranada

El primer subsistema “Marchas” se analiza la marcha engranada (i) en cada instante del ciclo. Un cambio óptimo de marcha es un factor esencial para una buena simulación ya que hay que realizar los cambios en el momento adecuado para obtener el aprovechamiento máximo de la potencia del motor.

En un ciclo realizado por autoridades competentes un conductor tiene marcado cuando realizar los cambios de marcha o por lo menos el rango en el cual es efectivo. En la simulación se ha empleado una lógica de conducción para que el motor siempre trabaje en las zonas cercanas al punto de par máximo,

ya que es donde se agrupan los puntos de rendimientos máximos. En la figura se puede observar el subconjunto marchas.

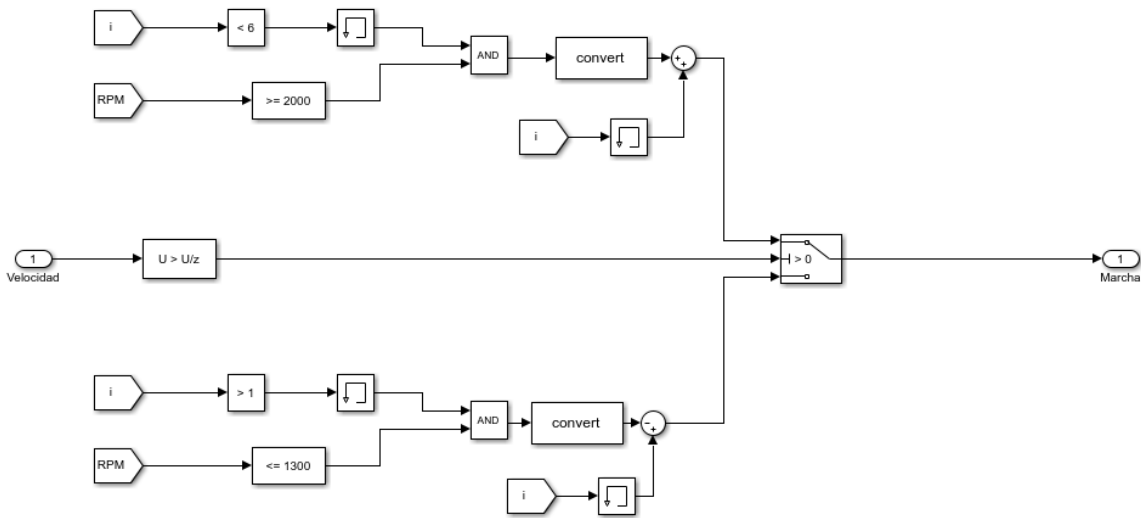


Figura 37. Cálculo marcha adecuada

La parte superior analiza el incremento de la marcha engranada cuando las revoluciones del motor superan el valor de 2000 rpm hasta un máximo de seis marchas. En la parte inferior se determina el decrecimiento de la marcha si las revoluciones disminuyen de 1300 rpm. En las dos partes hay un bloque convert que sirve para transformar un 1 lógico en un 1 numérico. El bloque memory es empleado para almacenar el ultimo valor que toma la variable iterada. En función de si el incremento de velocidad es positivo o negativo a través del Detect Increase se determina si el cambio de marcha es por la entrada superior o inferior con el switch.

El segundo subsistema es “Desarrollos” dependiendo de la marcha engranada se calcula su desarrollo y se aplica, en la figura se muestra la simulación de este bloque.

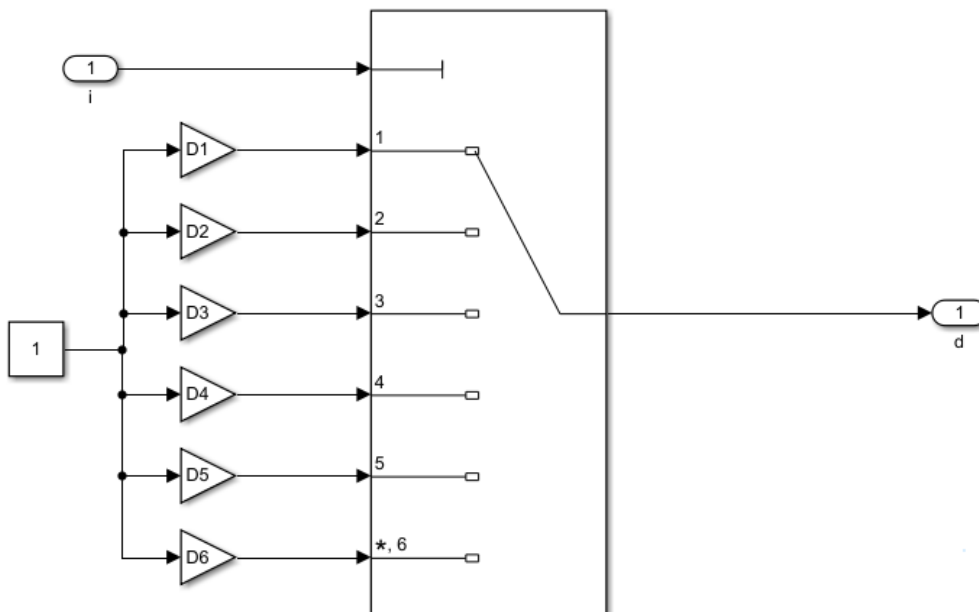


Figura 38. Bloque desarrollo

Este subsistema tiene como entrada la marcha engranada, antes calculada, y un selector en función de está. Por lo tanto, la salida es el desarrollo de la marcha engranada. Los valores de desarrollo se han parametrizado para cambiar con facilidad a través del Workspace de Matlab.

El último bloque de este conjunto es “Regimen de giro”, que se encarga de calcular las revoluciones del motor durante todo el ciclo.

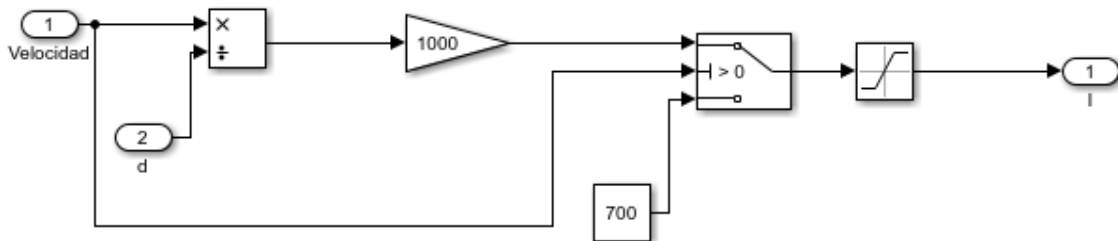


Figura 39. Cálculo régimen de giro

En la figura se puede observar que las revoluciones se calculan dividiendo la velocidad del vehículo con el desarrollo antes calculado. Si la velocidad es cero, vehículo sin movimiento, el régimen será de 700 rpm, es decir, el régimen de ralentí.

En la siguiente figura se muestra los valores de este subconjunto para el ciclo WLTC.

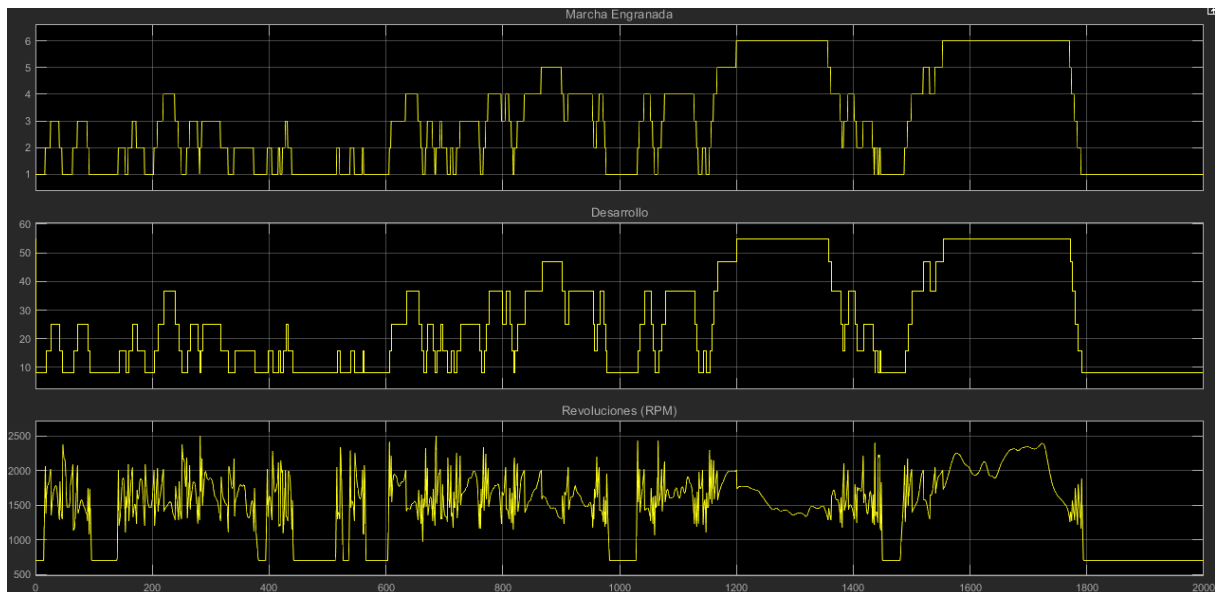


Figura 40. Marcha engranada, desarrollo y revoluciones

Como se observa en la figura los cambios de marcha se realizan alrededor de 2000 rpm para incrementar la marcha y 1300 rpm para decrecer la marcha. Después de cada cambio de marcha se puede observar un pico instantáneo en las revoluciones, esto es debido a que en el momento justo después del cambio el vehículo se revoluciona por un instante.

10.5. Modelado presión media efectiva

En este apartado se analiza la simulación del cálculo de la presión media efectiva del vehículo, para ello se aplica la ecuación antes explicada y el esquema es el mostrado en la figura.

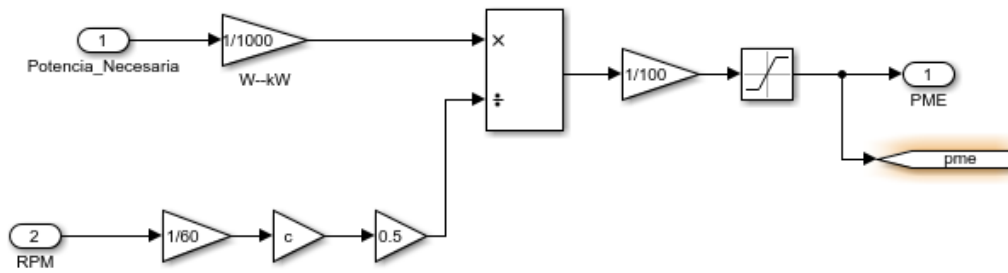


Figura 41. Cálculo de la presión media efectiva

Partiendo de la potencia y del régimen motor calculados en apartados anteriores se obtiene la presión media efectiva. Para ello, se cambia las unidades de la potencia a KW, y las revoluciones se dividen entre 60 para pasarla a segundos, se multiplica por la cilindrada y por el parámetro i , que en este caso al ser un motor de cuatro tiempos este valor vale 0,5.

