



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FA. CC. EXPERIMENTALES

Titulación de Ingeniería Técnica Industrial Mecánica

Diseño de una estrategia para la gestión energética de un vehículo híbrido enchufable

ALUMNO:

Juan Pablo Chamorro Aguado

Almería, Enero de 2013

DIRECTOR:

José Luís Torres Moreno

Índice

1. Intereses y objetivos.....	5
1.1 Intereses	6
1.2 Objetivos	10
2. Revisión bibliográfica	12
2.1 Estructura de la revisión bibliográfica.....	13
2.2 Introducción a los vehículos híbridos	14
2.2.1 Introducción.....	14
2.2.2 Clasificación de vehículos híbridos.....	15
2.3 Tren de engranajes planetarios	22
2.4 Simulación de sistemas	25
2.4.1 Simulación como proceso experimental	25
2.4.2 Modelos de simulación frente a soluciones analíticas.....	29
2.4.3 Análisis de los resultados.....	31
2.5 Programación en MATLAB	32
2.5.1 Simulink.....	32
2.5.2 Lenguaje de programación Matlab	43
2.5.3 Gráficas en MATLAB.....	53
2.5.4 Funciones de optimización	56

3. Materiales y métodos	58
3.1 Estructura de los materiales y métodos	59
3.2 Materiales	59
3.2.1 Descripción del vehículo.....	59
3.2.2 El Simulador	69
3.3 Métodos	86
3.3.1 Estrategia de control del Chevrolet Volt	86
3.3.2 Otros vehículos propuestos.....	110
3.3.3 Cálculo de costes económicos, emisiones y autonomías.....	115
4. Resultados y discusión	119
4.1 Introducción	120
4.2 Resultados del Chevrolet Volt.....	121
4.2.1 Test Económico.....	121
4.2.2 Test de aceleración de 0 a 100 km/h.....	139
4.2.3 Test de aceleración de 0 a 1000 m	141
4.3 Comparativa entre los vehículos propuestos	142
4.3.1 Ciclo de conducción NEDC (New European Driving Cycle)	143
4.3.2 Ciclo de conducción Artemis highway	145
4.3.3 Ciclo de conducción de NREL a Vail.....	147
4.4 Comparaciones individuales	149
4.4.1 Volt vs Volt sin frenada regenerativa	149
4.4.2 Volt vs Híbrido	151
4.4.3 Volt vs Eléctrico EV	153
5. Conclusiones	156
6. Bibliografía	161

6.1	Libros	162
6.2	Artículos científicos	162
6.3	Manuales	163
6.4	Páginas web	163
6.5	Proyectos fin de carrera	163
6.6	Otros	164
7.	Anexos	165
7.1	ANEXO I: Características técnicas de las máquinas	166
7.1.1	Motor eléctrico	166
7.1.2	Generador eléctrico	168
7.1.3	Motor térmico	169
7.2	ANEXO II: Códigos fuente en MATLAB	171
7.2.1	Estrategia de control Chevrolet Volt	171
7.3	ANEXO III: Cálculo de costes económicos y de emisiones	174
7.3.1	Calculo de costes	174
7.3.2	Cálculo de emisiones	176
7.3.3	Cálculo de autonomías	191

1. Intereses y objetivos

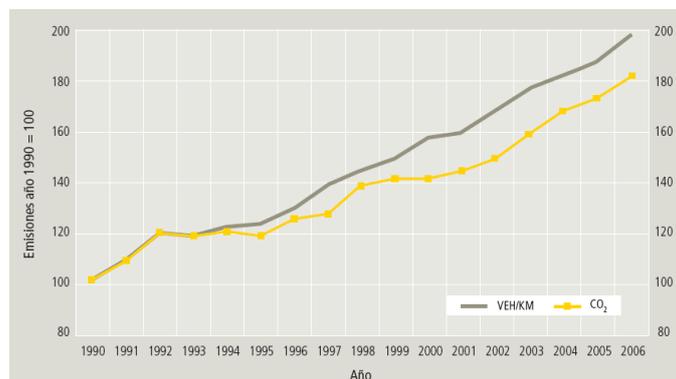
Donde se expone de forma detallada los motivos por los que se realiza el trabajo y los objetivos que se pretenden alcanzar con el mismo.

1.1 Intereses

Cuando hablamos de emisiones generadas por el transporte debemos diferenciar entre aquellas emisiones que contribuyen al cambio climático y aquellas que afectan de forma directa a la salud humana, es decir, las que afectan a la calidad del aire. Las primeras están constituidas por las emisiones de CO₂. Las segundas incluyen gases y partículas diversas como los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y las partículas (PM) entre otros. Ambas son importantes, pero responden a fenómenos distintos. Es importante resaltar que más allá de estas emisiones, el automóvil genera otros impactos ambientales como la contaminación acústica.

El cambio climático consiste en una alteración de las condiciones climáticas generales de la Tierra considerada en su conjunto y a lo largo de los años. Este cambio se está produciendo a consecuencia de un calentamiento global causado por la exaltación del efecto invernadero de la atmósfera. La causa es un incremento de la concentración atmosférica de determinados gases, procedentes en gran parte de actividades humanas, que hacen que la cantidad de energía solar retenida en la Tierra sea mayor y provoquen alteraciones importantes, (se estima que la temperatura global del planeta aumentó de media 0,74 °C durante el siglo XX, y se prevé que pueda hacerlo hasta 6,4 °C en el 2100).

Figura 1.1. Emisiones de CO₂ y movilidad de turismos en España 1990 - 2006



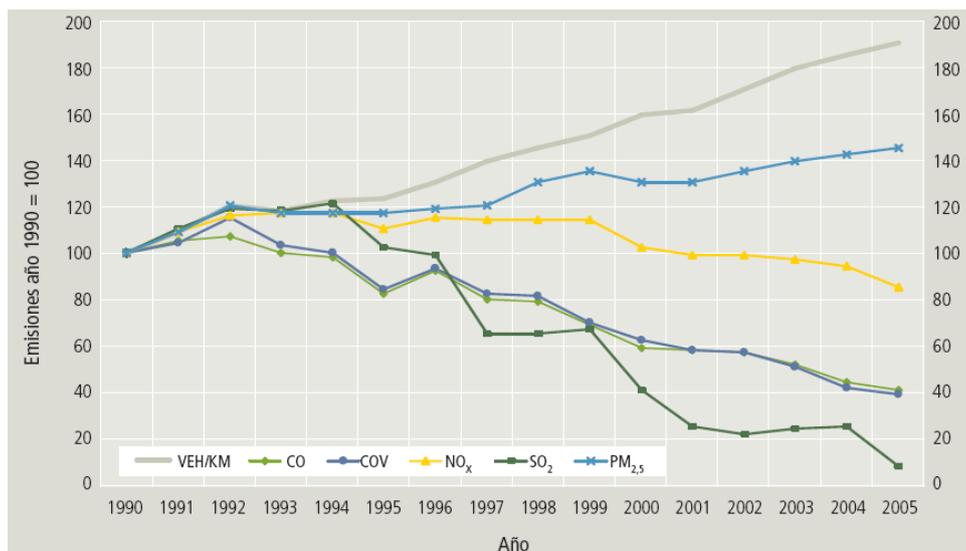
Fuente: Julio Lumbreras et al, "Metodología para la cuantificación de medidas de reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos en el transporte por carretera".

Estos gases son los llamados gases de efecto invernadero (GEI). El transporte es responsable de la emisión de tres tipos de GEI: CO₂, N₂O y CH₄, todos ellos homogeneizados bajo el concepto de CO₂ equivalente.

Como se observa en la Figura 1.1 adjunta, las emisiones de CO₂ provenientes de los turismos han crecido en España casi un 80% entre 1990 y 2005. Esta cifra es superior al crecimiento de las emisiones totales de GEI (que se sitúa en un 53% durante el mismo periodo), y está muy por encima del límite del 15% de aumento al que España se comprometió en el marco del Protocolo de Kyoto. Este aumento se explica en gran parte por el crecimiento registrado de la movilidad en turismo, que ha aumentado casi un 90% durante el periodo considerado. Ha tenido lugar, así, una cierta ganancia de eficiencia, pero en todo caso ésta ha sido insuficiente para acotar el crecimiento de las emisiones de CO₂ y situarlos en niveles cercanos a los fijados por el Protocolo de Kyoto.

El transporte es una fuente muy importante de emisión de contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno (NO_x), las partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2,5}), el dióxido de azufre (SO₂), el ozono (O₃), el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos (HC) y los compuestos orgánicos volátiles (COV).

Figura 1.2. Emisiones de gases contaminantes y partículas provenientes de los turismos en España, 1990 - 2005

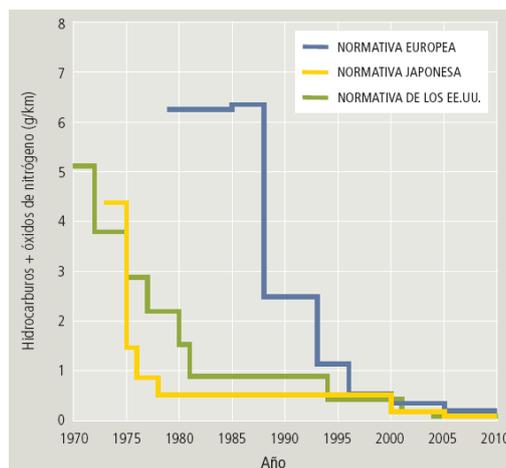


Fuente: Julio Lumbreras et al, "Metodología para la cuantificación de medidas de reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos en el transporte por carretera".

La evolución de las emisiones de gases contaminantes y de partículas que afectan a la calidad del aire provenientes de los turismos ha sido dispar en los últimos años. Por un lado, como se observa en la Figura 1.2, las emisiones de partículas han aumentado de forma significativa entre 1990 y 2005. En cambio, las emisiones de NO_x , CO, COV y de SO_2 se han reducido de forma muy notable. En el caso de SO_2 , las emisiones contaminantes se han reducido prácticamente a 0; y en el de los demás gases ha habido reducciones de hasta un 60%. Nótese que ello ha sido así a pesar del aumento del parque de turismos y de la movilidad asociada a los mismos.

Esta evolución, en general positiva, ha sido propiciada fundamentalmente por la introducción de diversas normativas Euro que desde finales de los años 80 han impuesto límites de emisión cada vez más restrictivos a los diferentes tipos de vehículos. Como se ve en la figura 1.3, la reducción de las emisiones individuales de NO_x y de carbono ha sido dramática: un coche de gasolina en la actualidad contamina alrededor de 30 veces menos por kilómetro recorrido que uno fabricado en los años setenta. Este patrón ha sido similar en Europa, Estados Unidos y Japón.

Figura 1.3. Normativas sobre las emisiones de los vehículos.



Fuente: Julio Lumbreras et al, "Metodología para la cuantificación de medidas de reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos en el transporte por carretera".

La normativa actual vigente para este marco es la normativa Euro V establece valores límite de las emisiones contaminantes aplicables a los vehículos de carretera ligeros. La tabla 1.1 muestra los límites para vehículos ligeros diesel y gasolina en mg/kg. [17]

Diesel		Gasolina	
Monóxido de carbono	500	Monóxido de carbono	1000
Partículas	5	Hidrocarburos no metanos	68
Óxidos de nitrógeno	180	Hidrocarburos totales	100
Otras emisiones combinadas	230	Óxidos de nitrógeno	60

Tabla 1.1. Límites de emisiones para gases contaminantes establecidos por la norma EURO V en mg/kg.

Otra normativa ahora vigente es la que propuso la comisión europea COM 2007/19 en la que se impone a los fabricantes de automóviles un límite de emisión de CO₂ para los vehículos nuevos matriculados en la Unión Europea a fin de alcanzar el objetivo medio de 120 g de CO₂/km. En caso de superarlo, se aplicaría una sanción económica al fabricante en cuestión. [17]

La mejora de la eficiencia energética de los vehículos es, sin duda, la forma más rápida y menos costosa desde el punto de vista económico, de reducir el consumo de carburante y las emisiones de CO₂ provenientes del transporte. Según estimaciones de la Agencia Internacional de la Energía [AIE], a nivel global es posible reducir en el horizonte del año 2030 hasta un 30% el consumo de carburante de los coches nuevos, simplemente a partir del desarrollo de tecnologías ya existentes y de la hibridación de vehículos de gasolina y diesel. Así mismo, la AIE estima que la reducción de carburante podría alcanzar hasta un 50% con el desarrollo de vehículos eléctricos o con pila de hidrógeno, en un horizonte temporal un poco más largo (2030). [1]

Hay diferentes opiniones acerca de si los vehículos híbridos son una solución a largo plazo para combatir los problemas de la polución y la dependencia energética o no. Por un lado, desde un punto de vista técnico, los arquitectos automovilísticos no son muy partidarios de la propulsión híbrida. Les parece que duplicar sistemas no es un camino muy certero, ya que implica montar dos motores, dos alimentaciones, dos almacenes de energía/combustible, etc.. lo que se traduce

en demasiada complejidad mecánica, demasiadas piezas y demasiado esfuerzo y precio para lo que se puede hacer con un solo motor. Por otro lado, se sitúan los que defienden que los híbridos son la mejor solución para los entornos urbanos, ya que entre semáforo y semáforo, a bajas velocidades, es cierto que los consumos de estos vehículos son muy bajos, además de sus niveles de contaminación, lo que ayuda a mejorar la calidad del aire en las ciudades.

Esta división de opiniones hace que aunque las marcas trabajen en prototipos y en algunos modelos de producción, no todas estén decididas a sacarlos adelante de forma masiva.

En mi opinión éste tipo de tecnología puede ser una solución a corto - medio plazo sobre todo en la mejora de la calidad del aire de las ciudades, tan dañina tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas, además de ser un paso intermedio hacia una tecnología más limpia con cero emisiones.

Queda por tanto concluido que el interés del estudio de la tecnología híbrida para vehículos ligeros está justificado, primero por la necesidad urgente de reducir las emisiones y mejorar la calidad del aire, sobre todo en las ciudades y segundo porque un dominio de una tecnología híbrida eficiente sobre el transporte supondría una reducción importante de la dependencia energética de terceros países.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es diseñar una estrategia de control capaz de determinar y activar de forma automática los modos de funcionamiento de un vehículo eléctrico híbrido y enchufable con el objeto de optimizar las fuentes de energía que dispone sin descuidar las exigencias de rendimiento en todo momento y bajo cualquier régimen de marcha. Las emisiones producidas en el ciclo de conducción homologado tendrán que cumplir con la normativa propuesta por la comisión europea COM 2007/19 en la que el límite de emisión de CO₂ no puede superar los 120 g de CO₂/km.

Para poder lograr esta meta, escogeremos un simulador programado en *MATLAB* en el que está implementado un generador de ciclos que se encargará de traducir las necesidades de potencia exigidas por ciclos de conducción normalizados y otro bloque que contendrá la dinámica de un vehículo, concretamente de un *Chevrolet Volt*, un vehículo híbrido de rango extendido y eléctrico enchufable. Se diseñará e implementará en el mismo lenguaje una estrategia de control que recoja los datos que exporta el generador de ciclos y gestione los modos de funcionamiento del vehículo. Una vez implementado el bloque de control se realizarán dos tipos de simulaciones: en primer lugar se simulará el modelo para distintos ciclos de conducción donde se analizarán los resultados bajo un punto de vista de optimización energética y en segundo lugar se utilizarán dos tests de aceleración para analizar las prestaciones del vehículo, uno de 0 a 100 km/h y otro de 0 a 1000 metros.

Además vamos a proponer otros tipos de vehículos, que se obtendrán mediante la adaptación del simulador que disponemos para comparar así con nuestro vehículo el gasto energético en cada uno de los ciclos de conducción, siempre desde un punto de vista de optimización energética.

2. Revisión bibliográfica

Donde se incluye aquella información relacionada con el tema objeto de estudio que se considera necesaria para la mejor comprensión del planteamiento del mismo, ofreciendo una panorámica completa del tema elegido.

2.1 Estructura de la revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica debe de contar con unos principios y unos objetivos para poder desarrollar un texto que guíe al lector en la comprensión de las bases teóricas necesarias, sin caer en el exceso de un manual especialista, pero con el suficiente rigor para permitirnos encontrar la información necesaria de los distintos temas que se tratan, y es por ese motivo por el que expondremos tanto la estructura que rige esta revisión bibliográfica, como las herramientas utilizadas en su redacción.

Tenemos como principios básicos en la redacción de esta revisión bibliográfica la precisión, la concreción y las referencias. En esta revisión no es necesaria una continuidad estricta de un capítulo a otro para que exista una lectura productiva, pero sí es recomendable que lo sea entre secciones dentro de un mismo capítulo, para ir siguiendo la evolución de los temas tratados en cada capítulo de este apartado. Es necesario razonar por qué hemos incluido estos conceptos y no otros y como su conocimiento nos va a ayudar a lo largo del proyecto. Entendemos también, como ya hemos expuesto, que los conceptos a desarrollar deben ser estrictamente los necesarios para la comprensión de la práctica. Por último, consideramos que las referencias a manuales y artículos de reconocido prestigio es la única forma de dar rigor al escrito, ofreciendo al lector la oportunidad de profundizar en conocimientos, si por ejemplo, este proyecto es usado como base para futuros trabajos.