Se tiene un bloque de saturación que limita la presión media efectiva mínima a cero. En la figura se observa la presión media efectiva del ciclo WLTC.

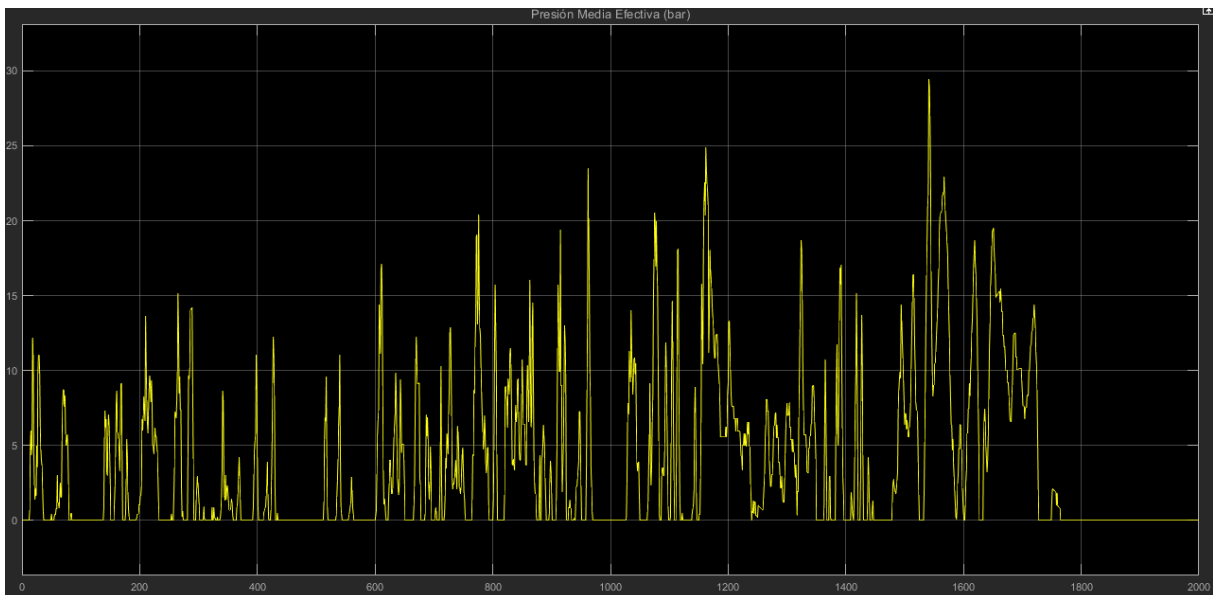


Figura 41. Presión media efectiva (bar)

10.6. Modelado consumo específico

Una vez calculada la presión media efectiva y las revoluciones se puede analizar el consumo específico. En la figura se muestra la simulación del calcula del consumo específico.

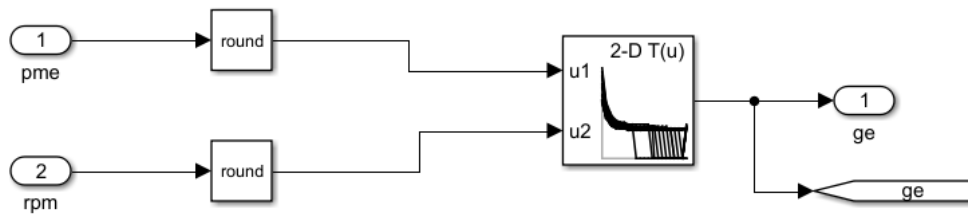


Figura 42. Cálculo consumo específico

Se ha utilizado la tabla de curvas de isoconsumo del vehículo, estas curvas han sido convertidas en Excel y posteriormente introducidas a través de un bloque 2-D Lookup Table. Las entradas están redondeadas para obtener un valor menos preciso, pero más adecuado. En la figura se muestra el consumo específico del vehículo durante el ciclo WLTC.

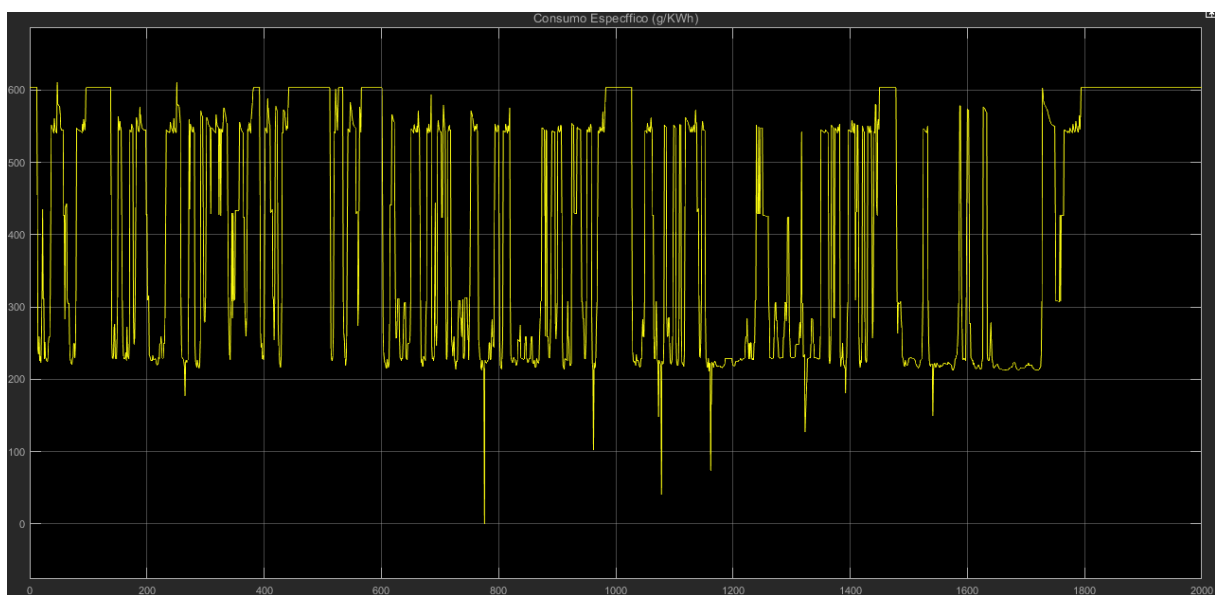


Figura 43. Consumo específico (g/kWh)

10.7. Modelado consumo y las emisiones de CO2

El subsistema “Consumo” analiza el consumo y las emisiones del vehículo a través del ciclo, su esquema se muestra en la figura.

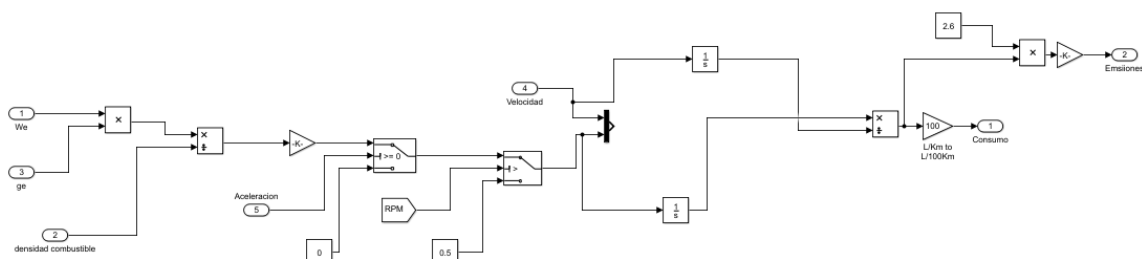


Figura 44. Cálculo consumo

El esquema tiene como entradas:

- La potencia entregada por el motor (We)

- La densidad del combustible (d_{comb})
- El consumo específico (g_e)
- La velocidad del vehículo
- La aceleración del vehículo.

En dicho subsistema se lleva a cabo la siguiente operación:

$$C = \frac{g_e \cdot W_e}{\rho_f \cdot v} \quad (\text{Ec. 24})$$

Si la aceleración es negativa el valor del consumo es cero a través del Switch, si las revoluciones son iguales que las de ralentí el consumo es de 0,5 L/h constante. Es decir, cuando el vehículo está parado el consumo es constante y tiene un valor de 0,5 L/h. En la figura se muestra la comparativa entre la velocidad del ciclo y el consumo en L/h del vehículo.

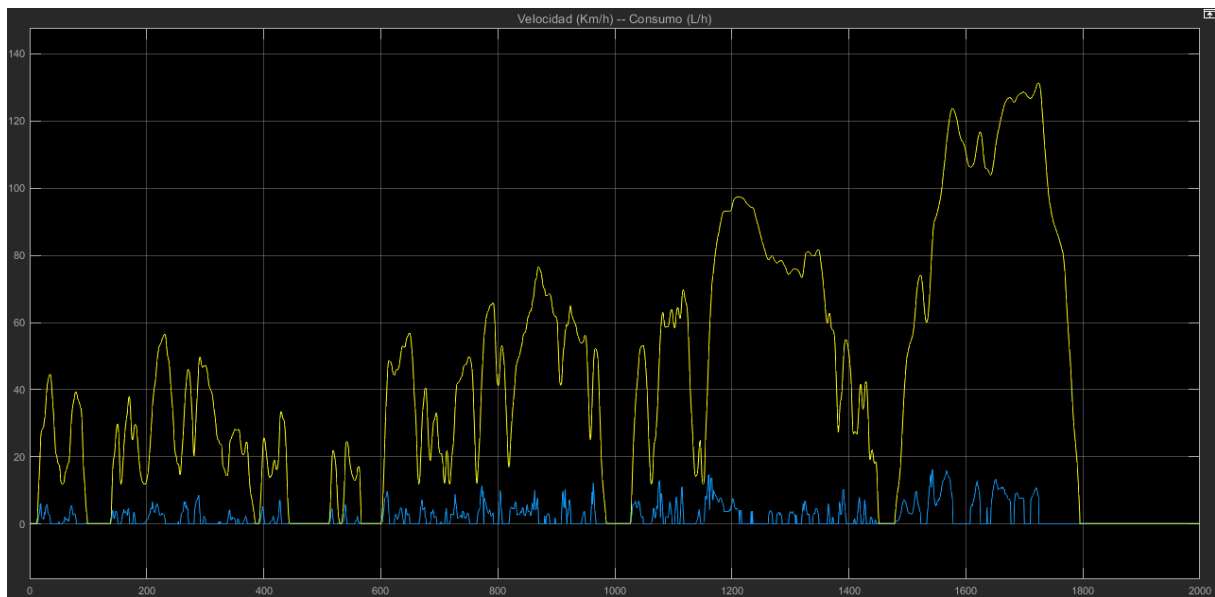


Figura 45. Velocidad frente al consumo

Se puede observar que el consumo es mayor a altas revoluciones y como decrece al realizar el cambio de marcha.

Para obtener el consumo de L /100 Km es necesario integrar tanto el consumo como la velocidad y dividirla. El valor del consumo es de 4.908 litros de combustible por cada 100 km para un ciclo WLTC. Se analizará este valor al final de la simulación. El valor de homologación de este vehículo con motor térmico es de 5,9 litros de combustible por cada 100 km, por lo tanto, el valor de la simulación es menor.

→ 4.908
(L/100 km)

Figura 46. Valor consumo

Para obtener las emisiones de CO₂ se ha multiplicado el consumo por un valor de 2,6 Kilos de CO₂ por cada litro de diesel consumido. El valor de las emisiones de CO₂ durante el ciclo WLTC es de 130,7 gr de CO₂ por cada km recorrido.

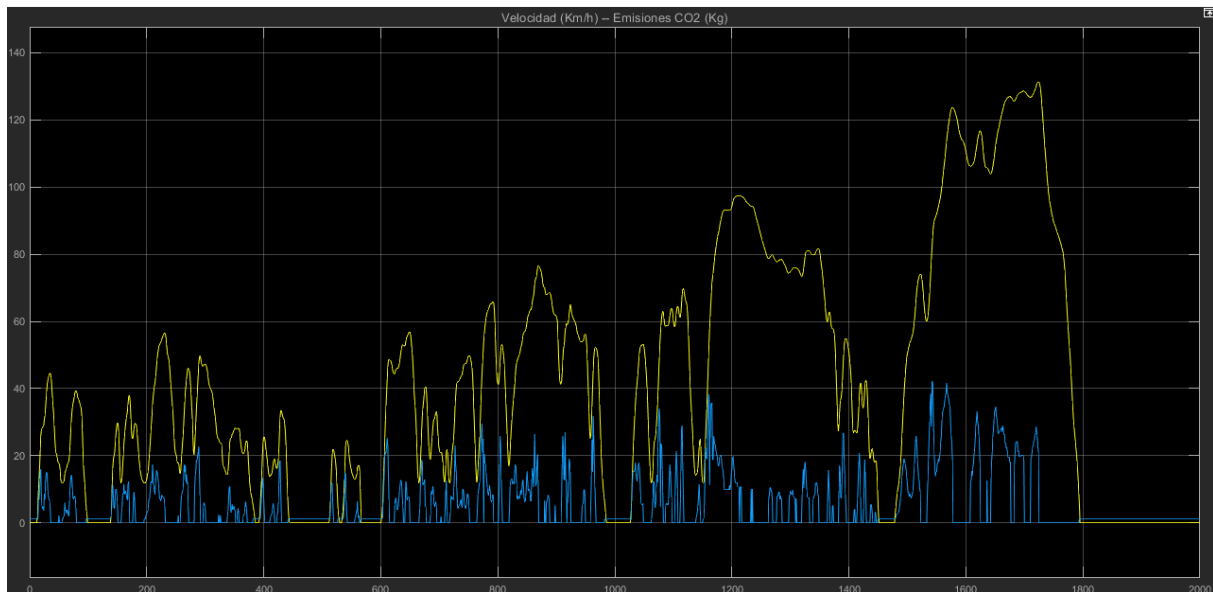


Figura 47. Velocidad frente a emisiones

En la figura se observa como al igual que el consumo el aumento de emisiones se produce cuando las revoluciones son muy altas.

En la figura se muestra las emisiones de CO₂ en gramos por cada kilómetro. Se analizará este valor posteriormente. Las emisiones de homologación para este vehículo son de 133 gramos de CO₂ por kilómetro, por lo tanto, es valor bastante aproximado.

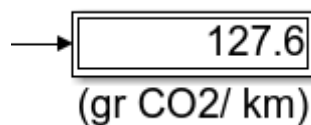


Figura 47. Valor emisiones de CO₂

10.8. **Modelado consumo y emisiones sistema S&S**

En este apartado se incluye en el modelo el sistema Start & Stop, esto influye solamente en las zonas donde el motor está en ralentí. En esas zonas el motor se para y por lo tanto no consume y no emite contaminantes. En la siguiente figura se muestra el valor de las revoluciones del motor, se observa que cuando la velocidad del vehículo es cero las revoluciones del motor son también cero.

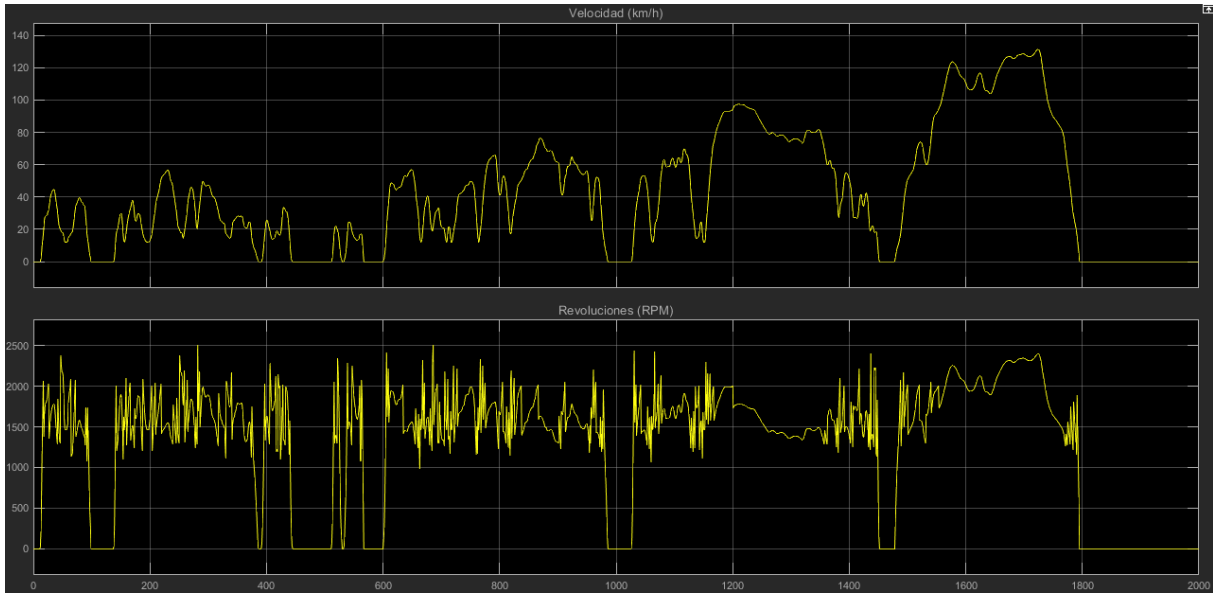


Figura 48. Velocidad y revoluciones S&S

Para analizar el consumo y las emisiones se realiza el cambio del valor cuando las revoluciones son menores que 700 r.p.m. de 0,5 a 0 para que no sume consumo cuando el vehículo este en esas condiciones como se muestra en la figura

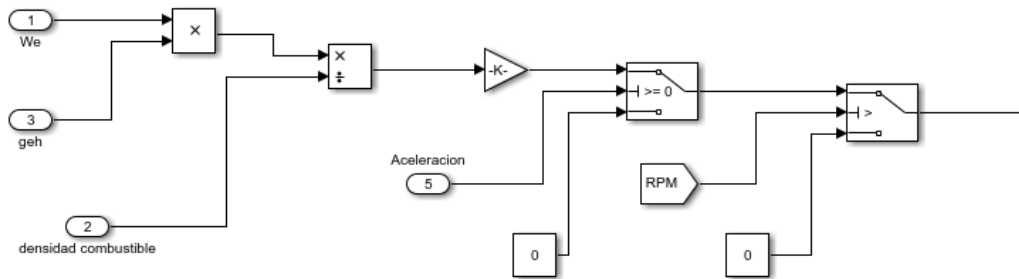


Figura 49. Cálculo consumo S&S

Analizando el consumo de litros por cada 100 km se obtiene un valor de 4,745 litros por cada 100 km en un ciclo WLTC con S&S. Por lo tanto, comparado con el sistema con motor térmico sin Start & Stop disminuye un 4% en el consumo.

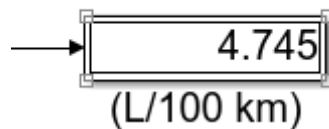


Figura 50. Valor consumo S&S

Analizando las emisiones de CO₂ por cada km se obtiene que se emiten 123,4 gramos de CO₂ por cada km en el ciclo WLTC con S&S. Si se analiza las emisiones con respecto al vehículo sin Start & Stop se disminuye un 3% las emisiones de CO₂.

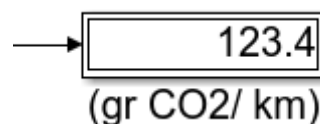


Figura 51. Valor emisiones S&S

11. MODELADO POR SIMULINK DEL VEHÍCULO HÍBRIDO

En este apartado se desarrolla el modelo de un vehículo híbrido, el modelo se basa en el caso anterior, motor térmico, más la incorporación de un modelo eléctrico. En los siguientes puntos se explica el funcionamiento del modelo y los resultados obtenidos para un ciclo WLTC. En la figura se puede observar la parte eléctrica del vehículo.

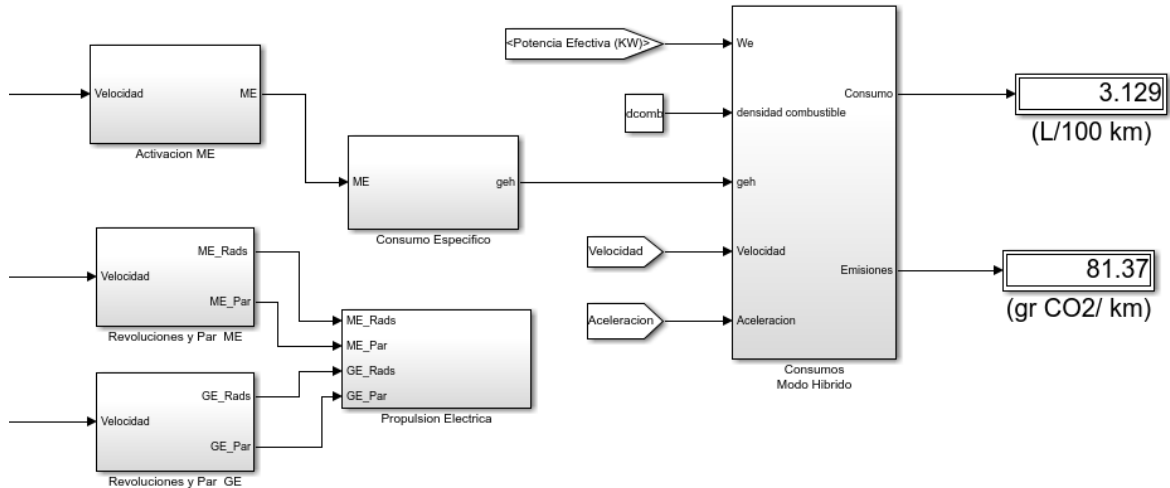


Figura 52. Cálculo vehículo híbrido

El conjunto empieza analizando los momentos en los cuales el motor eléctrico se pone en funcionamiento y a partir de los datos se analiza tanto el consumo específico como el consumo global. Por otra parte, se analiza las revoluciones y el par tanto del motor eléctrico como del generador eléctrico. Con los datos anteriores se analiza los valores de la batería durante el ciclo.