Al principio de cada capítulo, mostraremos la utilidad de la comprensión de lo explicado y revelaremos la estructura que vamos a seguir para que esta comprensión sea lo más eficaz posible. También comentaremos la bibliografía utilizada, que se nombrará por el apellido del autor y su correspondiente número en la bibliografía general, nombrando el título del libro sólo si hubiera confusión.

La revisión bibliográfica se divide en 4 grandes bloques:

En el primero introduciremos al lector en el estudio de vehículos híbridos y sus distintos tipos y configuraciones. Este bloque se corresponde con la sección *2.2. Introducción a los vehículos híbridos.*

El segundo bloque expondrá los conceptos necesarios referentes a un tren de engranajes planetarios utilizado en la propulsión de un vehículo híbrido, con el objeto de comprender mejor su funcionamiento y conocer su terminología, ya que se utilizará en el vehículo escogido para realizar las simulaciones. Este bloque se corresponde con 2.3. *Tren de engranajes planetarios*.

El tercer bloque estará dirigido al entorno de la simulación de sistemas y a la utilización de modelos matemáticos, ya que este proyecto se basa en un simulador. Este bloque se corresponde con la sección 2.4. *Simulación de sistemas*.

Por último, en el último bloque se hará referencia a términos y conceptos básicos de simulación y programación en *MATLAB* que será de vital importancia para comprender las funciones que se utilizarán para la realización de este proyecto. Este bloque se corresponde con la sección 2.5. *Simulación y programación en MATLAB*.

2.2 Introducción a los vehículos híbridos

2.2.1 Introducción

Un vehículo eléctrico híbrido [HEV] es un vehículo al que se le añade una o varias máquinas eléctricas a una transmisión de potencia convencional, ayudando así a optimizar el consumo del motor térmico, alcanzar el nivel de carga requerido y permitir una frenada regenerativa. Esto nos permite poder optimizar el tamaño del motor térmico y en consecuencia conseguir aprovechar mejor el combustible, reducir las pérdidas de calor y suavizar los picos de potencia. La reducción de potencia que ocasiona un motor térmico más pequeño se compensa mediante la máquina eléctrica, sobre todo cuando aumenta la demanda de potencia. Ésta máquina eléctrica suministra el par de una forma más rápida que el motor térmico, especialmente a bajas velocidades, mejorando así el rendimiento de inicio incluso con una potencia nominal reducida. Mediante el sistema electrónico podemos controlar el motor térmico para que siempre opere en una región óptima pese a la carga de la carretera. Además, cuando el vehículo está desacelerando, la máquina eléctrica puede aprovechar la energía cinética del vehículo y recargar la batería.

Debido a su significativa reducción en consumo de combustible y emisiones, los HEVs están siendo desarrollados por multitud de firmas automovilísticas. A finales de 1997, *Toyota Motor Corp.* lanzó la primera generación de *Prius* que presentaba el Toyota Hybrid System (THS). Hacia 2006, la firma japonesa sacó a la luz una nueva versión de *Prius*, con el (THS II), que mejoraba el rendimiento del vehículo, el espacio del interior y el consumo de combustible. Hasta la fecha ha sido el *Prius* más exitoso en ventas.

Honda, el otro pionero en el campo de los híbridos, introdujo su primer vehículo híbrido comercial en los Estados Unidos, el *Insight*, en 1999. Con él consiguió la clasificación EPA (Agencia de Protección Ambiental de los EEUU) más alta en ahorro de combustible en un vehículo de pasajeros con 25,5 / 28,1 [km/l] (ciudad / carretera). En 2002, *Honda* lanzó el *Civic Hybrid* para hacerle la competencia al *Prius* de *Toyota*.

Por otra parte, los fabricantes de automóviles americanos empezaron a darse cuenta del impacto de los vehículos híbridos y se pusieron en marcha para ponerse al día. *Ford* fue el primer fabricante americano en ofrecer híbridos, lanzando el *Ford Escape Hybrid* a finales de 2004. En 2006 *GM*, *DaimlerChrysler* y *BMW* juntaron esfuerzos para explorar nuevas tecnologías híbridas y así competir en el mercado, abriendo un nuevo departamento exclusivamente para el híbrido.

2.2.2 Clasificación de vehículos híbridos

Debido a que el desarrollo de híbridos está consiguiendo acaparar más y más atenciones por parte de los fabricantes, emergen varios diseños y tecnologías híbridas que luego son aplicadas a la producción de vehículos. Estos diseños se clasifican según grado de hibridación o según su arquitectura mecánica.

Según el grado de hibridación, los HEVs se dividen en varias categorías: Híbrido ligero, Híbrido asistido, Híbrido completo o Híbrido enchufable.

El híbrido ligero es un vehículo convencional con un gran motor de arranque, lo que permite que el motor térmico se apague cuando el vehículo está en punto muerto, frenando o parado, para luego arrancar rápidamente.

El híbrido asistido, usa el motor térmico para la potencia primaria, es decir, la potencia mínima necesaria que requiere la carretera, pero con un motor eléctrico que le proporciona un par adicional. El motor eléctrico normalmente está montado entre el motor térmico y la transmisión, y no solo funciona cuando el motor está apagado, sino también cuando el conductor demanda un extra de potencia.

El híbrido completo, es un vehículo que puede funcionar o bien solo con el motor térmico, o solo con la batería o una combinación de ambas. Este tipo de vehículos necesita de una batería con una gran capacidad de almacenaje para cubrir las necesidades en el modo solo eléctrico de forma satisfactoria.

Por último, el híbrido enchufable es capaz de funcionar solo con el modo eléctrico a partir de las baterías pero además éstas pueden ser recargadas desde una fuente de alimentación exterior. Esto permite que funcione sin depender de la gasolina, ideal para desplazamientos frecuentes y diarios, además de tener el rango extendido de cualquier híbrido para desplazamientos largos.

Por otro lado, los HEVs pueden ser clasificados según su sistema de impulsión y se dividen en tres grupos: híbrido paralelo, híbrido serie e híbrido combinado.

2.2.2.1 Vehículos híbridos en paralelo.

La configuración en paralelo, mostrada en la Figura 2.1 adjunta, incluye dos partes bien diferenciadas encargadas de la impulsión: una parte mecánica (motor térmico de combustión interna) con una transmisión de potencia convencional, y una parte eléctrica, normalmente un motor eléctrico alimentado por una batería que sirve como sistema alternativo de impulsión.

Cuando la baterías eléctrica está en niveles bajos no se puede impulsar el vehículo completamente sin la potencia del motor térmico. (el vehículo actuaría como híbrido ligero y/o híbrido asistido, es decir, solo se utilizaría el sistema eléctrico para arrancadas rápidas y en asistencias a demandas de potencia muy altas). En cambio cuando la batería está cargada, el vehículo puede ser completamente impulsado mediante electricidad o acompañando al motor térmico. (se comporta como un híbrido completo).

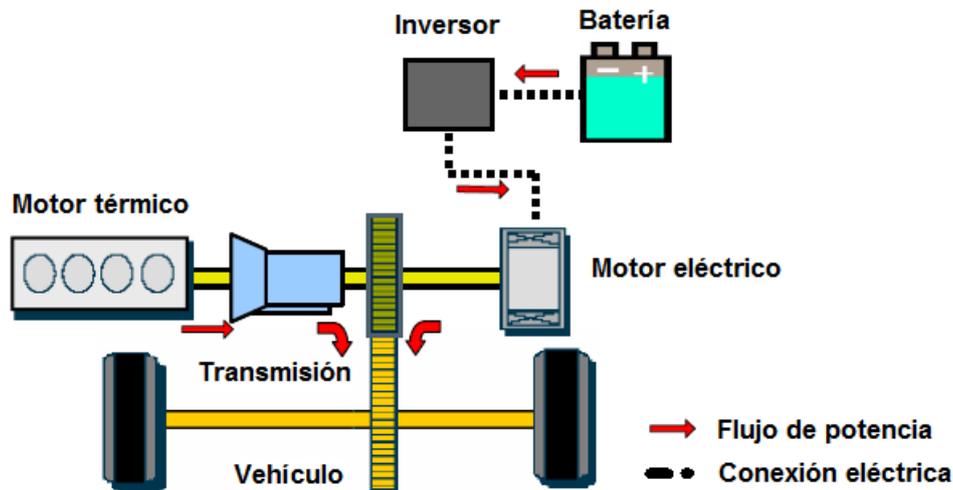


Figura 2.1. Configuración híbrido en paralelo

El papel principal del conjunto eléctrico es capturar energía en las frenadas y asistir al motor térmico para que éste opere solo en regiones de eficiencia.

En la Figura 2.2 adjunta se muestra un mapa de consumo de combustible de un motor típico de gasoil/gasolina. Como se observa, la zona más eficiente se encuentra en la mitad de su intervalo de operación (entre las dos líneas de puntos) y fuera de ésta, la eficiencia disminuye. En un híbrido en paralelo el sistema eléctrico se emplea para suministrar potencia en las regiones de ineficiencia del motor de combustión, como es el caso de la región señalada para la flecha A en el que el motor eléctrico ayudaría al motor térmico en el suministro de potencia, mejorando así la eficiencia. En el otro extremo (región señalada por la flecha B), el motor de gasolina se vuelve también ineficiente, y por tanto es ayudado o suplido por el eléctrico, para aumentar la eficiencia.

Las situaciones de baja eficiencia se producen sobre todo en conducciones por ciudad, donde las aceleraciones y frenadas son frecuentes, por lo que se obliga al motor de combustión a funcionar en regiones de baja eficiencia la mayor parte del tiempo. Debido a esto y a que el sistema eléctrico no puede cargar la batería y asistir en la entrega de potencia al mismo tiempo hacen que los híbridos montados en paralelo no destaquen en eficiencia por ciudad comparados con otros tipos de híbridos del mismo tamaño.

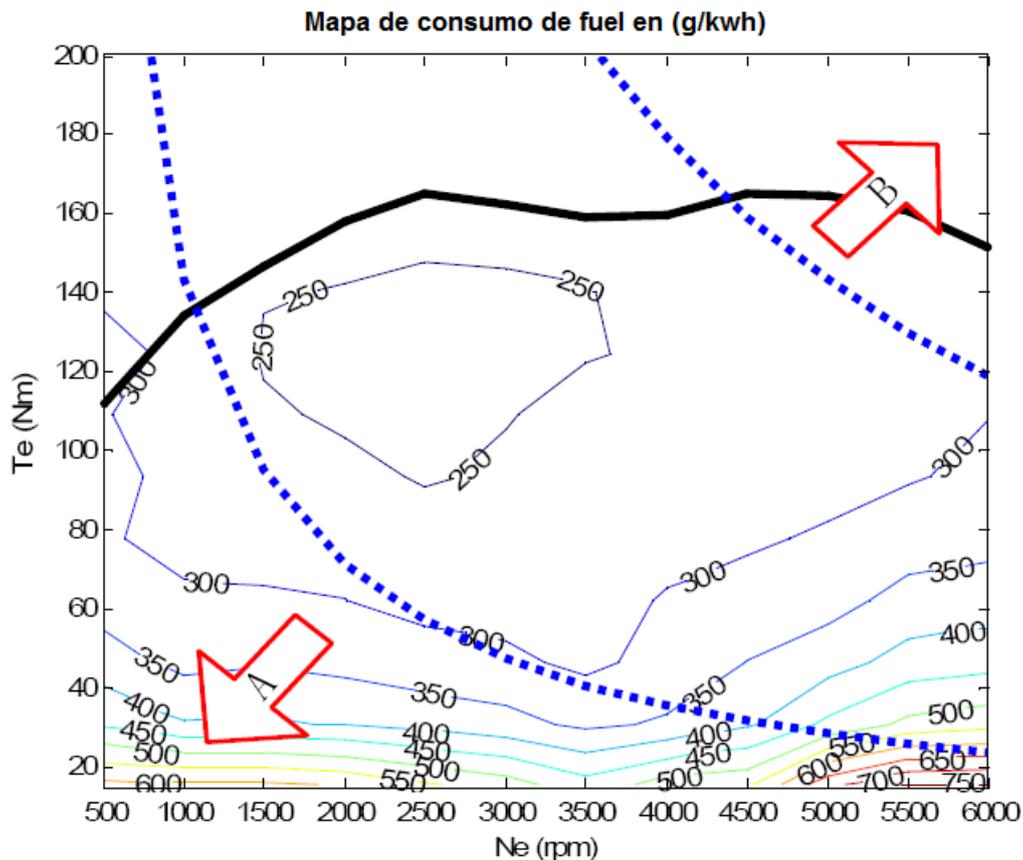


Figura 2.2. Mapa de consumo de combustible de un motor Saturn 1.9L (95 kW) DOHC SI.

Dependiendo de la conexión en la transmisión entre el motor eléctrico y el motor de combustión, la configuración en los híbridos paralelos pueden tener formas diferentes. Sin embargo, los análisis de flujo de potencia permanecen iguales y son relativamente sencillos. Por ejemplo, para un híbrido ligero, en el que el motor eléctrico solo sirve como motor de arranque, y montado en paralelo el sistema de control es muy simple, ya que las dos máquinas no funcionan de forma simultánea en ningún caso. En cambio para un híbrido completo en paralelo, el algoritmo de control es seguro mucho más elaborado.

2.2.2.2 Vehículos híbridos en serie

En la configuración en serie es el motor eléctrico quien únicamente impulsa las ruedas, es decir, el motor de combustión no está involucrado directamente en la propulsión, tal y como se muestra en la Figura 2.3 adjunta.

La potencia que genera el motor eléctrico está suministrada por, o bien, un dispositivo de almacenamiento (como las baterías) o por un generador, que transforme la potencia mecánica procedente del motor de combustión en energía eléctrica), o una combinación de ambas fuentes en una proporción determinada por el sistema de control. Esto tiene la ventaja de que el motor de combustión opere de forma independiente a la velocidad del vehículo y a las condiciones de la carretera, con lo que es inducido a operar siempre en las zonas óptimas del motor. Además la estrategia de control de un híbrido en serie es relativamente simple, ya que el análisis de flujo de potencia es sencillo y el motor de combustión se controla aparte.

Esta forma de montaje de híbridos se está enfocando más para autobuses y camiones.

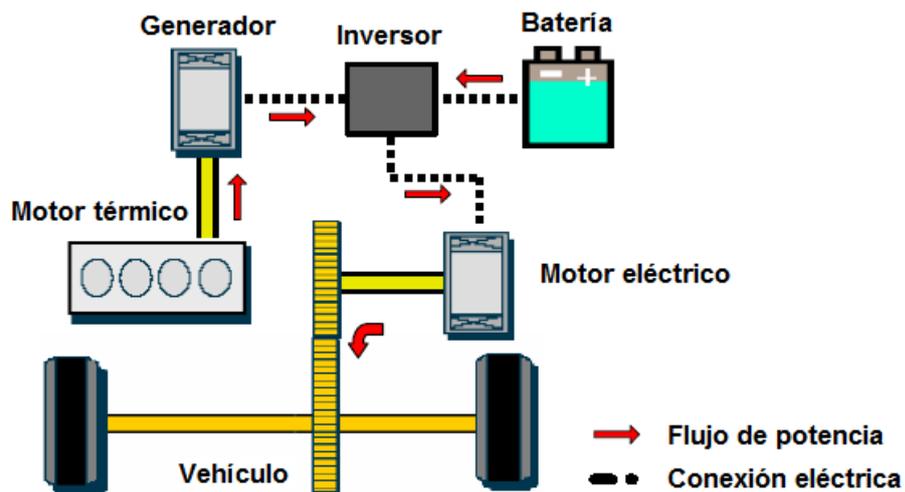


Figura 2.3. Configuración híbrido en serie.

Pero una desventaja importante de la configuración en serie es que la eficiencia de las máquinas reducen el conjunto del rendimiento. El flujo de potencia que pase a través de componentes eléctricos en la transmisión tiene peor rendimiento que componentes mecánicos, debido a los campos magnéticos que se generan en la transformación y la pérdida de calor que se generan en los accesorios eléctricos, y como la potencia pasa a través de componentes eléctricos todo el tiempo el sistema en su conjunto se vuelve relativamente más ineficiente sobretodo en regiones donde podría tener un funcionamiento más óptimo con el

motor de combustión impulsando las ruedas directamente. Esta desventaja se hace notar en conducción por carretera donde la velocidad y el ritmo son más constantes.

2.2.2.3 Vehículos híbridos eléctricos de rango extendido

Este nombre se debe a que, dado su montaje mecánico, con una estrategia de control apropiada se puede diseñar un híbrido que combine las ventajas de un híbrido en serie y las de un híbrido en paralelo evitando sus inconvenientes.