En la figura se puede observar la energía recuperada durante un ciclo WLTC.

11.1. Modelado activación del motor eléctrico

En este apartado se muestra las condiciones para la activación del motor eléctrico durante el ciclo. En la figura se puede ver como las dos condiciones para que el motor eléctrico esté en funcionamiento son que la velocidad del ciclo sea menor de 50 km/h y además que la batería tenga al menos un 30% de su capacidad.

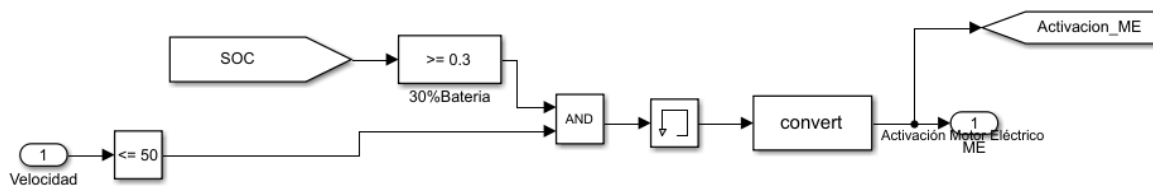


Figura 53. Activación motor eléctrico

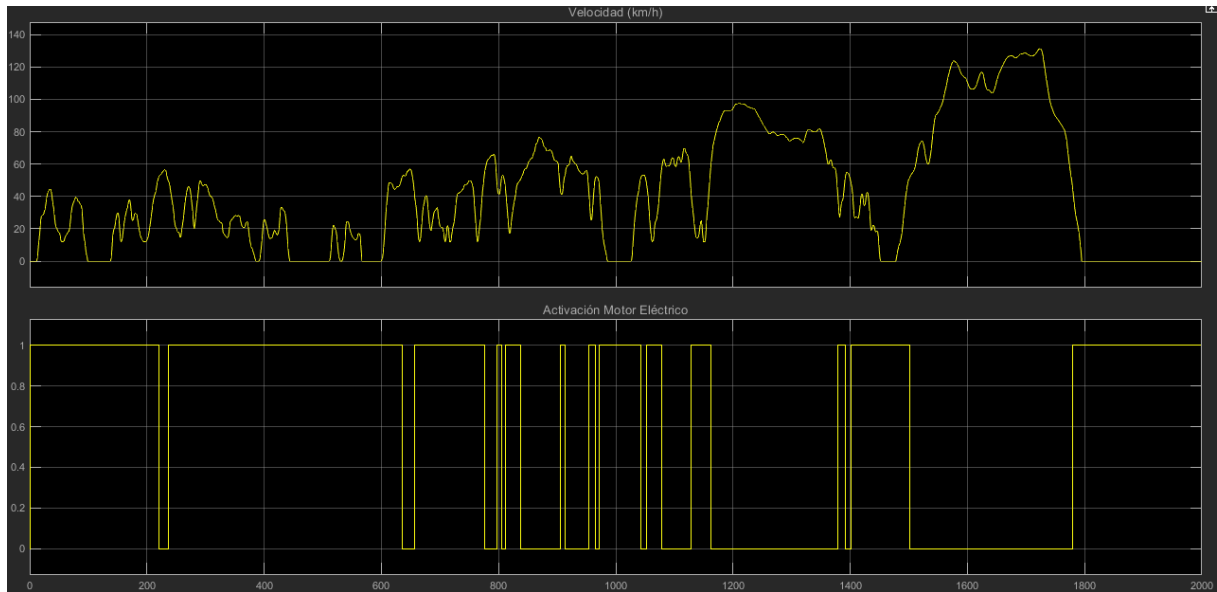


Figura 54. Velocidad y activación del motor eléctrico

En la figura se puede observar como el motor eléctrico funciona cuando la velocidad es menor de 50 km/h, se analizará más adelante que en este ciclo el SOC de la batería no llega al 30% y por lo tanto siempre cumplirá esa condición.

11.2. Modelado consumo

En este apartado se distingue entre modo motor térmico y modo motor eléctrico. En esta parte el generador eléctrico no tiene ninguna función.

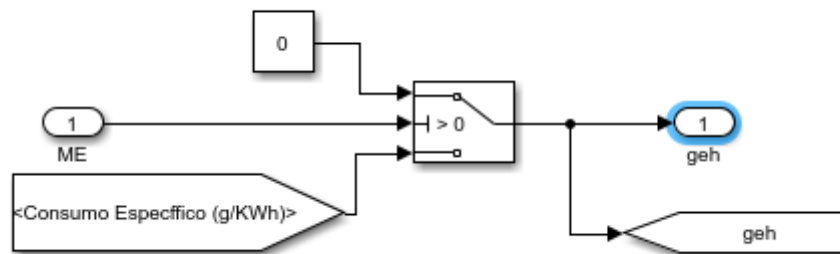


Figura 55. Cálculo consumo híbrido

En la figura se observa que cuando el motor eléctrico está activado el consumo específico es cero, sin embargo, si el motor eléctrico está desactivado se contabiliza como el motor térmico convencional. El valor de consumo específico es el mismo que el calculado en el apartado de motor térmico. En la figura se puede observar el valor del consumo específico para un vehículo híbrido en un ciclo WLTC.

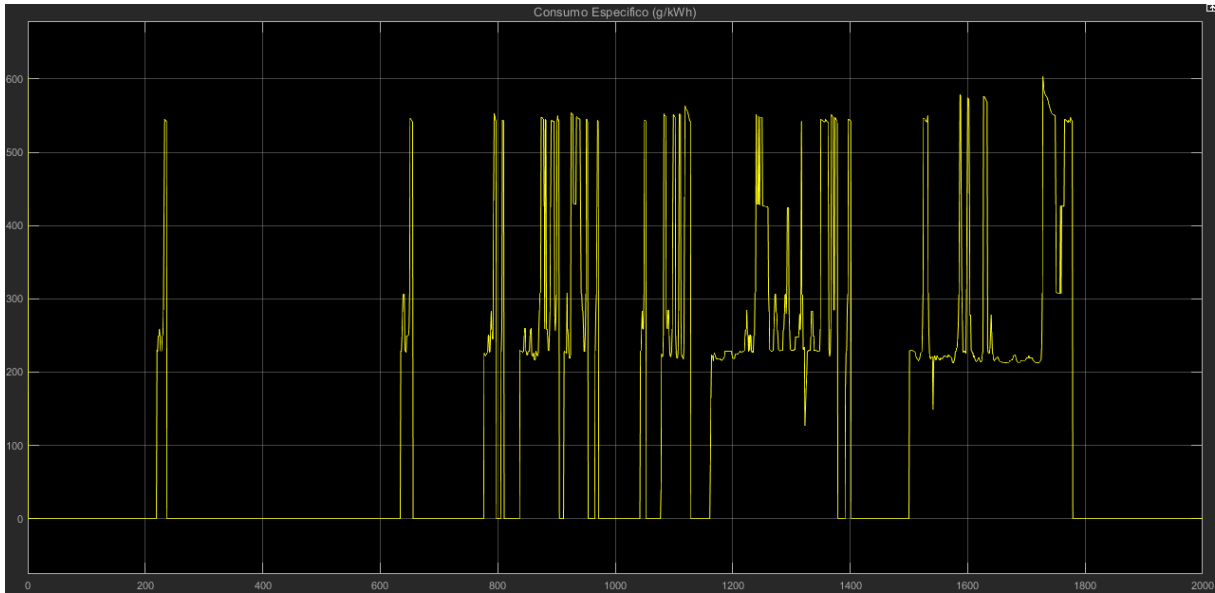


Figura 56. Consumo específico híbrido

Como se aprecia en la figura durante el funcionamiento del motor eléctrico el consumo es nulo.

Para analizar el consumo y las emisiones globales hay que tener en cuenta también el sistema Start & Stop que en este caso no es muy relevante ya que en condiciones normales cuando el vehículo está parado tanto el motor de combustión como el motor eléctrico están apagados.

Si se analiza el consumo de combustible en L/h se observa que durante sobre todo la fase ciudad del ciclo el consumo de combustible es casi nulo, ya que toda esta fase es realizada por el motor eléctrico.

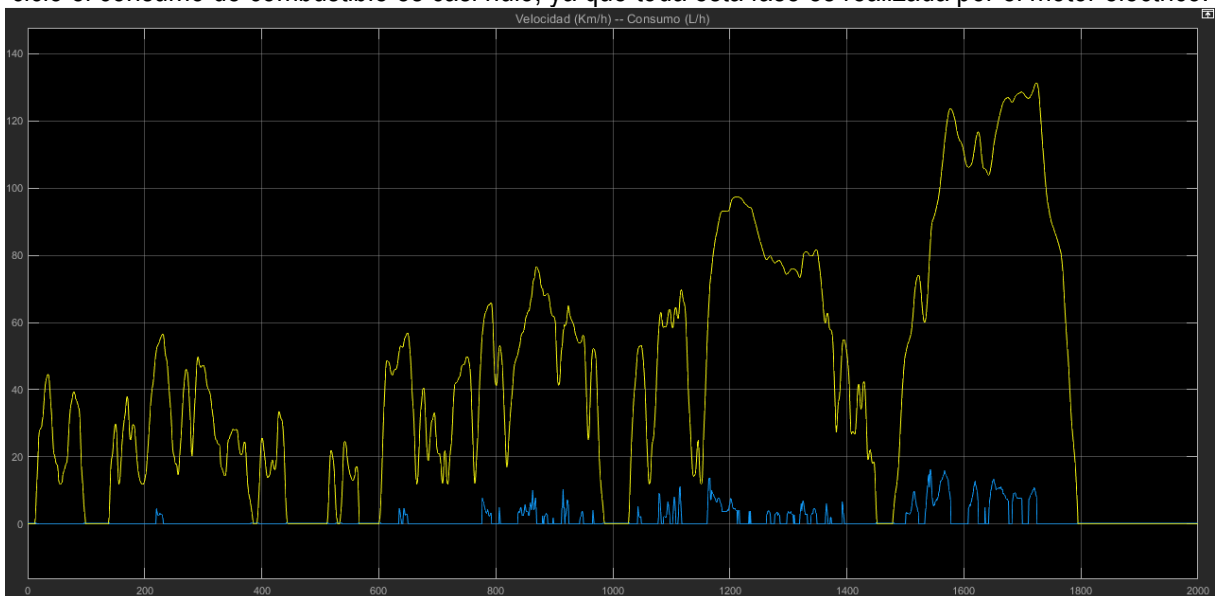


Figura 57. Velocidad frente a consumo híbrido

El valor global de consumo de combustible en un vehículo híbrido con un ciclo WLTC es de 2,848 litros de combustible por cada 100 km. Si se analiza el ahorro de consumo con respecto al vehículo con Start & Stop se obtiene que se ahorra un 40% de combustible con el sistema híbrido.