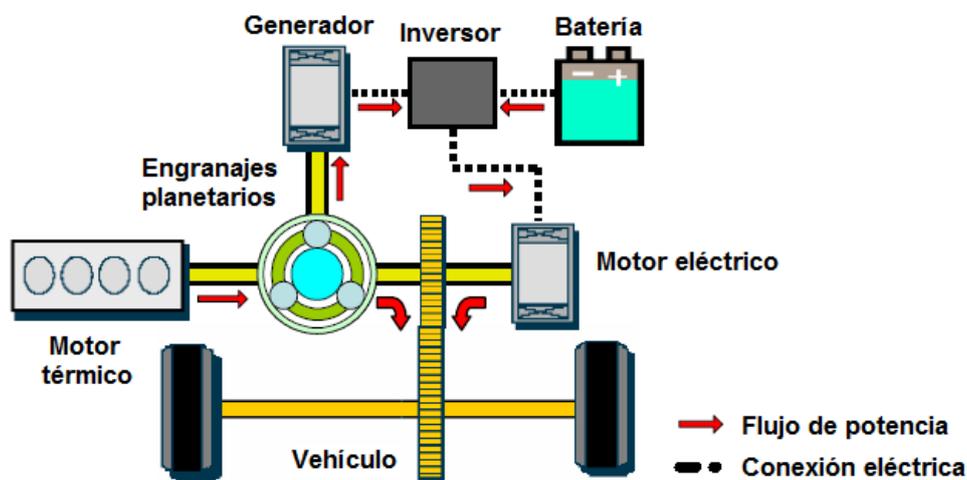


Figura 2.4. Configuración híbrido de rango extendido.

Como se muestra en la figura 2.4. la configuración de este tipo de híbridos usa los dos mecanismos de impulsión que tienen los serie y los paralelo. En primer lugar, el sistema separa el flujo de potencia en dos: el que proporciona el motor de combustión y el que proporciona la batería (similar al montaje en paralelo). La diferencia es que en lugar de una transmisión que conecte solo una de las máquinas a las ruedas como se hacía con anterioridad en los otros híbridos, estos llevan incorporados una transmisión de engranajes planetarios que conectan con el carrier al motor de gasolina/gasoil y al motor eléctrico al mismo tiempo. Y en segundo lugar, se acopla un generador al motor de combustión para, o bien cargar las baterías o proporcionar potencia eléctrica al motor eléctrico (similar al montaje en serie). Con esta configuración se puede operar a baja velocidad como un híbrido en serie evitando las desventajas del paralelo y cambiar al híbrido en paralelo cuando la velocidad es alta, evitando las desventajas del híbrido serie.

Esto hace que el control y gestión de la procedencia de las potencias se vuelvan más complejas en comparación con las otras configuraciones.

El desarrollo de los mecanismos dedicados a dividir potencia se remontan a finales de los 60 y principios de los 70. Los primeros de estos mecanismos aparecieron en las transmisiones hidrostáticas que se usaban en máquinas para cortar césped. La idea de usar estas transmisiones e introducir una variable eléctrica en ellas cogió cada vez más fuerza, pero hasta a finales de los 90 el concepto no se aplicó para vehículos de pasajeros. El primero en introducir el sistema divisor de potencia en vehículos de pasajeros fue *Toyota* con su *Toyota Hybrid System* (THS). Éste es el sistema más empleado en la gama *Prius* y el resto de híbridos de *Toyota*. Las nuevas tecnologías electrónicas de control y las mejoras introducidas en el tren de engranajes planetarios mantienen este sistema a la cabeza del mercado. El otro diseñador de híbridos de rango extendido es Allison Hybrid System (ASHII), desarrollado por *GM* y que está siendo introducido en camionetas y vehículos ligeros.

La figura 2.5. adjunta muestra un ejemplo de una transmisión de potencia simple para un híbrido de rango extendido, que permite que la potencia pueda provenir de diferentes máquinas. Una parte de la potencia del motor de combustión se dedica a la impulsión del vehículo mediante la parte mecánica y el resto va al

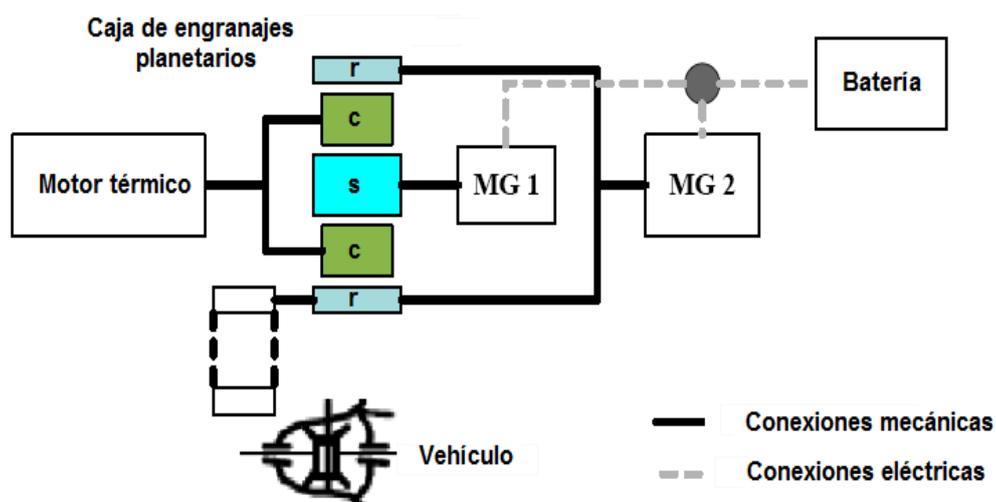


Figura 2.5. Configuración del tren de potencia de un híbrido de rango extendido simple.

generador, donde se transforma en electricidad. Esta energía eléctrica o bien se almacena en las baterías o se envía al motor para dedicarla a la impulsión.

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 envíe 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. En este tren de potencia, los satélites (s), que van conectados al motor de combustión son el punto de entrada de potencia. La salida de potencia se hace a través de la corona (r) y a ésta hay una de las máquinas eléctricas conectada (MG 2). Por último, la otra máquina eléctrica (MG 1) está conectada al sol (s) de la caja de engranajes planetarios. Esta configuración permite que la entrada de potencia se realice de forma dividida e independiente. [3, 9 y 10]

2.3 Tren de engranajes planetarios

Un tren de engranajes planetarios es capaz de conectar las potencias entregadas por tres máquinas diferentes y es por tanto un dispositivo clave para los vehículos híbridos de rango extendido. Consiste en tres ejes rotativos: el sol, los engranajes satélites y la corona (como se muestra en la figura 2.6). Como resultado de las conexiones mecánicas entre los engranajes de uno y otros ejes, la relación en todo momento entre la velocidad angular de la corona (ω_r), la velocidad angular del sol (ω_s) y la del carrier (ω_c) es la siguiente:

$$\omega_s \cdot S + \omega_r \cdot R = \omega_c \cdot (R + S) \quad (1)$$

donde R, y S son los radios o número de dientes de la corona y del sol respectivamente. Esta relación implica que un tren de ejes planetarios (epicicloidales) tenga solamente dos grados de libertad, a pesar de que tenga tres ejes que se puedan mover.

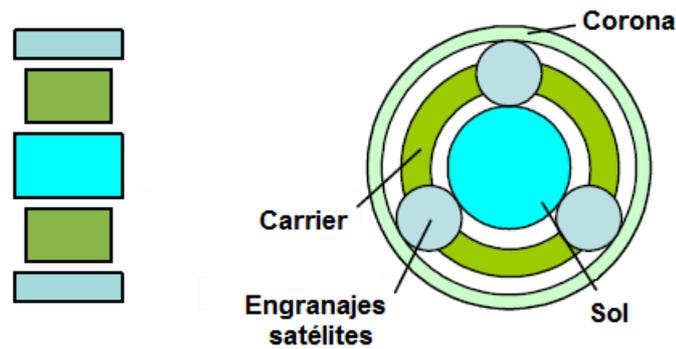


Figura 2.6. Esquema de un tren de engranajes planetarios.

La figura 2.7 muestra el diagrama de cuerpo libre de un tren de engranajes planetarios. La masa de los engranajes satélites se asume que va a ser pequeña para conseguir una transmisión de fuerzas ideal. La dinámica de los ejes se obtiene como:

$$\dot{\omega}_r \cdot I_r = F \cdot R - T_r \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_c \cdot I_c = T_c - F \cdot R - F \cdot S \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_s \cdot I_s = F \cdot S - T_s \quad (4)$$

donde T_r , T_s y T_c son los pares en los ejes de la corona, el sol y el carrier respectivamente, y I_r , I_s y I_c sus correspondientes inercias. F representa las fuerzas internas entre los engranajes satélites y los otros. R y S son los radios de la corona y del sol respectivamente, como hemos indicado anteriormente.

Si de las ecuaciones (3, 4 y 5) no se consideramos las inercias de la corona, del sol y del carrier, el par de cada eje satisface la siguiente relación:

$$T_r + T_s + T_c = 0 \quad (5)$$

y la conservación de potencia de todo el conjunto del sistema de engranajes lleva a:

$$T_r \cdot \omega_r + T_s \cdot \omega_s + T_c \cdot \omega_c = 0 \quad (6)$$

En base a las ecuaciones 1, 5 y 6 tenemos:

$$T_r = -\frac{R}{R+S} \cdot T_c \quad (7)$$

$$T_s = -\frac{S}{R+S} \cdot T_c \quad (8)$$

Las ecuaciones 7 y 8 indican que el par que entra en el carrier viene dado por una razón que depende de los engranajes del sol y de la corona. Esta razón se determina mediante el diseño del tren de engranajes planetarios.

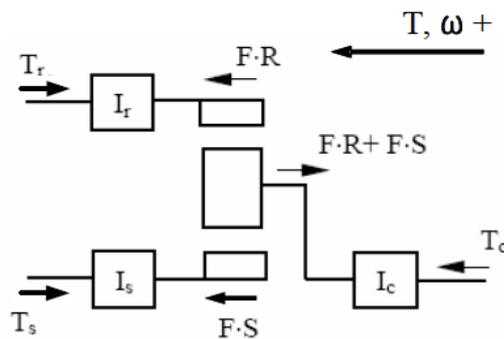


Figura 2.7. Análisis de fuerzas en el tren de engranajes planetarios.

Este sistema aquí descrito se puede usar también bloqueando alguno de los tres ejes giratorios. Por ejemplo, si bloqueásemos el eje de la corona, su velocidad sería nula, con lo que la ecuación 1 sería ahora:

$$\omega_s \cdot S = \omega_c \cdot (R + S) \quad (9)$$

Con lo cual, ya no pasa flujo de potencia a través de la corona y la conservación de potencia se produce entre el sol y el carrier:

$$\frac{\omega_s}{\omega_c} = \frac{T_c}{T_s} \quad (10)$$

La figura 2.8. presenta las velocidades de rotación de los tres ejes como vectores rectos, calculados con el método de la palanca. Nótese que la velocidad angular es positiva en el sentido de las agujas del reloj. [3]

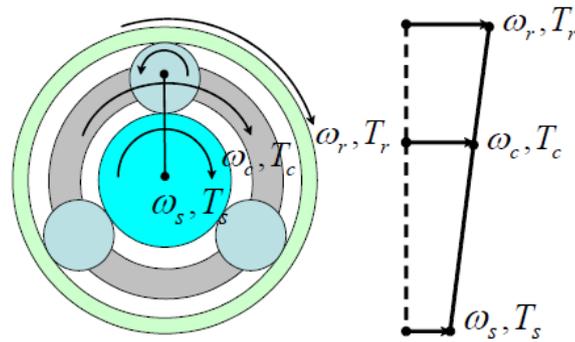


Figura 2.8. Tren de engranajes planetarios y diagrama

2.4 Simulación de sistemas

En este bloque trataremos en primer lugar el uso de la simulación en ingeniería desde un punto de vista global con el objetivo de introducir al lector en este campo, ya que el entorno y nuestro punto de partida para la realización de nuestro proyecto es un modelo matemático de simulación de un vehículo híbrido.

En segundo lugar, introduciremos y presentaremos al lector el entorno de trabajo de MATLAB para la simulación sobre el que nosotros trabajaremos. Además, en este bloque expondremos algunos conceptos de programación y algunas funciones básicas que serán las herramientas que utilizaremos para la implementación en lenguaje MATLAB de nuestra estrategia de control.

2.4.1 Simulación como proceso experimental

La práctica de la simulación es una técnica que adopta un punto de vista global desde el que se intenta observar cómo cambian conjuntamente todas las variables del modelo con el tiempo. En todo caso, las relaciones entre las variables deben obtenerse a partir de tales observaciones. Esta concepción caracteriza la simulación como una técnica experimental de resolución de problemas, lo que comporta la necesidad de repetir múltiples ejecuciones de la simulación para poder entender las relaciones implicadas por el sistema, en consecuencia, el uso de la simulación en un estudio debe planificarse como una serie de experimentos cuyo diseño debe seguir las normas del diseño de experimentos para que los resultados

obtenidos puedan conducir a interpretaciones significativas de las relaciones de interés.

La simulación con computador es por lo tanto una técnica que realiza experimentos en un computador con un modelo de un sistema dado. El modelo es el vehículo utilizado para la experimentación en sustitución del sistema real. En la mayor parte de los casos los experimentos de simulación son la manera de obtener repuestas a preguntas del tipo "¿qué pasaría sí?", preguntas cuyo objetivo suele ser evaluar el impacto de una posible alternativa que sirva de soporte a un proceso de toma de decisiones sobre un sistema, proceso que puede representarse esquemáticamente mediante el diagrama de la figura 2.9.

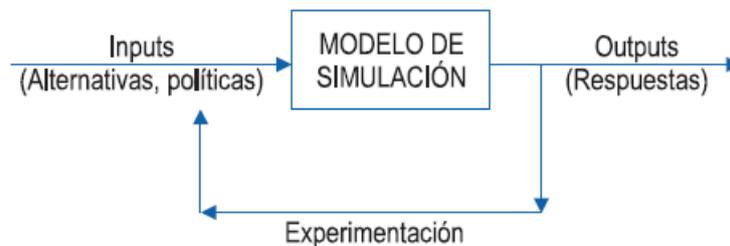


Figura 2.9. Esquema del proceso experimental de simulación.

Encontramos aquí, en la utilización de la simulación, las características de lo que se denomina **ingeniería de sistemas**, es decir una visión globalizadora que utiliza un modelo para entender, combinando elementos de análisis y diseño, por medio de experimentos, cómo un sistema existente funciona, o cómo puede funcionar un sistema planeado, y prever cómo las modificaciones del sistema pueden cambiar su comportamiento.

La simulación, y los experimentos de simulación, se convierten así en una herramienta de **análisis de sistemas**, para entender cómo opera un sistema existente, o cómo puede operar uno propuesto. La situación ideal, en la cual el investigador realizaría los experimentos sobre el sistema real es sustituida por una en la que el investigador construye un modelo del sistema y experimenta sobre él mediante la simulación, utilizando un ordenador, para investigar el comportamiento del modelo e interpretar los resultados en términos del comportamiento del sistema objeto del estudio.

La aplicación de la simulación a diferentes tipos de sistemas combinada con las diferentes clases de estudio que se pueden realizar conduce a una gran cantidad de variantes de la manera en que se puede realizar un estudio de simulación. Sin embargo hay determinados pasos básicos del proceso que pueden identificarse como los constituyentes de lo que denominaremos la metodología de un estudio de simulación, y son los siguientes:

- Definición del problema y planificación del estudio.
- Recogida de datos.
- Formulación del modelo matemático.
- Construcción y verificación del programa para computador del modelo.
- Ejecuciones de prueba del modelo.
- Validación del modelo.
- Diseño de los experimentos de simulación.
- Ejecución de los experimentos.
- Análisis de los resultados.

El proceso no es, en general, secuencial, sino iterativo, en el que algunos de los pasos pueden tener que repetirse en función de los resultados intermedios tal como muestra la figura 2.10.

Ningún estudio de simulación puede llevarse a cabo sin establecer claramente una definición precisa del problema que se pretende resolver y los objetivos del estudio. Los diseños alternativos del sistema que se han de estudiar han de quedar claramente especificados, así como los criterios para evaluar dichos diseños. Criterios que servirán de base al proceso de toma de decisiones para elegir uno de los diseños. Para la formulación del modelo debe establecerse su estructura definiendo cuáles son los aspectos del funcionamiento del sistema que son significativos para la resolución del problema que tenemos entre manos, y que datos es necesario recoger para proporcionar al modelo la información adecuada.