→ 2.848
(L/100 km)

Figura 58. Valor consumo híbrido

Si se analiza las emisiones de CO₂ en un vehículo híbrido en un ciclo WLTC obtiene que se emiten 74,04 gramos de CO₂ por cada kilómetro. Si se analiza las emisiones con respecto al vehículo con Start & Stop se obtiene que se disminuye un 40% las emisiones de CO₂.

→ 74.04
(gr CO₂/ km)

Figura 59. Valor de las emisiones híbrido

11.3. Modelado revoluciones y par motor eléctrico

En el siguiente subconjunto se analiza tanto las revoluciones del motor eléctrico como el par necesario para realizar el ciclo.

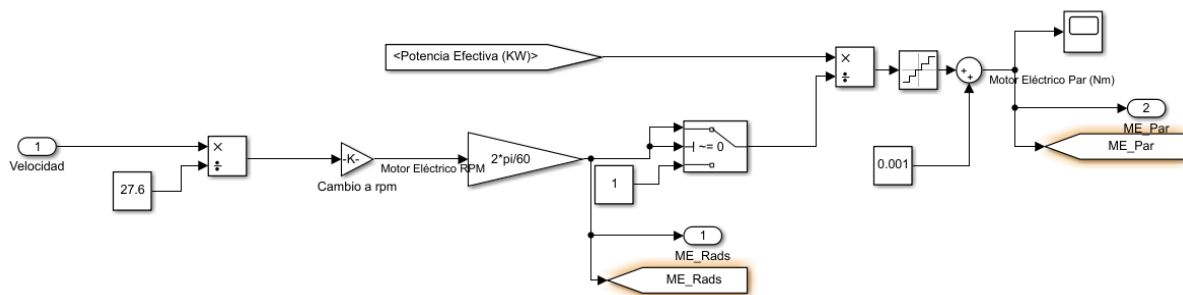


Figura 60. Cálculo revoluciones y par del motor eléctrico

En la figura se el esquema de dicho subconjunto. Se conoce que la relación entre la salida del motor eléctrico y el diferencial con grupo es de 4,113 a 1, por lo tanto, esta relación da un desarrollo de 27,6 km/h por cada 1000 r.p.m. del motor eléctrico. Incluyendo el rendimiento de la transmisión se obtiene las revoluciones en rpm del motor eléctrico como se muestra en la figura.

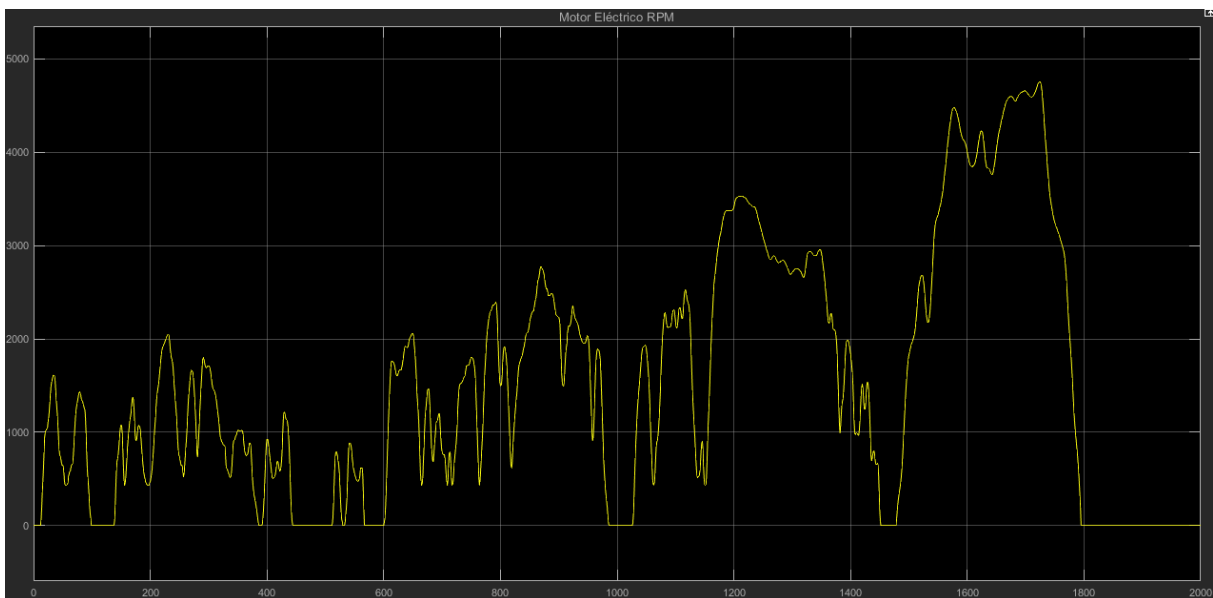


Figura 61. Motor eléctrico RPM

A partir de la potencia efectiva, calculada con las características del vehículo y las revoluciones calculadas anteriormente se obtiene el par del motor eléctrico como se muestra en la figura.

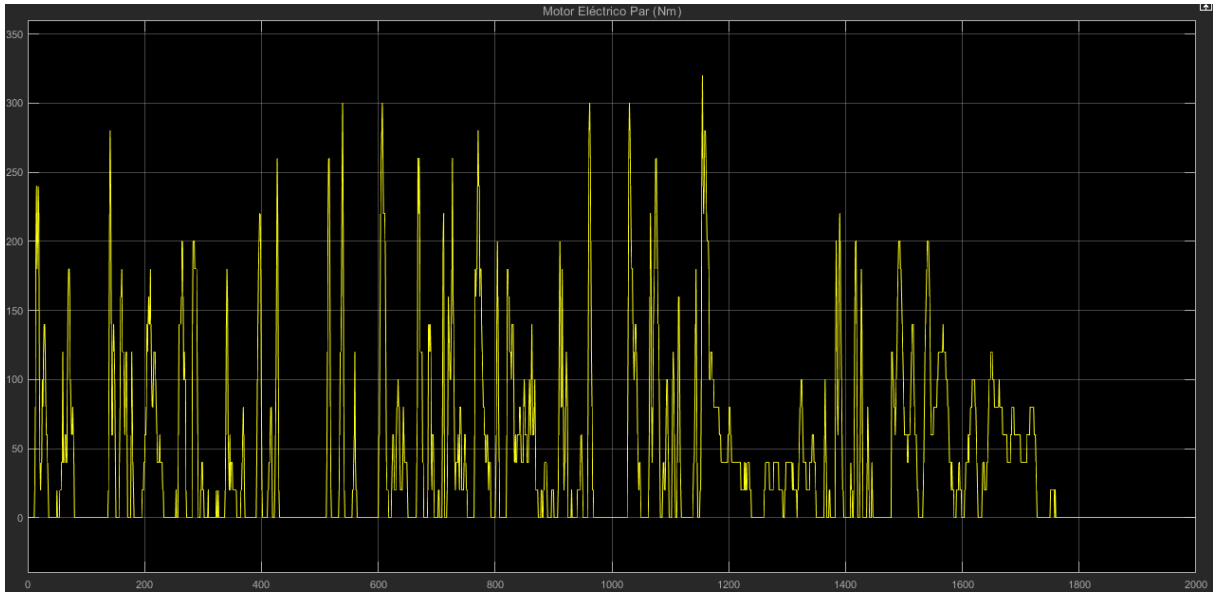


Figura 62. Motor eléctrico Par

11.4. Modelado revoluciones y par generador eléctrico

En este subconjunto se analiza las revoluciones del generador eléctrico y la potencia que puede aprovechar durante las deceleraciones.

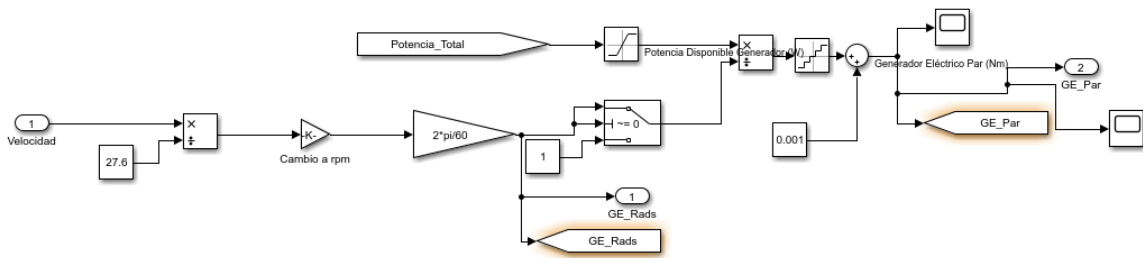


Figura 63. Cálculo revoluciones y par generador eléctrico

Al igual que el apartado anterior se obtiene las revoluciones del generador eléctrico. La potencia se filtra solo en sus valores negativos a través de un bloque "saturation" como se muestra en la figura.

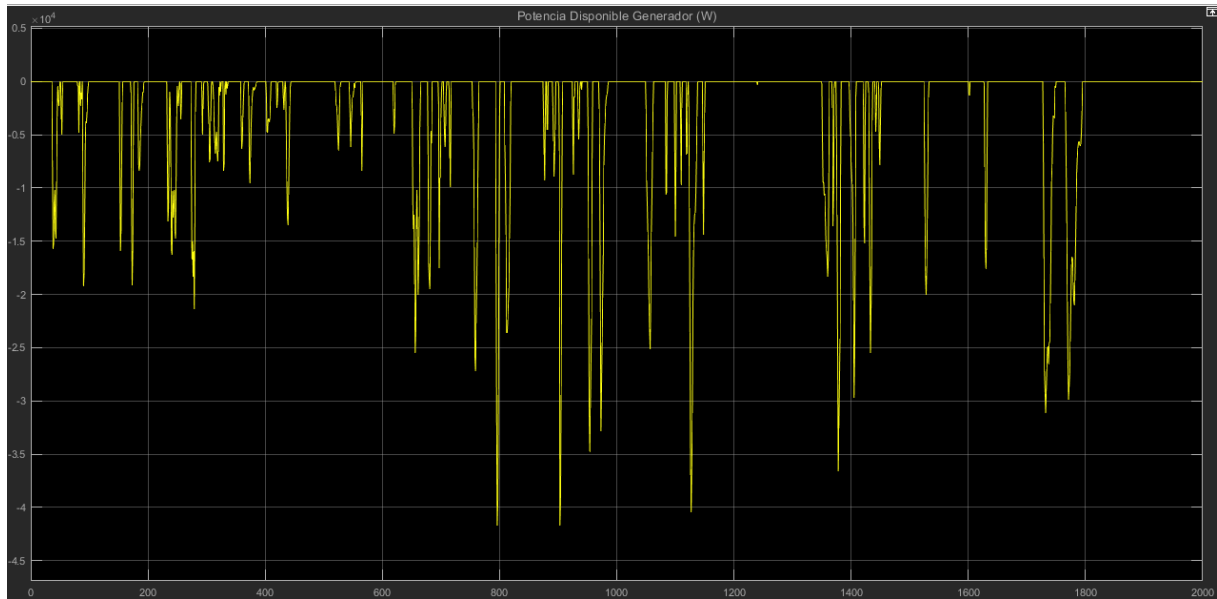


Figura 64. Potencia disponible en el generador eléctrico

El par obtenido en el generador se muestra en la figura, como se puede observar todos los valores son negativos debido a que la fuerza va en sentido contrario para generar energía eléctrica.