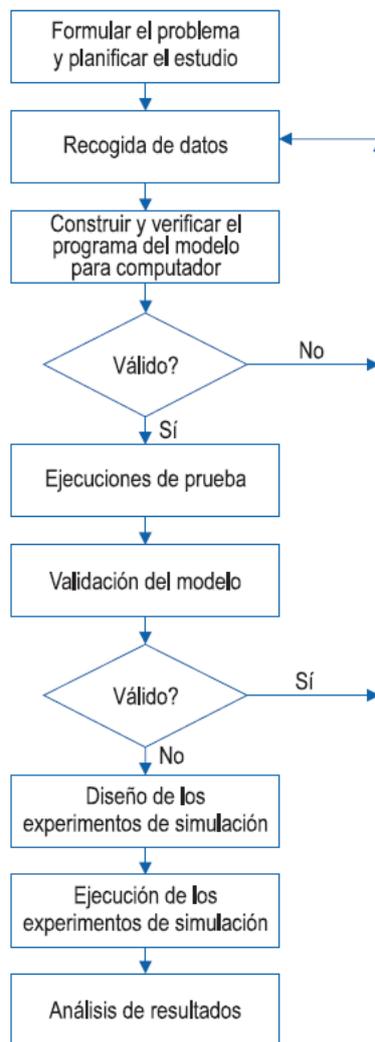


Figura 2.10. Etapas de un estudio de simulación.

La construcción del modelo de simulación es en muchos casos más un arte que una ciencia, que combina aspectos matemáticos y lógicos. En general la experiencia recomienda empezar con modelos moderadamente detallados que paulatinamente se van haciendo más sofisticados. El modelo únicamente debe contener el nivel de detalle requerido por los objetivos del estudio. Dado un modelo matemático la construcción del programa para computador es el requisito imprescindible para poder manipular numéricamente el modelo para obtener las soluciones que respondan a las preguntas que el analista se formula sobre el sistema.

La validación del modelo es uno de los pasos cruciales del proceso, suele ser uno de los más difíciles, pero es un requisito indispensable para establecer si el modelo representa o no adecuadamente el sistema objeto del estudio, de manera que se puedan garantizar las inducciones y extrapolaciones sobre el comportamiento del sistema a partir de lo observado sobre el modelo.

2.4.2 Modelos de simulación frente a soluciones analíticas.

A pesar de su utilidad la simulación no puede considerarse como una panacea capaz de resolver todo tipo de situaciones, aún contando con la ayuda de los lenguajes especializados para la simulación, o de los avances que han representado los entornos software para simulación, el desarrollo de los generadores de simuladores, o de los simuladores visuales, la realización de un estudio de simulación puede comportar un esfuerzo y un consumo de recursos no despreciable en cualquiera de las fases: definición del problema, recogida de información, construcción del modelo y programación del mismo, realización de los experimentos de simulación en computador. Especialmente en este último caso sistemas complejos pueden conducir a programas largos y complejos que requieran cantidades importantes de recursos computacionales. Estas han sido algunas de las razones por las que en ciertos dominios de aplicación la simulación ha sido considerada como un último recurso al que acudir cuando todo lo demás falla.

Sin embargo la simulación, por sus características, y por los desarrollos computacionales que se han conseguido en los últimos años, sigue presentando una serie de ventajas que no solo la convierten en el procedimiento más adecuado en muchos casos, sino que hacen que sea la única alternativa tecnológica en muchos otros.

Esto resulta especialmente obvio en aquellos casos en los que las características del sistema que se pretende estudiar hacen inviable, por razones físicas o de coste, la experimentación directa sobre el sistema. El mundo de la producción industrial, del tráfico, la aeronáutica, la industria del automóvil, etc. son claros ejemplos de esta situación, en la que, si bien es cierto que en algunos casos se puede recurrir a modelos analíticos, también lo es que tales modelos no siempre

son capaces de recoger todos los aspectos de interés del sistema, que conducirían a modelos inviables, o para los que no se dispone de herramientas adecuadas, obligando a introducir una serie de hipótesis simplificadoras que pueden resultar inadecuadas en función de los objetivos del estudio.

Incluso en aquellos casos en los que es posible la experimentación directa la simulación puede ofrecer ventajas tales como un coste inferior, tiempo, repeticiones y seguridad. Aún siendo viables los experimentos directos con el sistema físico pueden con frecuencia tener un coste muy superior al de la simulación a pesar de los esfuerzos para construir el modelo y el tiempo y recursos computacionales requeridos para la ejecución de los experimentos.

Aunque el desarrollo de un modelo adecuado y su programación para ser ejecutado en un ordenador puede requerir una cantidad de tiempo significativa, una vez construido y depurado el modelo de simulación representa una atractiva posibilidad para trabajar con las más variadas escalas de tiempo, minutos, horas, semanas, meses, años, etc., en unos pocos segundos de tiempo de computador, lo que permite comparar colecciones variadas de alternativas, a través de experimentos de simulación que siempre pueden repetirse en las más diversas condiciones, lo que no siempre es posible en los experimentos con el sistema real.

Finalmente, es frecuente que los experimentos persigan el objetivo de determinar la respuesta del sistema en condiciones extremas, lo que puede resultar peligroso o incluso ilegal en la vida real. Las aplicaciones de la simulación en aeronáutica, o en la gestión de aeropuertos constituyen buenos ejemplos de lo que queremos significar.

El dilema modelos analíticos frente a modelos de simulación debe resolverse en cada caso ateniéndose al tiempo de sistema, los objetivos del estudio, las características del modelo, los costes, etc. La cuestión clave es nuestra habilidad y capacidad para construir el modelo del sistema, si este es analítico y las hipótesis de modelización no obligan a simplificaciones que invaliden la capacidad del modelo para responder a las cuestiones de interés que nos planteamos sobre el sistema, entonces las soluciones analíticas del modelo matemático pueden ser suficientes.

Si nuestro conocimiento del sistema no nos permite formular hipótesis que conduzcan a una completa formalización del modelo en términos analíticos, o el requisito de no realizar hipótesis simplificadoras conduce a modelos matemáticos de difícil, o imposible, tratamiento matemático, entonces posiblemente la simulación será la alternativa válida, si no es la única posible.

Modelos de simulación y modelos analíticos no deben considerarse siempre como antitéticos, en muchos casos pueden jugar un papel complementario sirviendo la simulación para verificar la validez de las hipótesis para el modelo analítico, o el modelo analítico para sugerir cuales son las alternativas razonables que hay que investigar por simulación.

2.4.3 Análisis de los resultados.

En general las respuestas que buscamos mediante los experimentos servirán de soporte a una decisión racional sobre el sistema, por lo que nos interesará que las respuestas queden expresadas numéricamente, en términos de los valores de las variables de respuesta que representen las medidas de la utilidad, o del rendimiento esperado, para la alternativa que nos ocupa de diseño o de cambio del sistema.

En un estudio de simulación tanto si tenemos como objetivo la determinación de la mejor alternativa, como si el propósito es simplemente obtener una buena estimación de la variable de respuesta, o parámetro de rendimiento del sistema, es necesario poder efectuar buenas estimaciones de las variables de respuesta, así como de la estimación de cuán buenas son las estimaciones que estamos obteniendo, pues no hemos de perder de vista el carácter aleatorio de los resultados producidos por una simulación.

Los métodos a utilizar dependen de las características del sistema y en especial de si se trata de sistemas con un horizonte finito, es decir sistemas para los cuales llega un momento en que se ha alcanzado cierto objetivo, se ha realizado una tarea, se ha llegado a una condición a partir de la cual el proceso se repite, se ha completado un ciclo, etc.; o de un sistema con un horizonte infinito (y una posibilidad de entrar en un estado estacionario). Ejemplos del primer tipo de

situaciones pueden ser procesos productivos en los que el horizonte temporal de fabricación de un producto esté determinado de antemano, de gestión de inventarios con horizontes temporales dados, etc., es decir sistemas cuyo ciclo de vida es finito (lo que, dicho sea de paso, ocurre con todos los sistemas reales), pero en muchas otras situaciones no hay razones para suponer, al menos en teoría, que hay un suceso especial cuya ocurrencia determina el final de la simulación, se trata entonces de sistemas para los que el horizonte temporal puede considerarse indefinidamente largo, la cuestión entonces es si afectan o no las condiciones iniciales, es decir si el sistema tiene o no estado estacionario y si lo que nos interesa es estudiar el comportamiento del sistema en la fase transitoria o en el estado estacionario. El análisis estadístico del estado estacionario es más delicado puesto que hay que tener en cuenta aspectos tales como la correlación que presentan los resultados, o el no siempre claro de a partir de qué momento se puede considerar que el sistema ha entrado en el estado estacionario. [2]

2.5 Programación en MATLAB

MATLAB es un programa de cálculo matemático muy flexible y potente, con posibilidades gráficas para la presentación de los datos, por lo que se utiliza en muchos campos de la ciencia y la investigación como herramienta de cálculo matemático.

2.5.1 Simulink

Simulink es la interfaz gráfica de simulación de *MATLAB*. Permite el análisis y estudio de sistemas (de distintas disciplinas de la técnica) mediante la simulación de los modelos construidos en *Simulink*. La creación de estos modelos es sencilla e intuitiva, ya que se forman mediante la interconexión gráfica de distintos bloques. Dentro del editor de modelos de *Simulink* se insertan bloques, se conectan y se parametrizan para su posterior simulación.

En *Simulink* es posible crear y simular modelos mecánicos, eléctricos, electrónicos, aeronáuticos, etc. gracias a que incluye bibliotecas de fuentes de señal, dispositivos de presentación de datos, sistemas lineales y no lineales,

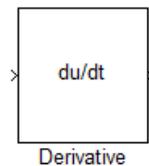
conectores y funciones matemáticas. En caso de que sea necesario, se pueden crear nuevos bloques a medida por el usuario. A continuación expondremos los componentes básicos de la biblioteca de *Simulink* y que son los más usados en el simulador que hemos empleado, para facilitar al lector la comprensión del mismo. [13].

2.5.1.1 Bloques Continuous.

Estos bloques son los que pueden ser representados como una función continua en el tiempo.

a) *Derivative.*

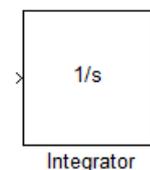
Este bloque aproxima a la derivada con respecto al tiempo de la entrada, donde du y dt son las variaciones del dato de entrada y del tiempo respectivamente con respecto a la última compilación.



b) *Integrator.*

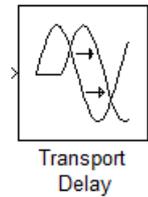
La salida del bloque se corresponde con la integral de la entrada en un intervalo de tiempo $[t_0, t]$ que hay que definir. La siguiente ecuación representa la salida del bloque en función de la entrada u y de un valor inicial y_0 .

$$y(t) = \int_{t_0}^t u(t) \cdot dt + y_0$$



c) *Transport Delay.*

Este bloque retrasa la entrada durante un tiempo especificado por el usuario. Al inicio de la simulación el bloque saca un valor inicial de salida configurado hasta que el tiempo de simulación alcanza el que se ha retrasado que es cuando comienza a sacar el valor de entrada.

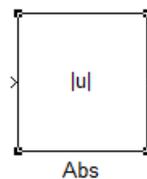


2.5.1.2 Bloques Math.

Son bloques que opera con las diferentes entradas que tiene.

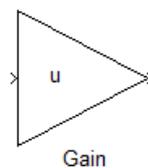
a) Abs.

Calcula el valor absoluto de su entrada.



b) Gain.

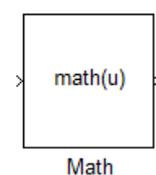
Este bloque multiplica la entrada u por un valor constante. Tanto la entrada como el multiplicador pueden ser vectores, matrices o simplemente escalares.



c) Math function.

Este bloque opera con la entrada u en función de la operación que el usuario haya seleccionado. Entre estas operaciones se pueden realizar las siguientes:

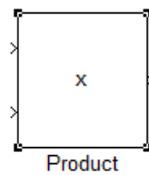
Función	Descripción	Expresión matemática
exp	Exponencial	e^u
log	Logaritmo neperiano	$\ln u$



10^u	Potencia en base 10	10^u
log10	Logaritmo en base 10	$\log u$
square	Cuadrado	u^2
sqrt	Raíz cuadrada	$u^{0.5}$
pow	Potencias	u^v
conj	Complejo	\hat{u}
reciprocal	Inversa	$1/u$

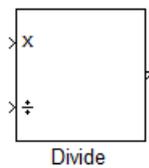
d) Product.

Calcula el producto escalar de sus entradas. Un parámetro del bloque permite regular el número de entradas.



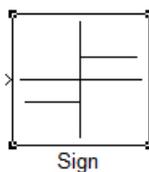
e) Divide.

Este bloque calcula la división de la entrada de arriba entre la de abajo.



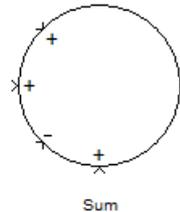
f) Sign.

Calcula el signo de la entrada. +1 indica positivo y -1 indica negativo. Un 0 indica valor nulo.



g) Sum.

Calcula la suma de todas sus entradas. Un parámetro permite indicar el número de entradas, y si estas deben invertir su signo antes de la suma. Por ejemplo, un valor para el parámetro de "++-+" indicaría que el bloque tiene 4 entradas y que la tercera de ellas debe invertir su signo.

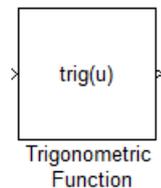


h) Trigonometric Function.

En este bloque se incluyen todas las funciones trigonométricas típicas:

Función	Descripción
sin	Seno
con	Coseno
tan	Tangente

Función	Descripción
asin	Arcoseno
acos	Arcocoseno
atan	Arcotangente

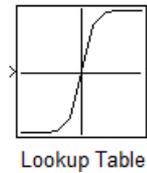


2.5.1.3 Bloques Lookup Tables.

Son tablas de consulta de los que se saca datos almacenados en memoria a partir de una o varias entradas.

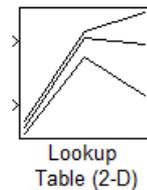
a) Lookup Table (1-D).

Realiza una interpolación lineal en una tabla de datos a partir de una entrada.



b) Lookup Table (2-D).

Realiza una interpolación lineal en una tabla de dos entradas a partir de dos datos.

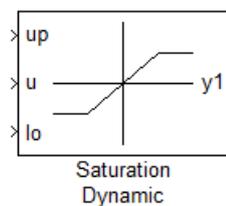


2.5.1.4 Bloques Nonlinear.

Son bloques no lineales de uso común.

a) Saturation Dynamic.

Verifica que el valor de la entrada u (segunda entrada) está entre el valor límite superior up (primera entrada) y el valor límite inferior lo (tercera entrada). Si u sobrepasa el límite superior up la salida $y1$ será dicho límite (up) y si u se queda por debajo del límite inferior lo la salida será el límite inferior (lo).



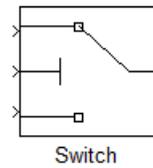
b) Switch.

En este bloque la primera y la tercera entrada son entrada de datos mientras que la segunda entrada es una entrada de control $u2$. El usuario debe seleccionar un criterio con un umbral, el cual en caso de cumplirse la salida será la primera entrada de datos, y en caso de no cumplirse pasará la tercera. Estos criterios de selección son los siguientes:

$u2 \geq$ umbral definido

$u2 >$ umbral definido

$u2 \neq$ umbral definido

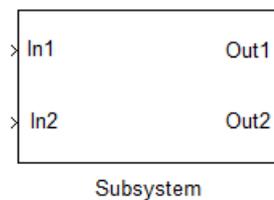


2.5.1.5 Bloques Signal & Systems

Estos bloques se encargan del manejo de sistemas y señales.

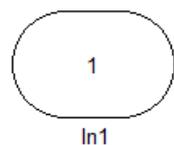
a) Subsystem.

Permite la realización de los sistemas jerárquicos. Al abrir el subsistema, nos permite incluir en su interior nuevos bloques constructivos e incluso anidar subsistemas. El bloque puede tener tantas entradas y salidas como el usuario necesite.



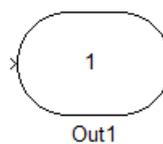
b) In1.

Por defecto un subsistema no contiene entradas. Por cada entrada que se quiera añadir al subsistema se ha de incluir uno de estos bloques.



c) Out1.

Los subsistemas tampoco traen por defecto salidas, así que por cada salida que se quiera añadir al subsistema se ha de incluir uno de estos bloques.



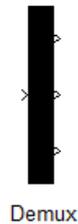
d) Mux.

Permite la inclusión de un conjunto de señales en una única línea de transmisión (que transmite datos vectoriales), lo que facilita la representación en el dibujo. Admite tanto entradas escalares como vectoriales.



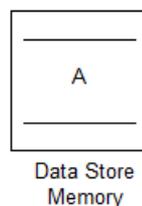
e) Demux.

Descompone una señal de entrada y en varias señales de salida. Este bloque opera en cualquiera de estos modos: vector y bus, dependiendo de cómo el usuario haya seleccionado el parámetro.



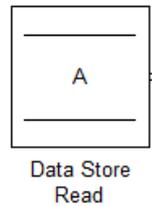
f) Data store memory.

Define una variable del entorno de trabajo que se va a usar como lugar de almacenamiento de datos útiles para evitar tener que hacer conexiones complejas que compliquen el diagrama de bloque que se está usando.



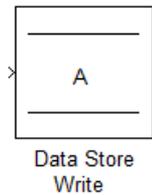
g) Data store read.

Lee el valor actual de una variable de almacenamiento, que debe estar previamente definida mediante un bloque Data store memory.



h) Data store write.

Cambia el valor actual de una variable de almacenamiento, que debe estar previamente definida mediante un bloque Data store memory.

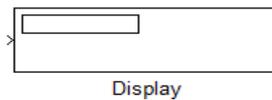


2.5.1.6 Bloques Sinks

Estos bloques hacen la función de sumideros de señales.

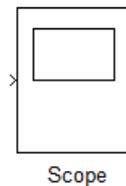
a) Display.

Representa numéricamente el valor de una variable.



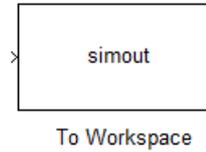
b) Scope.

Representa gráficamente la evolución en el tiempo de una variable.



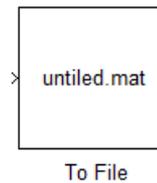
c) To Workspace.

Guarda el valor de la señal indicada en una variable del entorno de trabajo de MATLAB.



d) To File.

Guarda en un fichero de tipo ".mat" los datos de la señal de entrada al bloque.



e) Stop simulation.

Detiene la simulación si el valor de la entrada es distinto de cero.

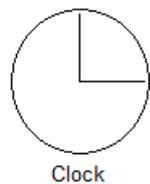


2.5.1.7 Bloques Sources.

Estos bloques son fuentes de señales.

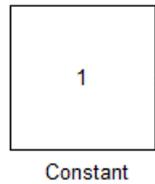
a) Clock.

Tiempo que se lleva de simulación.



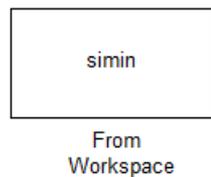
b) Constant.

Proporciona una señal de valor constante.



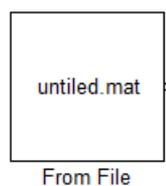
c) From Workspace.

Proporciona una secuencia de datos tomados del entorno de trabajo de MATLAB. La variable elegida debe contener una matriz indicando los valores de la señal, y los instantes en los que la señal toma estos valores.



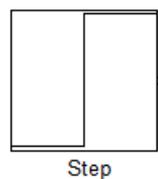
d) From File.

Proporciona datos tomados de un fichero ".mat", en el que debe estar el valor de la variable, junto a los instantes de tiempo en que se toma cada valor.



e) Step.

Este bloque proporciona un escalón entre dos niveles definidos en un tiempo especificado.



Con estos bloques aquí descritos [16], el lector podrá comprender un poco mejor los bloques y sistemas del simulador, para así entender el entorno sobre el que se ha trabajado en este proyecto. Otras de las herramientas necesarias para la realización de este proyecto son las funciones de programación de *MATLAB*. Como ya se ha dicho, *MATLAB* es una aplicación que se puede programar muy fácilmente. De todas formas, como lenguaje de programación no tiene tantas posibilidades como otros lenguajes, ya que se trata de un lenguaje de alto nivel. Comenzaremos viendo las bifurcaciones y bucles, y la lectura y escritura interactiva de variables, que son los elementos básicos de cualquier programa de cierta complejidad.

2.5.2 Lenguaje de programación Matlab

2.5.2.1 Bifurcaciones y bucles.

MATLAB es un lenguaje de programación que -como cualquier otro lenguaje- dispone de sentencias para realizar bifurcaciones y bucles. Las bifurcaciones permiten realizar una u otra operación según se cumpla o no una determinada condición (14). La Figura 2.11. muestra tres posibles formas de bifurcación.

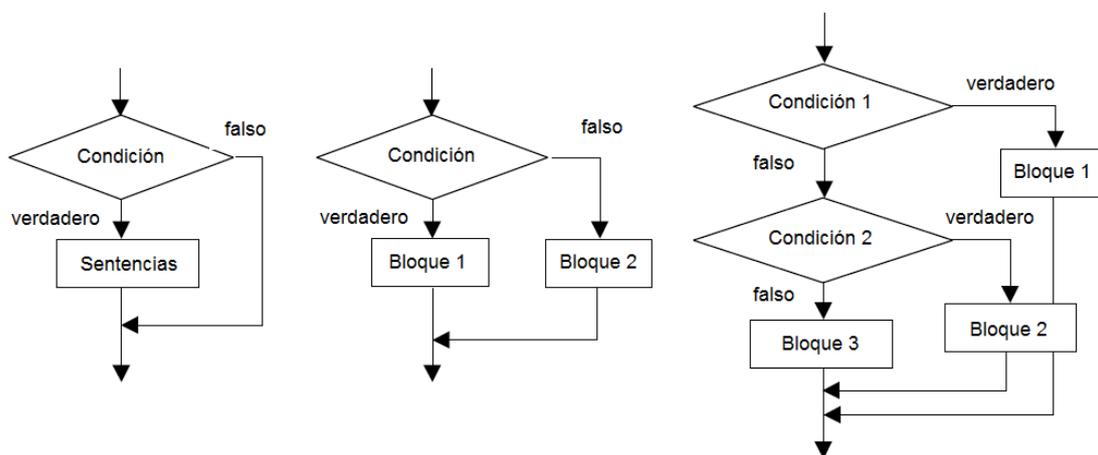


Figura 2.11. Ejemplos gráficos de bifurcaciones.

Los bucles permiten repetir las mismas o análogas operaciones sobre datos distintos. Mientras que en C/C++/Java el "cuerpo" de estas sentencias se

determinaba mediante llaves {...}, en *MATLAB* se utiliza la palabra *end* con análoga finalidad. Existen también algunas otras diferencias de sintaxis.

La figura 2.12 muestra dos posibles formas de bucle, con el control situado al principio o al final del mismo. Si el control está situado al comienzo del bucle es posible que las sentencias no se ejecuten ninguna vez, por no haberse cumplido la condición cuando se llega al bucle por primera vez. Sin embargo, si la condición está al final del bucle las sentencias se ejecutarán por lo menos una vez, aunque la condición no se cumpla. Muchos lenguajes de programación disponen de bucles con control al principio (*for* y *while* en C/C++/Java) y al final (*do ... while* en C/C++/Java). En *MATLAB* no hay bucles con control al final del bucle, es decir, no existe la construcción análoga a *do ... while*.

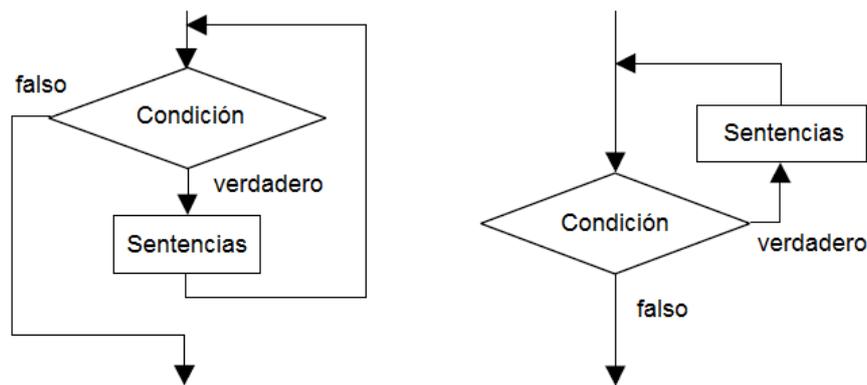


Figura 1.12. Bucles con control al principio y al final.

Las bifurcaciones y bucles no sólo son útiles en la preparación de programas o de ficheros **.m*, sino que también se aplican con frecuencia en el uso interactivo de *MATLAB*.

a) Sentencia IF.

En su forma más simple, la sentencia *if* se escribe en la forma siguiente (obsérvese que a diferencia de C/C++/Java la condición no va entre paréntesis, aunque se pueden poner si se desea)

```
if condicion
    sentencias
end
```

Existe también la bifurcación múltiple, en la que pueden concatenarse tantas condiciones como se desee, y que tiene la forma:

```
if condicion1
    bloque1
else if condicion2
    bloque2
    else if condicion3
        bloque3
    else bloque4
end
```

donde la opción por defecto **else** puede ser omitida: si no está presente no se hace nada en caso de que no se cumpla ninguna de las condiciones que se han chequeado.

Una observación muy importante: la condición del **if** puede ser una condición matricial, del tipo $A==B$, donde A y B son matrices del mismo tamaño. Para que se considere que la condición se cumple, es necesario que sean iguales dos a dos todos los elementos de las matrices A y B ($a_{ij}=b_{ij}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$). Basta que haya dos elementos a_{ij} y b_{ij} diferentes para que las matrices ya no sean iguales, y por tanto las sentencias del **if** no se ejecuten. Análogamente, una condición en la forma $A \sim = B$ exige que todos los elementos sean diferentes dos a dos ($a_{ij} \neq b_{ij}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$). Bastaría que hubiera dos elementos a_{ij} y b_{ij} iguales para que la condición no se cumpliera. En resumen:

if $A==B$ exige que todos los elementos sean iguales dos a dos.

if $A \sim = B$ exige que todos los elementos sean diferentes dos a dos.

Como se ha dicho, *MATLAB* dispone de funciones especiales para ayudar en el chequeo de condiciones matriciales. Por ejemplo, la función *isequal(A, B)* devuelve un uno si las dos matrices son idénticas y un cero en caso de que difieran en algo.

a) Sentencia SWITCH.

La sentencia **switch** realiza una función análoga a un conjunto de *if ... else if* concatenados. Su forma general es la siguiente:

```
switch switch_expression
    case case_expr1,
        bloque1
    case {case_expr2, case_expr3, case_expr4,...}
        bloque2
    ...
    otherwise, % opción por defecto
        bloque3
end
```

Al principio se evalúa la **switch_expression**, cuyo resultado debe ser un número escalar o una cadena de caracteres. Este resultado se compara con las **case_expr**, y se ejecuta el bloque de sentencias que corresponda con ese resultado. Si ninguno es igual a **switch_expression** se ejecutan las sentencias correspondientes a **otherwise**. Según puede verse en el ejemplo anterior, es posible agrupar varias condiciones dentro de unas llaves (constituyendo lo que se llama un *cell array* o vector de celdas. Basta la igualdad con cualquier elemento del cell array para que se ejecute ese bloque de sentencias. La “igualdad” debe entenderse en el sentido del operador de igualdad (==) para escalares y la función **strcmp()** para cadenas de caracteres). A diferencia de C/C++/Java13, en MATLAB sólo se ejecuta uno de los bloques relacionado con un **case**.

b) Sentencia FOR.

La sentencia **for** repite un conjunto de sentencias un número predeterminado de veces. La sentencia **for** de *MATLAB* es muy diferente y no tiene la generalidad de la sentencia **for** de C/C++/Java. La siguiente construcción ejecuta sentencias con valores de **i** de **1** a **n**, variando de uno en uno.

```
for i=1:n
    sentencias
end
```

```
o bien,  
for i=vectorValores  
    sentencias  
end
```

donde **vectorValores** es un vector con los distintos valores que tomará la variable **i**.

En el siguiente ejemplo se presenta el caso más general para la variable del bucle (*valor_inicial: incremento: valor_final*); el bucle se ejecuta por primera vez con **i=n**, y luego **i** se va reduciendo de 0.2 en 0.2 hasta que llega a ser menor que 1, en cuyo caso el bucle se termina:

```
for i=n:-0.2:1  
    sentencias  
end
```

En el siguiente ejemplo se presenta una estructura correspondiente a dos bucles anidados. La variable **j** es la que varía más rápidamente (por cada valor de **i**, **j** toma todos sus posibles valores):

```
for i=1:m  
    for j=1:n  
        sentencias  
    end  
end
```

Una última forma de interés del bucle **for** es la siguiente (**A** es una matriz):

```
for i=A  
    sentencias  
end
```

en la que la variable **i** es un vector que va tomando en cada iteración el valor de una de las columnas de **A**.

Cuando se introducen interactivamente en la línea de comandos, los bucles **for** se ejecutan sólo después de introducir la sentencia **end** que los completa.

c) Sentencia WHILE.

La estructura del bucle **while** es muy similar a la de C/C++/Java. Su sintaxis es la siguiente:

```
while condicion
    sentencias
end
```

donde *condicion* puede ser una expresión vectorial o matricial. Las sentencias se siguen ejecutando mientras haya elementos distintos de cero en *condicion*, es decir, mientras haya algún o algunos elementos verdaderos. El bucle se termina cuando todos los elementos de *condicion* son falso (es decir, cero).

d) Sentencia BREAK.

Al igual que en C/C++/Java, la sentencia **break** hace que se termine la ejecución del bucle más interno de los que comprenden a dicha sentencia.

e) Sentencia CONTINUE.

La sentencia **continue** hace que se pase inmediatamente a la siguiente iteración del bucle **for** o **while**, saltando todas las sentencias que hay entre el **continue** y el fin del bucle en la iteración actual.

2.5.2.2 Ficheros *.m

Los ficheros con extensión (*.m) son ficheros de texto sin formato (ficheros ASCII) que constituyen el centro de la programación en *MATLAB*. Estos ficheros se crean y modifican con un editor de textos cualquiera.

Existen dos tipos de ficheros *.m, los **ficheros de comandos** (llamados *scripts* en inglés) y las **funciones**. Los primeros contienen simplemente un conjunto de comandos que se ejecutan sucesivamente cuando se teclea el nombre del fichero en la línea de comandos de *MATLAB* o se incluye dicho nombre en otro fichero *.m. Un fichero de comandos puede llamar a otros ficheros de comandos. Si un fichero de comandos se llama desde de la línea de comandos de *MATLAB*, las

variables que crea pertenecen al espacio de trabajo base (**Workspace**) de *MATLAB*, y permanecen en él cuando se termina la ejecución de dicho fichero.

Las **funciones** permiten definir funciones enteramente análogas a las de *MATLAB*, con su nombre, sus argumentos y sus valores de retorno. Los ficheros ***.m** que definen funciones permiten extender las posibilidades de *MATLAB*, e hecho existen bibliotecas de ficheros ***.m** que se venden o se distribuyen gratuitamente. Las funciones definidas en ficheros ***.m** se caracterizan porque la primera línea comienza por la palabra **function**, seguida por los *valores de retorno* (entre corchetes [] y separados por comas, si hay más de uno), el signo igual (=) y el nombre de la función, seguido de los argumentos (entre paréntesis y separados por comas).

Recuérdese que un fichero ***.m** puede llamar a otros ficheros ***.m**, e incluso puede llamarse a sí mismo de forma recursiva. Los ficheros de comandos se pueden llamar también desde funciones, en cuyo caso las variables que se crean pertenecen a espacio de trabajo de la función. El espacio de trabajo de una función es independiente del espacio de trabajo base y del espacio de trabajo de las demás funciones. Esto implica por ejemplo que no puede haber colisiones entre nombres de variables: aunque varias funciones tengan una variable llamada A, en realidad se trata de variables completamente distintas (a no ser que **A** haya sido declarada como variable **global**).

A continuación se verá con un poco más de detalle ambos tipos de ficheros ***.m**.

a) Ficheros de comandos (SCRIPTS).

Los ficheros de comandos o *scripts* son ficheros con un nombre tal como *file1.m* que contienen una sucesión de comandos análoga a la que se teclearía en el uso interactivo del programa. Dichos comandos se ejecutan sucesivamente cuando se teclea el nombre del fichero que los contiene (sin la extensión).

Cuando se ejecuta desde la línea de comandos, las variables creadas por el fichero pertenecen al espacio de trabajo base de *MATLAB*

(*Workspace*). Por el contrario, si se ejecuta desde una función, las variables que crea pertenecen al espacio de trabajo de la función.

Definición de funciones.

La primera línea de un fichero llamado name.m que define una función tiene la forma:

```
function [lista de valores de retorno] = name(lista de argumentos)
```

donde **name** es el nombre de la función. Entre corchetes y separados por comas van los **valores de retorno** (siempre que haya más de uno), y entre paréntesis también separados por comas los **argumentos**. Puede haber funciones sin valor de retorno y también sin argumentos. Recuérdese que los argumentos son los datos de la función y los valores de retorno sus resultados. Si no hay valores de retorno se omiten los corchetes y el signo igual (=); si sólo hay un valor de retorno no hace falta poner corchetes. Tampoco hace falta poner paréntesis si no hay argumentos.

Una diferencia importante con C/C++/Java es que en *MATLAB* una función no modifica nunca los argumentos que recibe. Los resultados de una función de *MATLAB* se obtienen siempre a través de los valores de retorno, que pueden ser múltiples y matriciales. Tanto el número de argumentos como el de valores de retorno no tienen que ser fijos, dependiendo de cómo el usuario llama a la función.