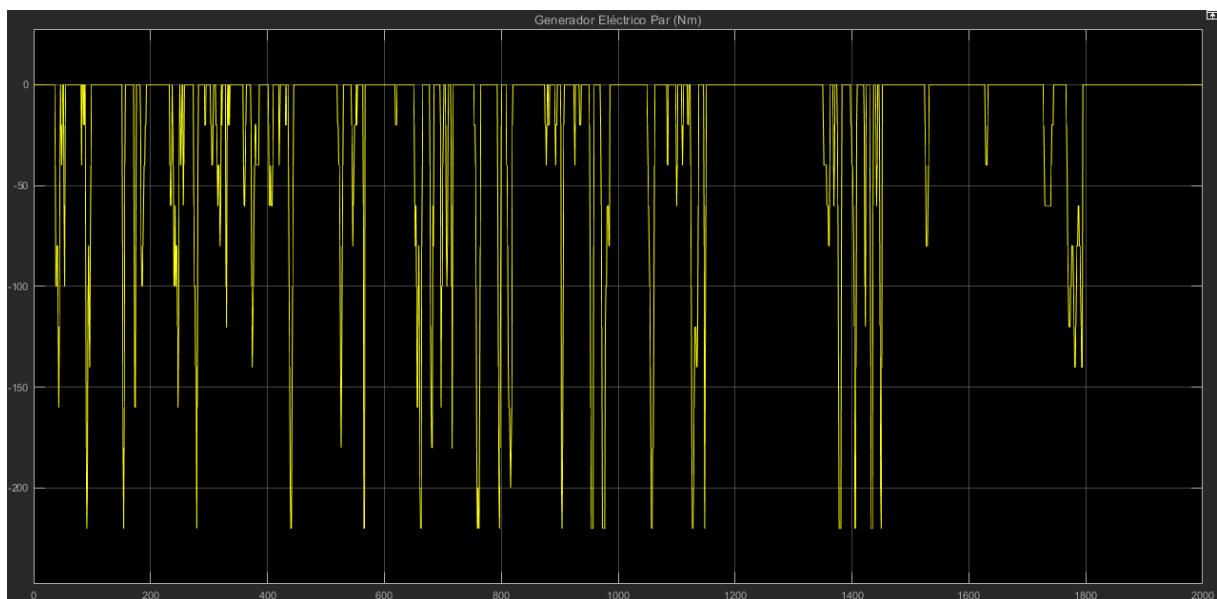


Figura 65. Generador eléctrico Par

11.5. Modelado propulsión eléctrica

En este subconjunto se analiza a partir de las revoluciones y los pares anteriormente calculados y a través de simulaciones de motores eléctricos el estado de los mismos y de una batería que simula la batería del vehículo híbrido.

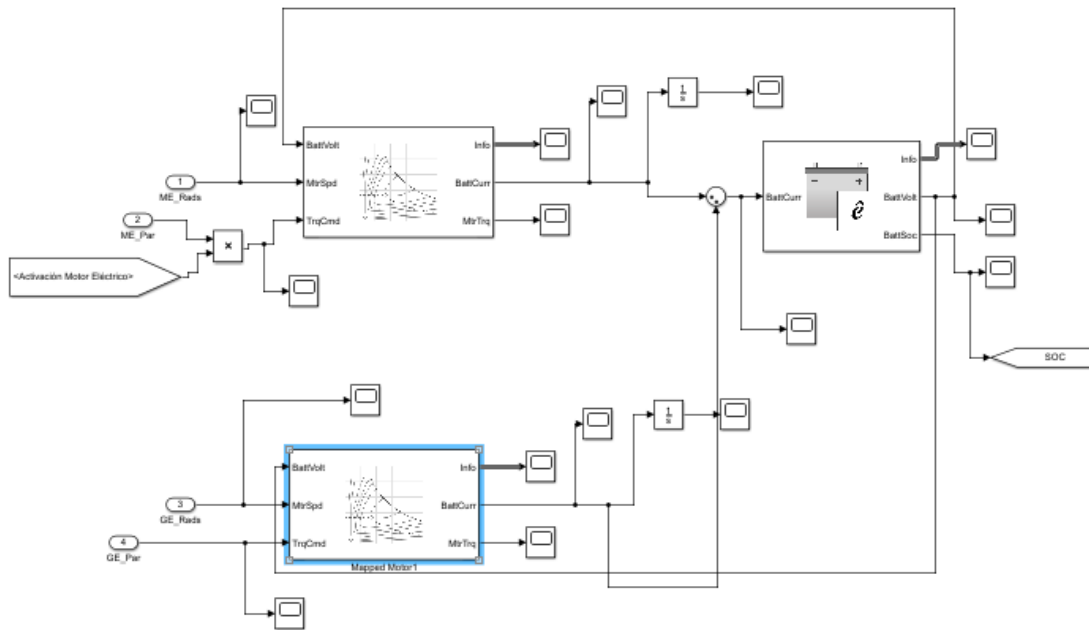


Figura 66. Cálculo propulsión eléctrica

En la figura se distingue la zona izquierda con la parte superior donde se encuentra el motor eléctrico y la parte inferior donde se encuentra el generador eléctrico. La parte derecha muestra la batería.

Las condiciones tanto para el motor como para el generador son idénticas, tienen un par máximo de 400 Nm hasta 2000 rpm y un rendimiento de un 91%.

El motor eléctrico solo funciona cuando está activado, esto se controla a través de la variable anteriormente calculada "Activación Motor Eléctrico". El flujo de corriente del motor eléctrico se muestra en la figura.

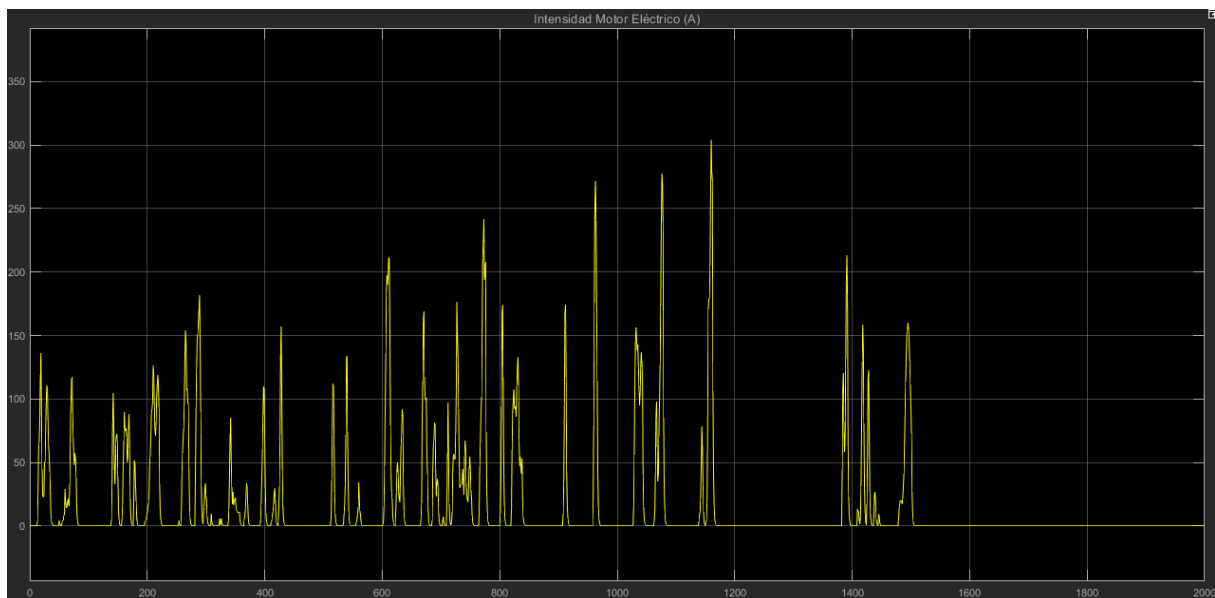


Figura 67. Intensidad motor eléctrico

Como se observa los picos de corriente se producen cuando la potencia demandada es alta como era de esperar.

En la figura se observa el flujo de corriente del generador, como se puede apreciar la intensidad es negativa porque el flujo es inverso, desde el generador hacia la batería.

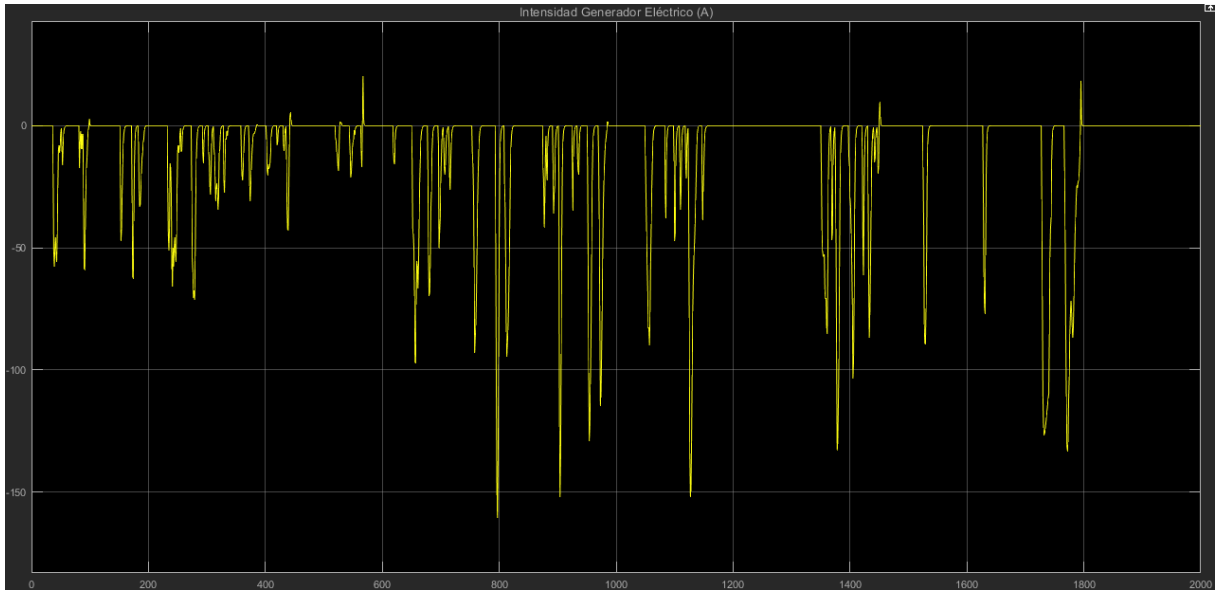


Figura 68. Intensidad generador eléctrico

Sumando los dos flujos de intensidad se obtiene la intensidad global que se introduce a la batería, figura.