Las variables definidas dentro de una función son **variables locales**, en el sentido de que son inaccesibles desde otras partes del programa y en el de que no interfieren con variables del mismo nombre definidas en otras funciones o partes del programa. Se puede decir que pertenecen al propio espacio de trabajo de la función y no son vistas desde otros espacios de trabajo. Para que la función tenga acceso a variables que no han sido pasadas como argumentos es necesario declarar dichas variables como **variables globales**, tanto en el programa principal como en las distintas funciones que deben acceder a su valor. Es frecuente

utilizar el convenio de usar para las variables globales nombres largos (más de 5 letras) y con mayúsculas.

Por razones de eficiencia, los argumentos que recibe una función de *MATLAB* no se copian a variables locales si no son modificados por dicha función (en términos de C/C++ se diría que se pasan por referencia). Esto tiene importantes consecuencias en términos de eficiencia y ahorro de tiempo de cálculo. Sin embargo, si dentro de la función se realizan modificaciones sobre los argumentos recibidos, antes se sacan copias de dichos argumentos a variables locales y se modifican las copias (diríase que en este caso los argumentos se pasan por valor).

Dentro de la función, los valores de retorno deben ser calculados en algún momento (no hay sentencia ***return***, como en C/C++/Java). De todas formas, no hace falta calcular siempre todos los posibles valores de retorno de la función, sino sólo los que el usuario espera obtener en la sentencia de llamada a la función. En cualquier función existen dos variables definidas de modo automático, llamadas ***nargin*** y ***nargout***, que representan respectivamente el número de argumentos y el número de valores de retorno con los que la función ha sido llamada. Dentro de la función, estas variables pueden ser utilizadas como el programador desee.

La ejecución de una función termina cuando se llega a su última sentencia ejecutable. Si se quiere forzar el que una función termine de ejecutarse se puede utilizar la sentencia ***return***, que devuelve inmediatamente el control al entorno de llamada.

b) Sentencia RETURN.

De ordinario las funciones devuelven el control después de que se ejecute la última de sus sentencias. La sentencia ***return***, incluida dentro del código de una función, hace que se devuelva inmediatamente el control al programa que realizó la llamada.

c) **Sub - funciones.**

*Tradicionalmente MATLAB obligaba a crear un fichero *.m diferente por cada función. El nombre de la función debía coincidir con el nombre del fichero. Las sub-funciones son funciones adicionales definidas en un mismo fichero *.m, con nombres diferentes del nombre del fichero (y del nombre de la función principal) y que las sub-funciones sólo pueden ser llamadas por las funciones contenidas en ese fichero, resultando “invisibles” para otras funciones externas.*

A continuación se muestra un ejemplo contenido en un fichero llamado mi_fun.m:

```
function y=mi_fun(a,b)
    y=subfun1(a,b);

function x=subfun1(y,z)
    x=subfun2(y,z);

function x=subfun2(y,z)
    x=y+z+2;
```

2.5.2.3 Referencias de función.

Téngase en cuenta que *MATLAB*, al igual que otros lenguajes de programación como C/C++ y Java, admite **funciones sobrecargadas** (*overloaded functions*), esto es, funciones diferentes que tienen el mismo nombre pero se diferencian entre sí por el número y tipo de los argumentos. Cuando un programa llama a una función sobrecargada, *MATLAB* analiza los tipos de los argumentos incluidos en la llamada y llama a la función que mejor se adapta a esos tipos de argumentos. Las referencias de función permiten al programador un mayor control sobre la función que es efectivamente llamada y tienen algunas otras ventajas que se verán en este apartado y en sus sub-apartados.

El principal uso de las referencias de función (como de los nombres de función en versiones anteriores) es el pasar a una función el nombre de otra función, junto con sus argumentos, para que la pueda ejecutar. A estas funciones que ejecutan otras funciones que se les pasan como argumentos se les llama *funciones de función*.

a) **Creación de referencias de función.**

- Mediante el operador **@**. La referencia a la función se crea precediendo el nombre de la función por el operador **@**. El resultado puede asignarse a una variable o pasarse como argumento a una función. Ejemplos:

```
fh = @sin;  
area = quad(@sin, 0, pi);
```

- Mediante la función **str2func**. La función **str2func** recibe como argumento una cadena de caracteres conteniendo el nombre de una función y devuelve como valor de retorno la referencia de función.

Ejemplos:

```
fh = str2func('sin');  
str2func({'sin', 'cos', 'tan'})  
ans = @sin @cos @tan
```

2.5.3 **Gráficas en MATLAB.**

2.5.3.1 **Gráficos bidimensionales.**

MATLAB dispone de cuatro funciones básicas para crear gráficos 2-D. Estas funciones se diferencian principalmente por el *tipo de escala* que utilizan en los ejes de abscisas y de ordenadas [M2]. Estas cuatro funciones son las siguientes:

- **plot()** crea un gráfico a partir de vectores y/o columnas de matrices, con escalas lineales sobre ambos ejes.
- **loglog()** ídem con escala logarítmica en ambos ejes.
- **semilogx()** ídem con escala lineal en el eje de ordenadas y logarítmica en el eje de abscisas.
- **semilogy()** ídem con escala lineal en el eje de abscisas y logarítmica en el eje de ordenadas.

a) **Función PLOT.**

Esta es la función clave de todos los gráficos 2-D en *MATLAB*. Ya se ha dicho que el elemento básico de los gráficos bidimensionales es el vector. Se utilizan también cadenas de 1, 2 ó 3 caracteres para indicar *colores* y *tipos de línea*. La función *plot()*, en sus diversas variantes, no hace otra cosa que dibujar vectores. El resultado de este comando es que se abre una ventana mostrando el gráfico. Cuando a la función *plot()* se le pasa un único vector –real– como argumento, dicha función dibuja en ordenadas el valor de los *n* elementos del vector frente a los índices 1, 2, ... *n* del mismo en abscisas.

Una segunda forma de utilizar la función *plot()* es con dos vectores como argumentos. En este caso los elementos del segundo vector se representan en ordenadas frente a los valores del primero, que se representan en abscisas.

b) Función *FIGURE*.

Si se llama a la función *figure* sin argumentos, se crea una nueva ventana gráfica con el número consecutivo que le corresponda. El valor de retorno es dicho número.

Por otra parte, el comando *figure(n)* hace que la ventana *n* pase a ser la ventana o figura activa. Si dicha ventana no existe, se crea una nueva ventana con el número consecutivo que le corresponda (que se puede obtener como valor de retorno del comando). La función *close* cierra la figura activa, mientras que *close(n)* cierra la ventana o figura número *n*.

El comando *clf* elimina el contenido de la figura activa, es decir, la deja abierta pero vacía. La función *gcf* devuelve el número de la figura activa en ese momento.

c) Función *FPLOTT*.

La función *fplot* admite como argumento un nombre de función o un nombre de fichero **.m* en el cual esté definida una función de usuario. La función puede ser escalar (un único resultado por cada valor de *x*) o vectorial. La forma general de esta función es la siguiente:

```
fplot('funcion', limites, 'cadena', tol)
```

donde **'funcion'** representa el nombre de la función o del fichero ***.m** entre apóstrofes (pasado como cadena de caracteres), **limites** es un vector de 2 ó 4 elementos, cuyos valores son $[x_{min}, x_{max}]$ o $[x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}]$, **'cadena'** tiene el mismo significado que en **plot** y permite controlar el color, los markers y el tipo de línea, **'tol'** es la tolerancia de error relativo. El valor por defecto es $2e-03$.

2.5.3.2 Gráficos tridimensionales.

MATLAB tiene posibilidades de realizar varios tipos de gráficos 3D. La primera forma de gráfico 3D es la función **plot3**, que es el análogo tridimensional de la función **plot**. Esta función dibuja puntos cuyas coordenadas están contenidas en 3 vectores, bien uniéndolos mediante una línea continua (defecto), bien mediante markers.

a) Funcion PLOT3.

La función *plot3* es análoga a su homóloga bidimensional *plot*. Su forma más sencilla es la siguiente:

```
plot3(x, y, z)
```

que dibuja una línea que une los puntos $(x(1), y(1), z(1))$, $(x(2), y(2), z(2))$, etc. y la proyecta sobre un plano para poderla representar en la pantalla.

b) Funciones MESHGRID, MESH y SURF para mallados.

Se definen las variables *x* e *y* como dos vectores que contienen las coordenadas en una y otra dirección de la retícula (*grid*) sobre la que se va a dibujar la función. Después hay que crear dos matrices *X* (cuyas filas son copias de *x*) e *Y* (cuyas columnas son copias de *y*), y estas matrices son las que se crean con la función **meshgrid**. Representan respectivamente las coordenadas *x* e *y* de todos los puntos de la retícula. La matriz de valores *Z* se calcula a partir de las matrices de coordenadas *X* e *Y*. Finalmente hay que dibujar esta matriz *Z* con la función **mesh**, cuyos elementos son función elemento a elemento de los elementos de

X e Y. Para que además aparezca la superficie facetada se utiliza la función **surf**. Véase como ejemplo el dibujo de la función **sen(r)/r** (siendo $r = \sqrt{x^2+y^2}$):

```
close all
u=-8:0.5:8; v=u;
[U,V]=meshgrid(u,v);
R=sqrt(U.^2+V.^2)+eps;
W=sin(R)./R;
mesh(W)
surf(W)
```

Ejecutando estos comandos en *MATLAB* se obtendría la siguiente Figura 2.13:

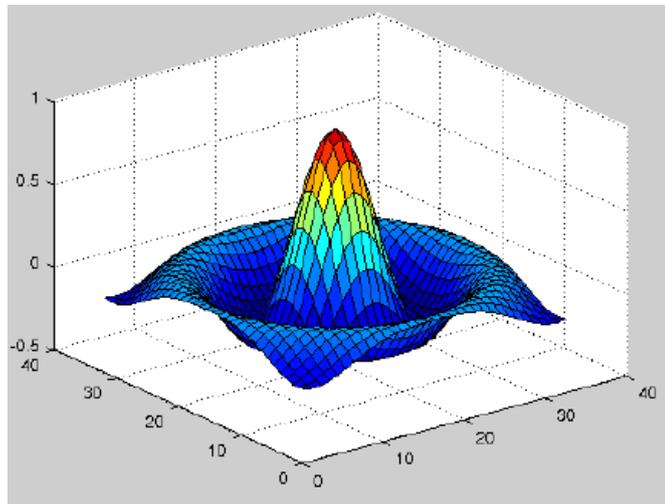


Figura 2.13. Función $\text{sen}(r)/r$ representada en 3D con *MATLAB*.

Se habrá podido comprobar que la función **mesh** dibuja en perspectiva una función en base a una retícula de líneas de colores, rodeando cuadriláteros del color de fondo, con eliminación de líneas ocultas.

2.5.4 Funciones de optimización

2.5.4.1 Función *PatternSearch*

La función *PatternSearch* [16] encuentra el mínimo de una función usando un patrón de búsqueda. Su sintaxis es la siguiente:

```
[x,fval] = patternsearch(fun,x0, ...)
```

```
[x,fval,exitflag] = patternsearch(fun,x0, ...)
```

- `[x, fval] = patternsearch(fun,x0, ...)`. Devuelve el valor de la función en la solución `x`.
- `[x, fval, exitflag] = patternsearch(fun,x0, ...)`. Devuelve `exitflag` que describe la condición de salida de `patternsearch` los posibles valores que se corresponden con esta función son:

1	Sin restricciones no lineales.
2	El cambio en <code>x</code> y el tamaño de la malla son menores que la tolerancia especificada
3	El cambio en <code>fval</code> y el tamaño de la malla son menores que la tolerancia especificada
4	La magnitud de paso es menor que la precisión de la máquina
0	Se ha alcanzado el número máximo de iteraciones o evaluaciones de la función
-1	Optimización acabada por la salida o gráfica
-2	No existe ningún punto factible a encontrar

2.5.4.2 Función *Griddata*

La función `Griddata` [16] interpola datos dispersos. La sintaxis es la siguiente:

`vq = griddata(x,y,v,xq,yq)`. Interpola la superficie en los puntos especificados por la consulta `(xq,yq)` y devuelve los valores interpolados `vq`. La superficie siempre pasa a través de los puntos de datos definidos por `x` e `y`.

3. Materiales y métodos

Donde se incluye una exposición detallada del vehículo y del simulador empleado, así como de los procedimientos utilizados para la realización del trabajo.

3.1 Estructura de los materiales y métodos

De igual forma que se realizó en la estructura bibliográfica, de nuevo es importante dar una visión general de la forma de proceder y los principios que nos rigen en esta parte del proyecto.

Para la redacción de esta parte del trabajo la hemos dividido en dos grandes bloques:

En el primero de los bloques se describe con detalle las características tanto del vehículo que hemos empleado como del simulador que hemos utilizado para la realización de nuestro trabajo. En primer lugar, para conocer con detalle el vehículo describiremos sus especificaciones generales y las máquinas que lo componen, junto con las características técnicas de cada una de ellas. En segundo lugar expondremos el entorno de trabajo sobre el que hemos desarrollado la estrategia de control para el vehículo, es decir, el simulador que hemos empleado. Para ello, exponemos y explicamos los esquemas de los bloques donde están implementadas las máquinas del vehículo descritas antes y el bloque sobre el que se ha desarrollado la estrategia de control, dejando en un segundo plano bloques que no se consideran de vital importancia para la comprensión del trabajo aquí desarrollado. Este bloque se corresponde con la sección 3.2. *Materiales*.

En el segundo de los bloques expondremos con detalle todo el proceso llevado a cabo para la elaboración completa de la estrategia de control de nuestro vehículo, describiendo todos los bloques que lo componen. Además proponemos otro tipo de vehículos que han sido desarrollados utilizando las mismas máquinas empleadas por el Chevrolet Volt.

3.2 Materiales

3.2.1 Descripción del vehículo

La dinámica del vehículo implementado en el simulador proporcionado corresponde a la arquitectura mecánica del sistema *Voltec* que *General Motors* utiliza para el *Chevrolet Volt*. (Figura 3.1). El *Chevrolet Volt* es un vehículo eléctrico

híbrido de rango extendido y enchufable. Su principal característica es que está diseñado para ser un híbrido capaz de viajar largas distancias con una propulsión únicamente eléctrica, a diferencia de los híbridos normales cuya autonomía en modo eléctrico es considerablemente más baja que la del *Chevrolet*.



Figura 3.1. *Chevrolet Volt*.

3.2.1.1 Características generales

Estas son las características más generales del *Chevrolet Volt*:

Tipo de vehículo	5 puertas o 2 delanteras y portón trasero
Categoría	Vehículo híbrido eléctrico de rango extendido y enchufable
Asientos	4
Peso [kg]	1812
Longitud total [mm]	4498
Dist. entre ejes [mm]	2685
Ancho [mm]	1798
Altura [mm]	1430
Volumen de maletero [L]	301
Batería	Ion-Litio con cátodo de espinela de manganeso. Módulo en forma de T con control térmico integrado.
Energía total nominal	16 kwh (57,6 MJ)
Energía utilizable total [%]	70
Tiempo de recarga	<4h @ 230V / 16A
Tanque de fuel [L]	35,2 (1224 MJ)
Potencia [kw]	111
Par máximo [Nm]	353
Velocidad máxima [km/h]	161

a) Sistema de Transmisión

El sistema de transmisión que utiliza *Chevrolet* en el *Volt* es el sistema **Voltec** que consiste en un conjunto de engranajes planetarios al que están conectadas 3 máquinas: un motor eléctrico (MOT), un generador eléctrico (GEN) y un motor térmico de combustión interna (ENG). Las dos máquinas eléctricas (MOT Y GEN) están conectadas a una batería (BAT) y ambas pueden realizar tanto tareas de propulsión como de generación de energía eléctrica para recargar la batería.

El sistema tiene tres embragues (c1, c2 y c3) que acoplan las máquinas al conjunto de engranajes planetarios como se muestra en la Figura 3.2.

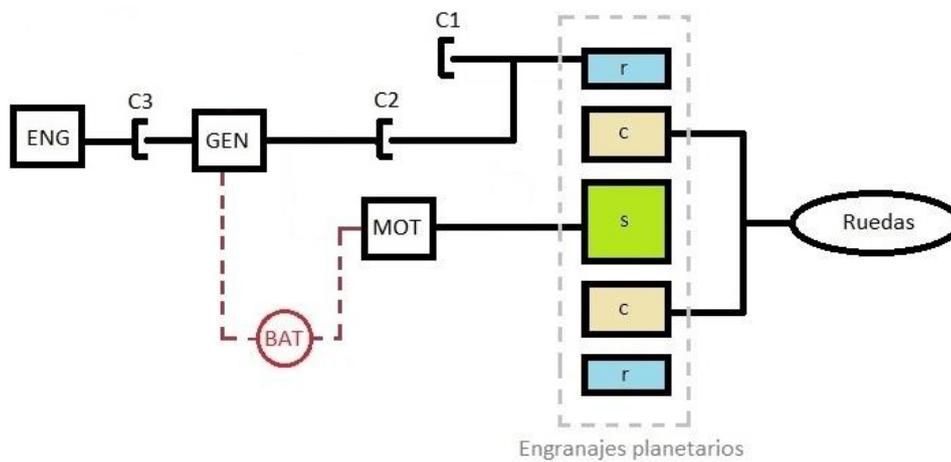


Figura 3.2. Esquema del sistema *Voltec* incorporado en el *Chevrolet Volt*.