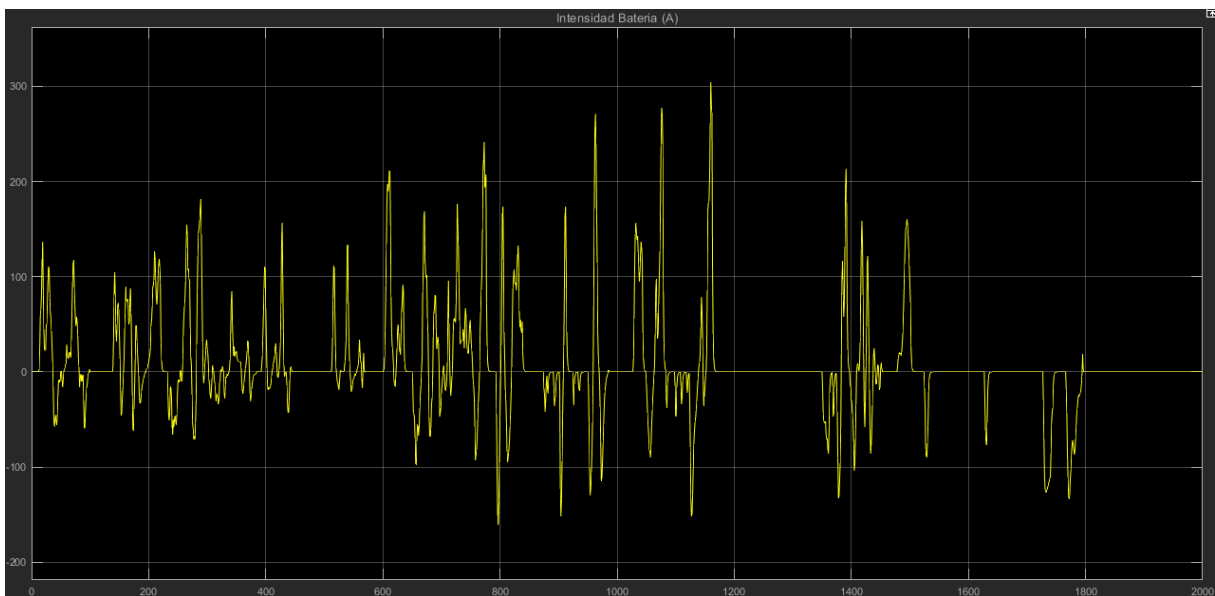


Figura 69. Intensidad de la batería

Como se observa la intensidad tiene puntos con valores positivos, la batería cede energía, y valores con valores negativos, la batería absorbe energía.

A continuación, se analiza la batería, esta tiene las mismas características que las descritas en los parámetros iniciales. El SOC de la batería se muestra en la figura.

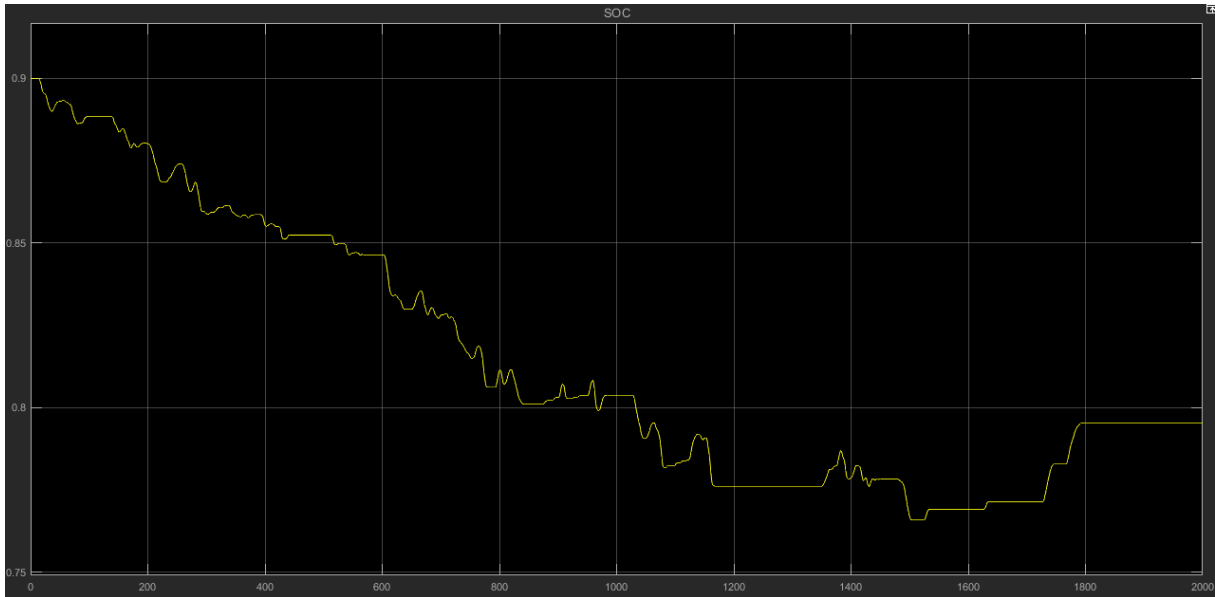


Figura 70. SOC

Como se observa se ha simulado que la batería empiece con un 90% SOC y al final del ciclo llega al 79,5% de SOC. Se observa que la carga de la batería aumenta cuando el generador le suministra potencia.

En la figura se muestra el voltaje de salida de la batería.

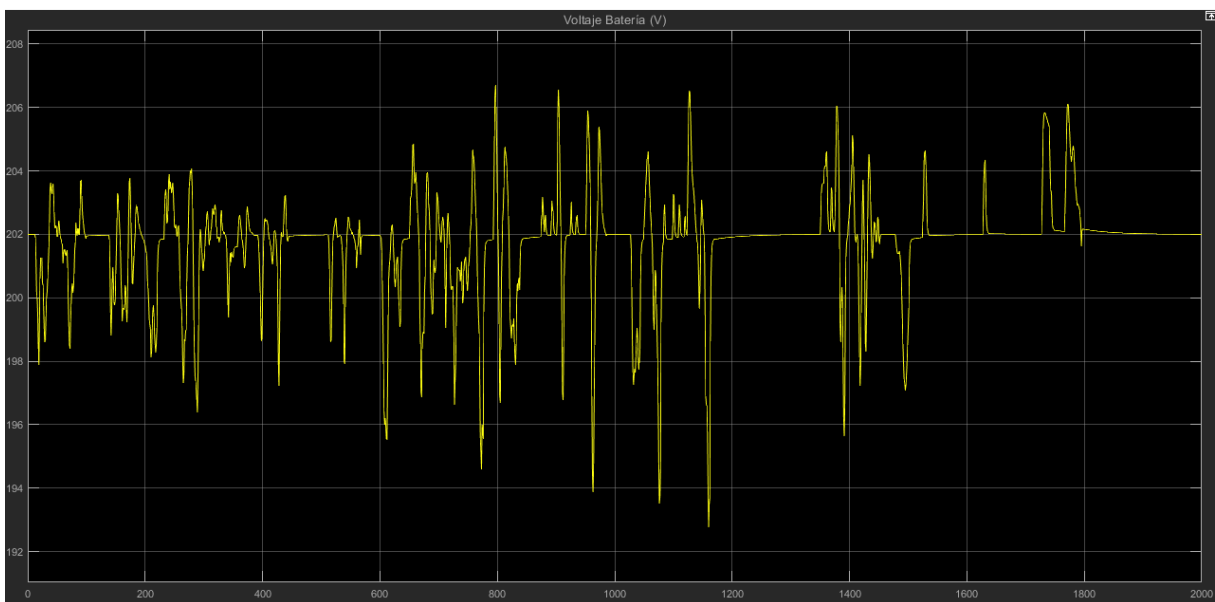


Figura 71. Voltaje batería

En la figura se observa que se producen picos de potencia cuando el motor eléctrico demanda potencia, al igual que el generador.

11.6. RESULTADOS

En la siguiente tabla se muestran los consumos y las emisiones de CO₂ tanto para diferentes con las mismas características en los vehículos.

	Consumo (L/100 Km)		Emisiones CO ₂ (gr/Km)	
	WLTC	NEDC	WLTC	NEDC
Vehículo convencional	4,908	5,472	127,6	142,3
Vehículo con S&S	4,745	5,069	123,4	131,8
Vehículo híbrido	2,848	2,65	74,04	68,89

En la tabla se puede observar como con la implementación del sistema S&S el consumo se reduce en cualquiera de los dos ciclos. La incorporación del sistema eléctrico como vehículo híbrido disminuye significativamente el consumo medio.

En la siguiente tabla se muestran los consumos y las emisiones de CO₂ para el ciclo WLTC con diferentes configuraciones del vehículo.

	Variación consumo			
	Masa +5%	Masa -5%	Aero +5%	Aero -5%
Vehículo convencional	103,7%	96,3%	100,6%	99,4%
Vehículo con S&S	103,9%	96,2%	100,7%	99,4%
Vehículo híbrido	103,5%	96,3%	101,0%	99,0%

De la figura se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la masa un 5% el consumo aumenta de media un 4%, ocurre lo inverso al disminuir la masa del vehículo.
- Al incrementar el coeficiente aerodinámico del vehículo un 5% el consumo aumenta de media menos de 1%.
- El efecto de la masa del vehículo es mucho más alto en el consumo que la aerodinámica.

12. CONCLUSIONES

12.1. Conclusiones.

Se ha comprobado que es factible crear un modelo de un vehículo para realizar el ciclo de homologación WLTC. Si se tiene en cuenta las simplificaciones que se han realizado tanto de la parte de los motores y tanto del propio vehículo, se obtienen unos resultados relativamente bastante precisos con respecto al ciclo real.

Verificando que el modelo realiza los ciclos se obtiene el consumo y las emisiones de dióxido de carbono. Se podría conseguir una mayor precisión en los datos si los modelos fueran más complejos, como, por ejemplo, analizando la cinemática del motor, el rendimiento de los motores y la emisión de otros contaminantes, como partículas, hidrocarburos sin quemar, etc.

Se ha podido comprobar el efecto que tiene la masa del vehículo y la aerodinámica en el consumo de combustible, afectando directamente en el modelo para obtener unas conclusiones de en qué medida afecta cada parámetro modificado.

Respecto al desarrollo del modelo creado para funcionar en bancos de ensayos, permite obtener tanto las presiones medias como el consumo de combustible instantáneo y medio por ciclo. Se comprueba a través de los resultados que el funcionamiento del motor es correcto y está en el mismo orden de magnitud que un motor real con las mismas características.

En este caso el estudio trata sobre un motor de encendido por compresión, pero, sin embargo, con sus respectivos cambios se puede realizar la simulación con un motor con encendido provocado.

Finalmente, como valoración personal, el desarrollo del modelo de Simulink supone una oportunidad de profundizar en el conocimiento del motor y del vehículo híbrido junto con todos los elementos que lo componen. Además, la oportunidad de aprender a utilizar en profundidad el software de simulación Simulink me ha mostrado que es una herramienta con muchas capacidades.

12.2. Principales aportaciones del autor del TFM

La realización de este TFM ha supuesto un reto en cuanto al uso de la herramienta de Simulink que supone el conocimiento en algunas cuestiones, bastante profundas del programa. Hay bastante información sobre dicho programa, además, este software es utilizado con frecuencia en la Escuela de Ingenierías Industriales, por lo cual hay un conocimiento bastante extendido del mismo.

Gracias al Máster en Ingeniería de Automoción y a las propias investigaciones he adquirido conocimientos necesarios del mundo del automóvil para poder utilizar adecuadamente la herramienta de Simulink.

El desarrollo de la simulación se ha basado en algunas ideas de asignaturas impartidas durante el Máster, sin embargo, la plasmación del mismo se ha realizado desde cero, utilizando como referencia las ecuaciones descritas en los primeros apartados. Debido a la complejidad, sobre todo de la parte eléctrica, se han consultado bastantes tutoriales de Simulink.

12.3. Sugerencias para trabajos futuros

Las posibles vías de trabajos futuros son:

- Sería conveniente analizar la influencia del sistema de transmisión del vehículo híbrido ya que este permite gestionar los motores en función de las características de la conducción. La introducción de este sistema podría influir significativamente en los cálculos de consumo y emisiones.
- Otro punto importante es el análisis de otros contaminantes durante los ciclos simulados. En este trabajo solo se ha analizado las emisiones de CO₂, pero sin embargo en los vehículos se generan variedad de contaminantes que no son tan fáciles de calcular. Los otros contaminantes podrían influir significativamente en los resultados obtenidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dormido Bencomo, Sebastian. La edición de estudiante de Simulink: software de sistemas dinámicos: guía de usuario. Madrid. Editorial Prentice-Hall, 1997.
- [2] Apuntes de las asignaturas del Máster de Ingeniería de Automoción.
- [3] Mehrdad Ehsani; Yimin Gao; Ali Emadi. Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory and Design. Second Edition. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2010
- [4] Iqbal Husain. Electric and Hybrid Vehicles. Second Edition. CRC Press, 2010
Arias-Paz, Manuel. Manual De Automóviles Ed. 55. Madrid. Editorial Dossat, 2004 [ARIA04]
- [5] Arias-Paz, Manuel. Manual De Automóviles Ed. 55. Madrid. Editorial Dossat, 2004
- [6] https://www.renault.es/turismos/captur/datos-tecnicos.html?ORIGIN=SEA&CAMPAIGN=es-r-l-off-newcar-cross_models-generic-01-2020-ao-im-go-ice-dsa&qclid=CjwKCAjwrcH3BRApEiwAxjdPTTdA67jUSfAZayHuElMnlwvxdQ4T-s-2KpYLObKuW1mV2_0-kLpHcxoCOW8QAvD_BwE&qclsrc=aw.ds
- [7] <https://www.diariomotor.com/tecnovia/2012/03/14/baterias-de-coches-electricos-e-hibridos-hoy-estado-de-la-tecnologia-del-automovil/>
- [8] <https://forococheselectricos.com/2011/11/motor-electrico-versus-motor-de.html/amp>
- [9] <http://fleridamotors.blogspot.com/2014/11/motores-electricos-un-motor-electrico.html?m=1>
- [10] <https://es.slideshare.net/jesuspascualquilez/1pdf-hibridos>

MASTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER (ANEXOS)

SIMULACIÓN MEDIANTE SIMULINK DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL HÍBRIDO EN UN CICLO WLTC

Autor: D. Adrián Rodríguez Cubillo

Tutor: D. Francisco Tinaut Fluixa

Valladolid, Julio de 2020

ANEXOS

En este trabajo se han añadido como anexos los datos introducidos en Simulink para poder parametrizar.

```
%Caracteristicas Vehiculo
c=1461*10^-6; %cilindrada (m3)
m=1877; %masa vehiculo MMAC
l=4.227; %longitud(m)
an=1.797-0.80; %anchura (m)-80 cm ruedas
al=1.576-0.15; %altura (m) - hueco inferior
Afront=al*an ; %Area frontal (m2)
alpha=0 ; %pendiente (grados)
Cx=0.32 ; %coeficiente de penetracion aerodinamico
km=1.15 ; %factor de masa, coeficiente de inercia
r=0.3 ; %Radio de la rueda

%densidades
densidad_aire=1.1917 ; %densidad aire (kg/m3)
dcomb=810 ; %densidad del combustible (kg/m3)
g=9.80665 ; %gravedad (m/s)

%Constantes
Ca=0.5*densidad_aire*Cx*Afront; %Coeficiente Aerodinamico
Cp=m*g*sin(alpha*pi/180) ; %Coeficiente de pendiente

%Desarrollos
D1=8.2; %Primera (km/h /1000 rpm)
D2=15.7; %Segunda (km/h /1000 rpm)
D3=25; %Tercera (km/h /1000 rpm)
D4=36.5; %Cuarta (km/h /1000 rpm)
D5=46.9; %Quinta (km/h /1000 rpm)
D6=54.8; %Sexta (km/h /1000 rpm)
DR=8.3; %Marcha Atrás (km/h /1000 rpm)
```

En la siguiente figura se muestra los valores del motor eléctrico:

Block Parameters: Mapped Motor

MappedMotor (mask) (link)

Implements a mapped motor and drive electronics operating in torque-control mode. Specify electrical torque range with a torque-speed envelope or maximum motor power and torque. Output torque tracks a torque reference demand and includes a motor and drive response time constant. Specify electrical losses as a single operating point that estimates loss across the operating range, measured loss, or measured efficiency.

Block Options

Port configuration: Speed

Parameters

Electrical Torque Electrical Losses

Parameterized by: Tabulated torque-speed envelope

Vector of rotational speeds, w_t [rad/s]:
[5.66 209.43 314.15 418.87 523.59 628.31 733.03 1047.19]

Vector of maximum torque values, T_t [Nm]:
[400 400 225 150 100 80 70 0 0]

Torque control time constant, T_c [s]:
1

OK Cancel Help Apply

En la siguiente figura se muestran los valores del generador eléctrico

Block Parameters: Mapped Motor1

MappedMotor (mask) (link)

Implements a mapped motor and drive electronics operating in torque-control mode. Specify electrical torque range with a torque-speed envelope or maximum motor power and torque. Output torque tracks a torque reference demand and includes a motor and drive response time constant. Specify electrical losses as a single operating point that estimates loss across the operating range, measured loss, or measured efficiency.

Block Options

Port configuration: Speed

Parameters

Electrical Torque Electrical Losses

Parameterized by: Tabulated torque-speed envelope

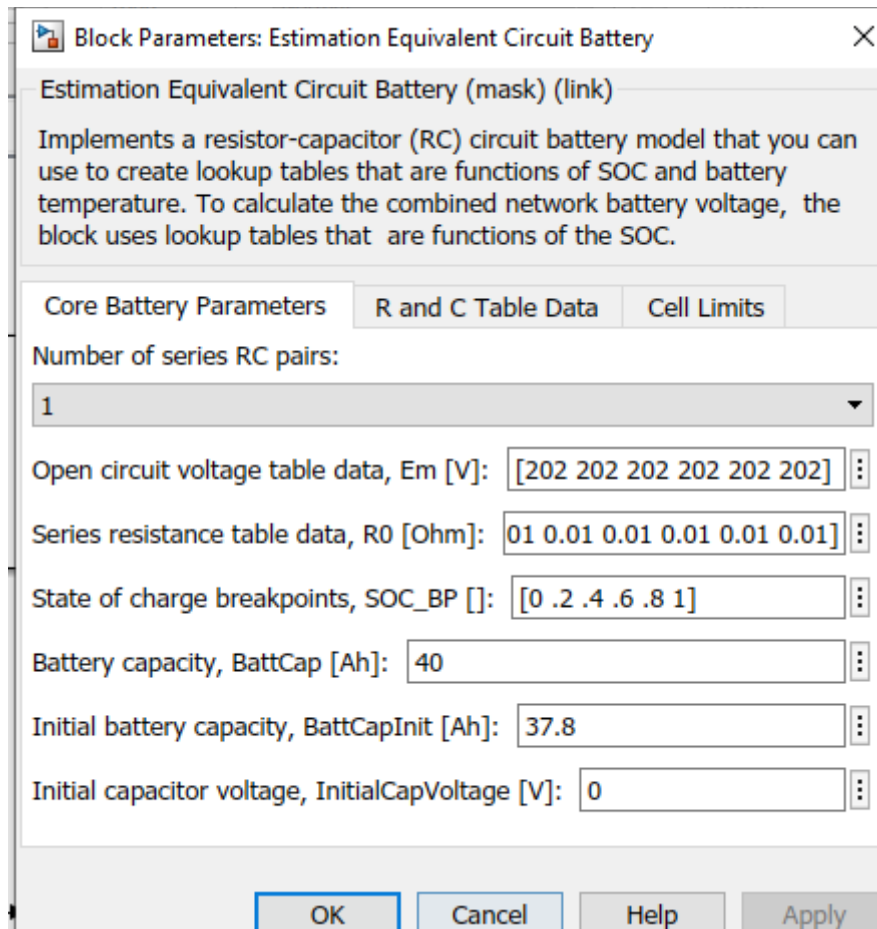
Vector of rotational speeds, w_t [rad/s]:
[5.66 209.43 314.15 418.87 523.59 628.31 733.03 1047.19]

Vector of maximum torque values, T_t , [Nm]:
[400 400 225 150 100 80 70 0 0]

Torque control time constant, T_c , [s]:
1

OK Cancel Help Apply

En la siguiente figura se muestran los valores de la batería:



Block Parameters: Estimation Equivalent Circuit Battery

Estimation Equivalent Circuit Battery (mask) (link)

Implements a resistor-capacitor (RC) circuit battery model that you can use to create lookup tables that are functions of SOC and battery temperature. To calculate the combined network battery voltage, the block uses lookup tables that are functions of the SOC.

Core Battery Parameters | R and C Table Data | Cell Limits

Number of series RC pairs:

1

Open circuit voltage table data, Em [V]: [202 202 202 202 202 202]

Series resistance table data, R0 [Ohm]: [01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01]

State of charge breakpoints, SOC_BP []: [0 .2 .4 .6 .8 1]

Battery capacity, BattCap [Ah]: 40

Initial battery capacity, BattCapInit [Ah]: 37.8

Initial capacitor voltage, InitialCapVoltage [V]: 0

OK Cancel Help Apply