El motor eléctrico (MOT) está conectado al sol [s] del conjunto de engranajes, el sistema (ENG-GEN) a la corona [r] a través de los embragues C1 y C2, y el motor de combustión interna (ENG) se une al eje del generador a través del embrague C3. Por otro lado, el carrier (c) procedente de las ruedas se encuentra enganchado a los engranajes satélites del sistema planetario.

Esto se traduce en un conjunto de relaciones que cumple el conjunto de engranajes planetario:

El par en el sol corresponde al par que genera el motor:

$$T_s = T_{mot} \tag{11}$$

El par en la corona corresponde a la suma:

$$T_r = T_{gen} + T_{eng} \quad (12)$$

La relación cinemática entre las velocidades de los tres componentes del conjunto planetario (sol, corona y carrier) es:

$$\rho \cdot \omega_r + \omega_s = (\rho + 1) \cdot \omega_c \quad (13)$$

siendo ω_r , ω_s y ω_c las velocidades angulares de la corona (r), sol (s) y carrier (c) respectivamente y ρ es la relación entre el número de dientes de la corona (r) y del sol (s):

$$\rho = \frac{Nr}{Ns} = \frac{83}{37} = 2,24 \quad (14)$$

La relación de par impuesta por el conjunto de engranajes planetarios es la siguiente:

$$\frac{T_r}{\rho} = \frac{T_c}{(1 + \rho)} = T_s \quad (15)$$

Y por último la relación de par entre el carrier (c) y las ruedas (ω_h) es $R_d = 2,16$ lo que se traduce en que:

$$T_{wh} = R_d \cdot T_c \quad (16)$$

En base a la posición de los embragues en cada momento (bloqueados o abiertos) el vehículo funcionará en un modo u otro. Hay hasta cuatro modos de funcionamiento posibles, que se describen a continuación:

Modo 1: [C1 bloqueado; C2 abierto, C3 abierto; ENG off].

En este modo se activa el embrague C1 que bloquea a la corona y es el motor eléctrico (MOT) el que únicamente propulsa al vehículo. El par que se demande será proporcionado en todo momento por el motor eléctrico que está alimentado por la batería. La relación de par entre el sol (s) del conjunto planetario y el par necesario en las ruedas es la siguiente:

$$T_s = \frac{T_{wh}}{R_d \cdot (\rho + 1)} \quad (17)$$

Modo 2: [C1 abierto; C2 bloqueado, C3 abierto; ENG off].

En este modo, el embrague C1 se encuentra abierto desbloqueando a la corona y permitiéndole al sistema un grado más de libertad (2 en total). Al estar C2 bloqueado, la potencia que desarrolle el generador es transmitida a la caja de engranajes planetarios, con lo cual, tanto el generador como el motor eléctrico proporcionan potencia para impulsar al vehículo, siendo la batería la que suministra la energía eléctrica a las dos máquinas. Con este modo se consigue reducir la velocidad del motor eléctrico cuando el vehículo se mueve a velocidades altas, para así combinar mejor la eficiencia del motor eléctrico con la del generador, ya que se consigue que el motor eléctrico trabaje en una región más óptima. Como las dos máquinas son eléctricas y cogen la energía de la batería, la potencia que ésta suministra es la suma de la potencia eléctrica que consume el motor eléctrico más la que consume el generador:

$$P_{tot.bat} = \frac{P_r}{\eta_r(\omega_r)} + \frac{P_s}{\eta_s(\omega_s)} \quad (18)$$

siendo $\eta_s(\omega_s)$ y $\eta_r(\omega_r)$ los rendimientos del motor eléctrico y del generador en función de sus velocidades ω_s y ω_r .

Como cada máquina aprovecha de forma distinta la potencia eléctrica que se le suministra, (debido a que las velocidades de cada máquina son distintas y sus curvas de rendimiento en función de la velocidad son diferentes) habrá que desarrollar una optimización para que el conjunto sea lo más eficiente posible. Esta optimización está desarrollada en el apartado 3.3.1.2. *Bloque de optimización*.

Modo 3. [C1 bloqueado; C2 abierto; C3 bloqueado; ENG on].

Este modo pertenece al tradicional híbrido montado en serie (ver sección XX). El motor de combustión interna (ENG) está conectado a través del embrague C3 al generador, pero el embrague C2 en este modo se encuentra abierto, el sistema (ENG - GEN) no se encuentra acoplado al conjunto planetario con lo que su función es solo la de recargar la batería, dejando al motor eléctrico con las tareas

de propulsar al vehículo. Al no estar el sistema (ENG - GEN) conectado al conjunto planetario puede funcionar a una velocidad angular totalmente independiente de la velocidad y par de las ruedas (la del vehículo), lo que permite que las dos máquinas encargadas de la generación de electricidad puedan operar en la región de máxima eficiencia. Ambas velocidades, tanto la del generador (GEN) como la del motor de combustión interna serán la misma. La potencia eléctrica producida por el generador es:

$$P_{carga} = \eta_{gen}(\omega_r) \cdot \frac{T_r \cdot \omega_r}{\eta_{eng}(\omega_r)} \quad (19)$$

donde $\eta_{gen}(\omega_r)$ y $\eta_{eng}(\omega_r)$ son las eficiencias con las que trabajan el generador y el motor térmico para una velocidad de funcionamiento ω_r .

Modo 4. [C1 abierto; C2 bloqueado; C3 bloqueado; ENG on].

En este modo, los embragues C2 y C3 están bloqueados y la corona desbloqueada (C1 abierto), por lo tanto, con esta disposición el motor térmico mueve al generador y éste genera potencia eléctrica para recargar la batería a la vez que realiza labores de impulsión. Por lo tanto, al igual que en el modo 2 habrá que desarrollar una optimización para que el sistema (MOT - GEN - ENG) encargado funcione de la forma más eficiente posible.

3.2.1.2 Características de las máquinas

A continuación se describen las características técnicas de las tres máquinas que están conectadas a la transmisión y de la batería.

a) Motor eléctrico

El motor eléctrico (MOT) es la principal máquina encargada de la impulsión del vehículo. El motor tiene una potencia de 150 CV y es capaz de desarrollar un par máximo de 370 N·m. La Figura 3.3. muestra su mapa de eficiencia en función de la velocidad del vehículo que sería cuando el vehículo circula impulsado solamente por el motor eléctrico (modo 1 y 3).

Como se observa, a partir de los 80 km/h a medida que el vehículo va aumentando su velocidad la eficiencia del motor va disminuyendo.

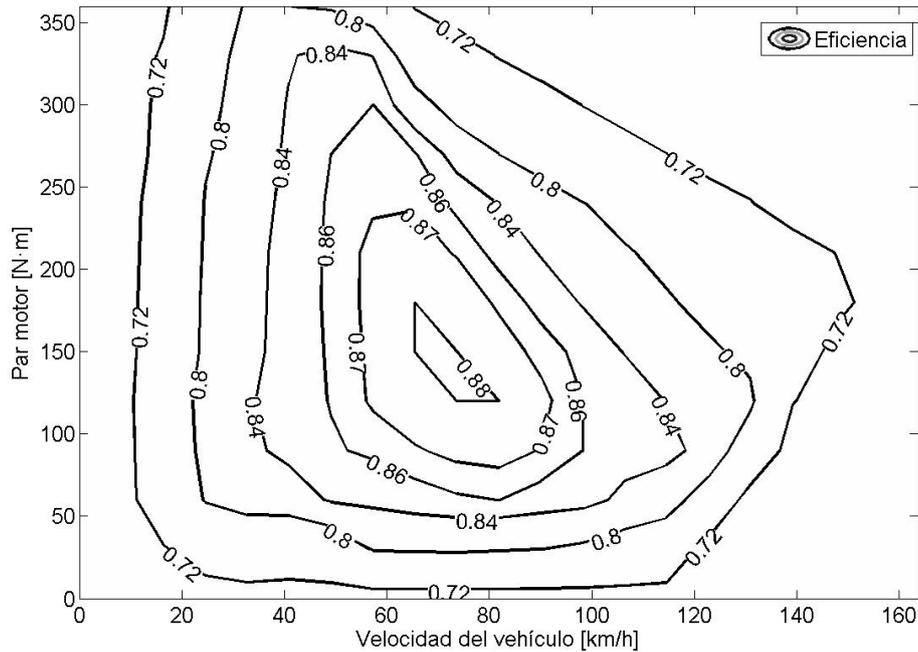


Figura 3.3. Eficiencia del motor eléctrico en los modos 1 y 3.

Por otro lado, el motor eléctrico además de impulsar al vehículo puede aprovechar la energía cinética de las frenadas para generar electricidad que almacena en la batería, que es lo que se denomina frenada regenerativa. La Figura 3.4 muestra el mapa de eficiencia con la que genera esa electricidad. El convenio de signos utilizado es que el par será positivo cuando la máquina eléctrica realice tareas de impulsión y negativo cuando genere electricidad.

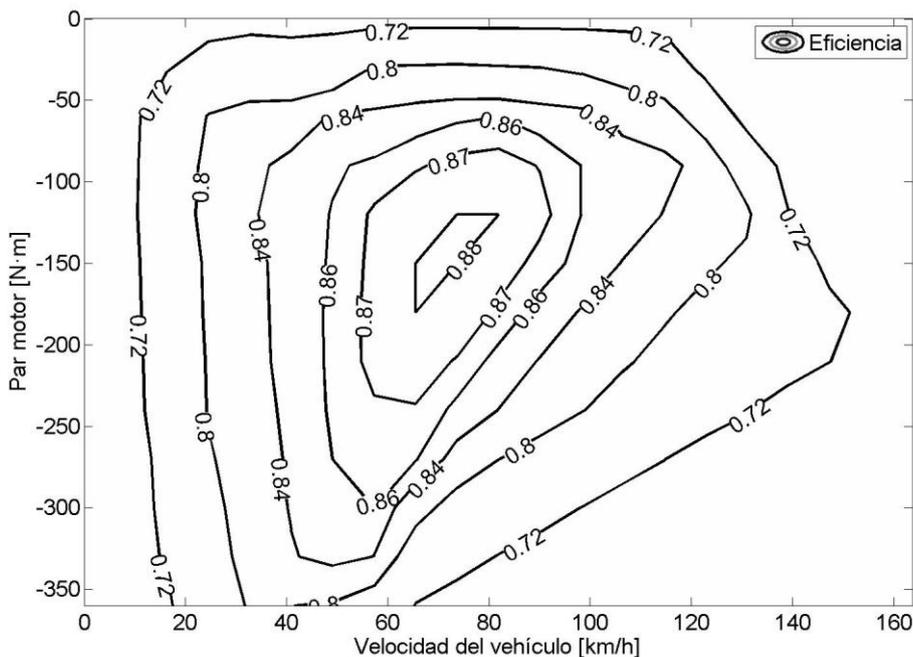


Figura 3.4. Mapa de eficiencia del motor eléctrico para la generación de electricidad.

b) El generador eléctrico

El generador eléctrico incorporado en el sistema **Voltec** utilizado tiene una potencia de 70 CV. Como el generador realiza tareas de impulsión junto con el motor eléctrico y también tareas de recarga de la batería hay que considerar 2 eficiencias según sea el signo del par en su eje. La Figura 3.5 muestra el mapa de eficiencia del generador en función de su velocidad angular de funcionamiento para tareas de generación de electricidad.

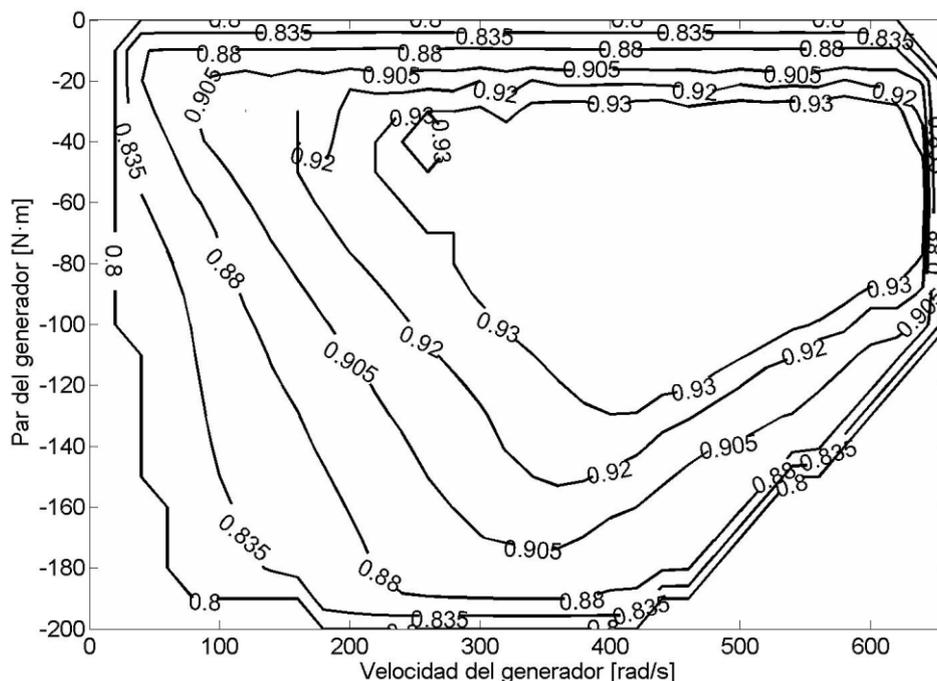


Figura 3.5. Mapa de eficiencia del generador para tareas de recarga de la batería.

La Figura 3.6 muestra el mapa de eficiencia del generador cuando emplea su potencia para impulsar al vehículo, esto es, cuando el embrague C2 está bloqueado y el generador envía el par al conjunto de engranajes planetarios a través de un inversor. Hay que señalar que el generador en ningún momento impulsará el vehículo de manera solitaria, sino que lo hará siempre junto con el motor eléctrico.

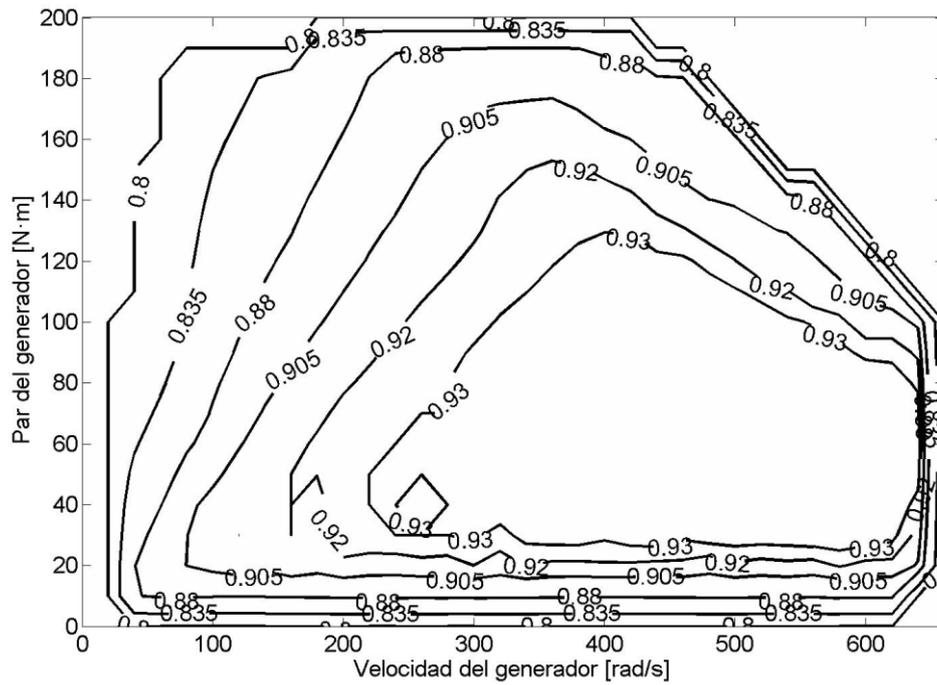


Figura 3.6. Mapa de eficiencia del generador para tareas de impulsión.

c) Motor térmico

El motor térmico (ENG) es un motor de gasolina de 1398 cc, y su potencia es de 86 CV. Es capaz de desarrollar un par máximo de 130 N·m a 4250 rpm.

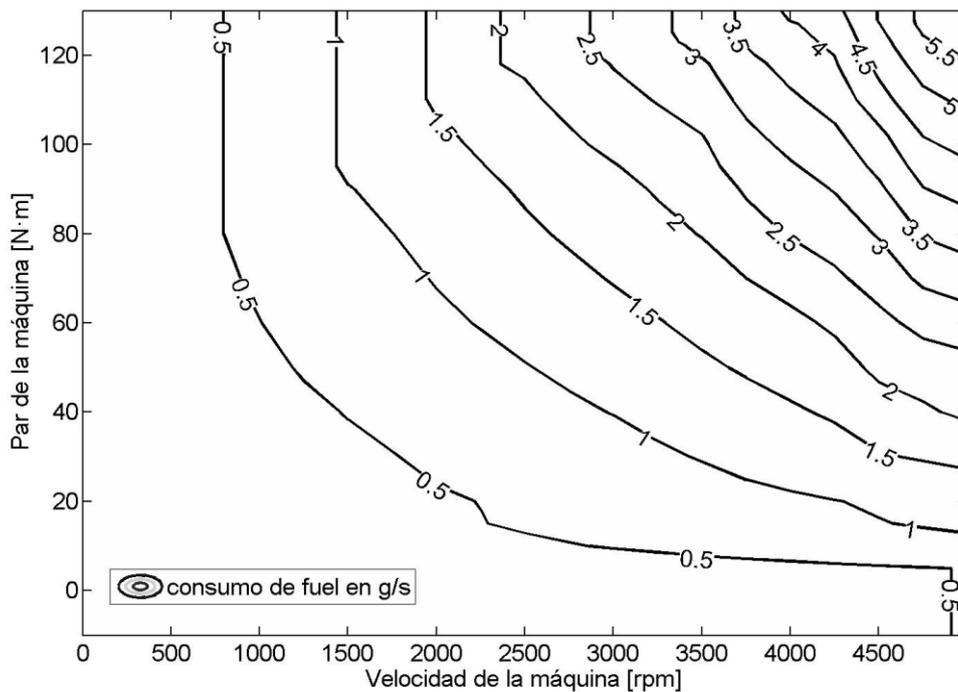


Figura 3.7. Mapa de consumo del motor térmico.

Debido a que básicamente su función es la de extender la autonomía del vehículo proporcionando la energía para recargar la batería, siempre funcionará en una región lo más óptima posible para él y para el conjunto del sistema *Voltec*. La figura 3.7 muestra el consumo de gasolina en g/kwh en función de su velocidad angular en rpm.

d) La batería

La batería del *Chevrolet Volt* es de Ion-Litio con cátodo de espinela de manganeso. Está compuesta por tres módulos en paralelo con 96 células cada uno, montada en forma de T. Mide 168 cm de longitud y pesa 198 kg. Tiene un circuito de refrigeración por líquido que las mantiene dentro de un rango de temperaturas para mejorar sus prestaciones y duración. Según *Chevrolet* este rango de temperaturas va desde -25° C hasta 50 °C.

La batería tiene un voltaje 360 voltios y un pico de corriente de 400 amperios, con una capacidad de 16 Kwh y acumulando un total de 37,44 MJ de energía. De ese total se utiliza un 70% y se deja el otro 30% restante siempre cargado para no acortar la duración de la batería debido a descargas completas. Será este 70% de la batería el que se gestionará mediante la estrategia de control, es decir, la parte de la batería que consumirá el vehículo y la que recargará mediante el uso del conjunto motor térmico - generador (ENG-GEN). La carga mínima es del 25% y la máxima de 95%.

Un factor que limita la entrega y recepción de potencia y muy a tener en cuenta es la potencia de saturación de la batería que se establece en 110 Kw para la descarga y 60 Kw para la recarga.

Estas características de las máquinas del vehículo junto con el conjunto del sistema *Voltec*, es el que está implementado en el simulador, descrito en el siguiente capítulo, y con la que se trabaja para conseguir diseñar la estrategia de control.

3.2.2 El Simulador

El simulador del *Chevrolet Volt* sobre el que hemos diseñado la estrategia de control ha sido desarrollado por un equipo de ingenieros compuesto por *Antonio Sciarretta [8]*, *Lorenzo Serrao* y *Tona Paolino*, a partir de los datos proporcionados por *General Motors*. [4, 5, 6, 7].

A continuación describiremos en qué consiste el simulador y los tres grandes bloques de que está compuesto: El *ciclo de conducción*, el bloque de la *estrategia de control* y el bloque de la *dinámica del vehículo*. Expondremos de que se trata el primer bloque junto con los ciclos de conducción empleados para la simulación y las variables que se manejan en el bloque de la estrategia de control. Por último profundizaremos en el bloque de la dinámica del vehículo y veremos los bloques que implementan las máquinas descritas en la sección anterior.

La figura 3.8. muestra un esquema general del simulador que se ha empleado en este trabajo:

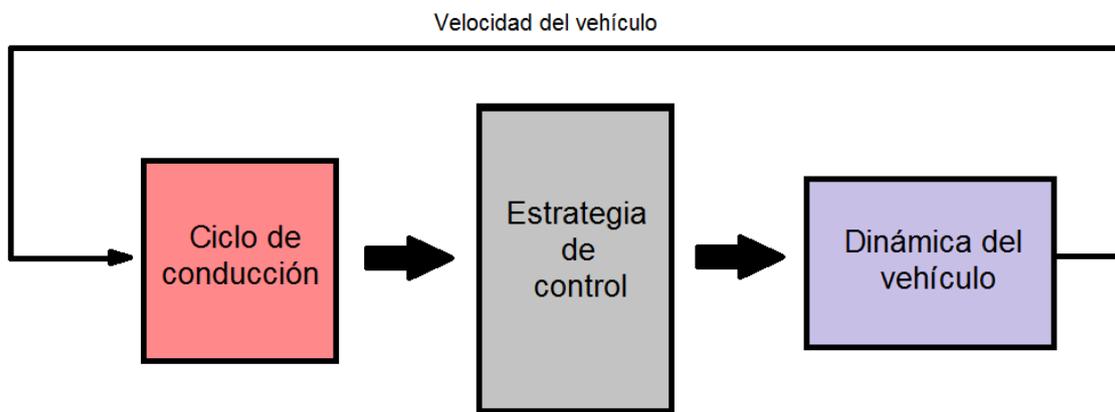


Figura 3.8. Esquema de funcionamiento del simulador

3.2.2.1 Ciclos de conducción (*Driving cycle*).

En este bloque están implementados los tres test que emplearemos para la simulación de la estrategia de control, tanto el *ciclo económico* como los dos tests de aceleración. Como se observa Figura 3.8 en el bloque entra la velocidad del vehículo (V_{veh}) y genera la demanda de par en las ruedas deseado (T_{whdes}), el par de frenada ($T_{regenlim}$), la distancia recorrida (D_{tot}) y la velocidad media del vehículo

hasta el momento (v_{vehmed}), que van al bloque de la estrategia de control y que son los datos que utilizamos en los que nos basamos para el diseño de la estrategia de control.

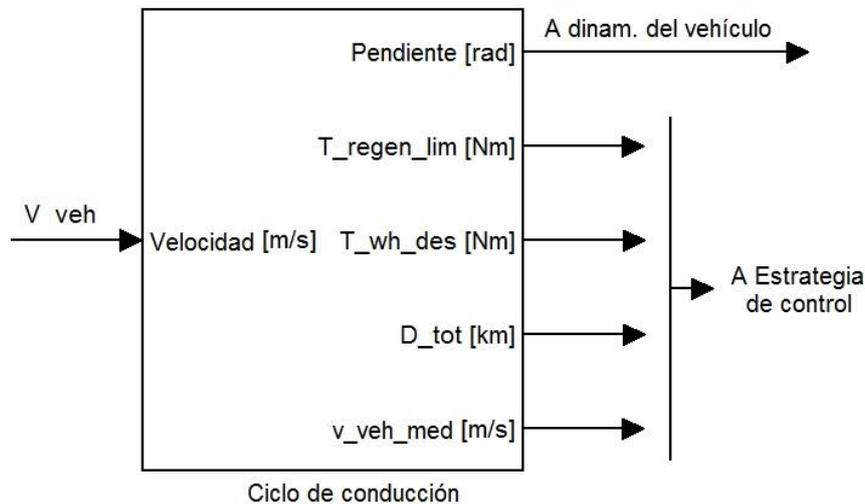


Figura 3.8. Esquema Ciclo de conducción (Driving Cycle)

a) Ciclo económico

Dentro del *ciclo de conducción* se encuentra el *test de ciclo económico* que nos sirve para conocer el consumo de combustible del vehículo en un ciclo de conducción determinado. Como se ve en la figura 3.9, entra la velocidad del vehículo y la distancia que lleva el vehículo antes de esta iteración calculada a partir de una integración (ver apartado 2.5.1.1 *Bloques continuos*). Basándose en esto y unos ciclos de conducción seleccionados el bloque genera la demanda de par en las ruedas (T_{whdes}), la pendiente, el par de frenada ($T_{regenlim}$), la nueva distancia recorrida (D_{tot}) y la velocidad media del vehículo (v_{vehmed}) hasta el momento.

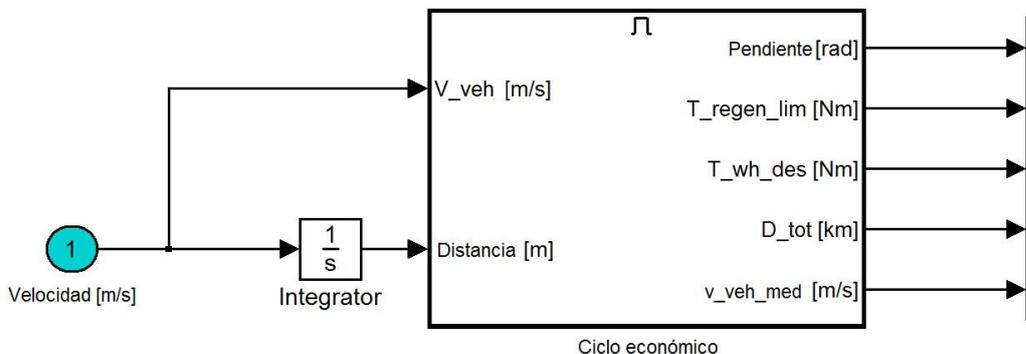


Figura 3.9. Esquema bloque de ciclo económico

Estos ciclos de conducción proporcionan la velocidad a la que tiene que ir el vehículo, simulando así a un hipotético conductor que lo acelera o lo frena en cada momento. Hay distintos tipos de ciclos de conducción, unos que simulan un circuito en ciudad, otros que simulan en carretera y otros mixtos. Los ciclos que se utilizarán en este trabajo son los siguientes:

- **Ciclo de conducción NEDC.**

El ciclo de conducción **NEDC** (*New European Driving Cycle*) es el de homologación obligatoria para todos los vehículos que se quieran comercializar en Europa, de acuerdo a la directiva 98/69/EC. [17]. Hay que señalar que las pruebas de los vehículos en este ciclo se realizan en bancos de pruebas, por lo tanto, no se trata de un circuito real.

Este ciclo se utiliza para calcular el consumo mixto de los vehículos, ya que el mismo ciclo se divide en ciclo urbano y extraurbano y con pendiente 0, es decir, se simulará un hipotético circuito urbano y extraurbano pero en llano. La figura 3.10. muestra el esquema de la velocidad en km/h según el tiempo.

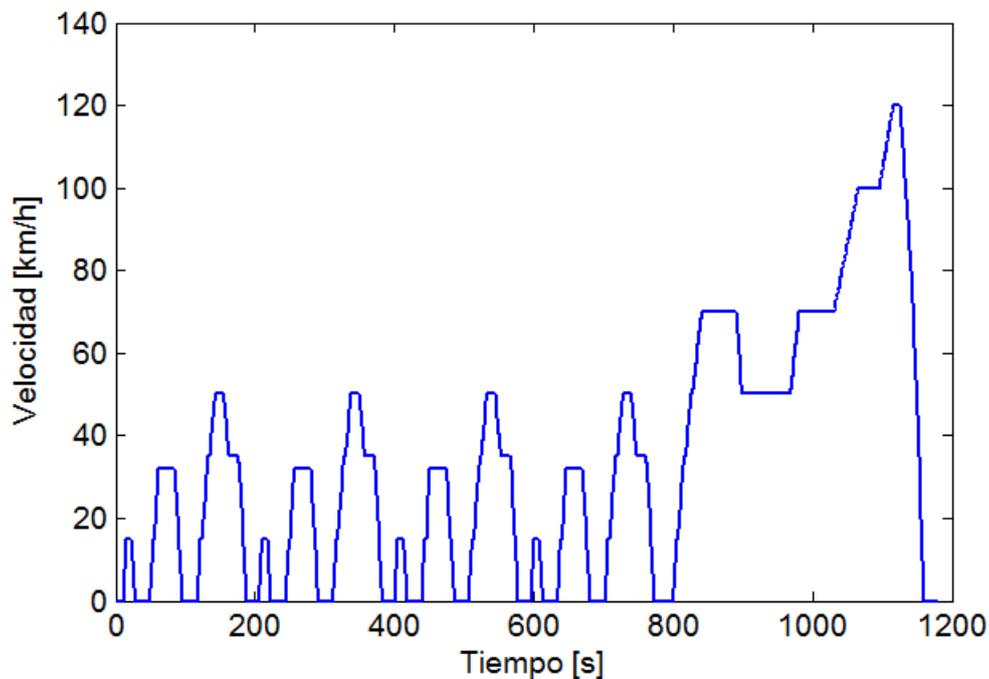


Figura 3.10. Ciclo NEDC

La parte de ciclo urbano consta básicamente de aceleraciones, desaceleraciones y periodos de velocidad constante (15 km/h, 35 km/h y 50 km/h).

Con ello se busca conseguir una simulación parecida a la conducción en ciudad. La velocidad máxima alcanzada es de 50 km/h y una distancia recorrida de aproximadamente 4 km. Este ciclo urbano se repite cuatro veces y cada una dura 3 min y 15 s, con lo que la parte urbana en total tiene una duración de 13 minutos.

La parte de ciclo extraurbano se lleva a cabo justo después de la del ciclo urbano, y consta con periodos de velocidad constante (50 km/h, 70 km/h, 100 km/h y 120 km/h), junto a aceleraciones y desaceleraciones. La velocidad máxima que se alcanza es de 120 km/h y se recorre una distancia de 7 km en 7 minutos.

- **Ciclo de conducción Artemis Highway.**

Este ciclo está desarrollado por un grupo de ingenieros del programa europeo Inventario de Valoración y Confiabilidad de Modelos de Emisiones de Transportes y Sistemas, con las siglas en inglés ARTEMIS, como alternativa al ciclo NEDC para el cálculo de emisiones realistas, ya que los datos del ciclo están tomados de un recorrido real [11]. En este ciclo se puede medir el consumo del vehículo a altas velocidades, ya que en este ciclo se simula la circulación por carreteras y autopistas. La exigencia del circuito es alta y la mayor parte del tiempo la velocidad no baja de 100 km/h. La velocidad máxima es de 150 km/h. El ciclo dura aproximadamente unos 18 minutos. La figura 3.11 representa el esquema de velocidad para este ciclo de conducción:

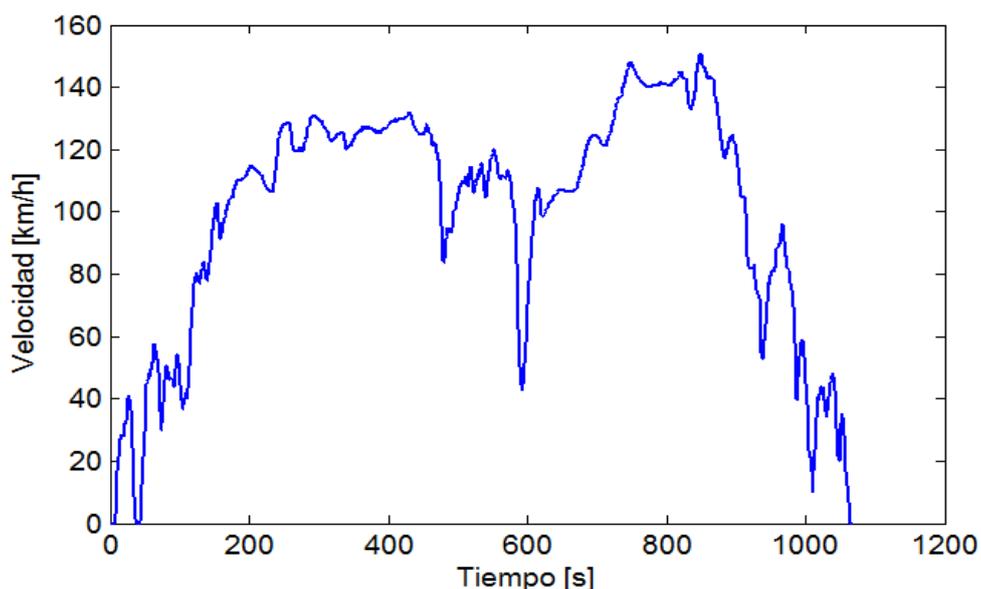


Figura 3.11. Ciclo de conducción Artemis Highway

- **Ciclo de conducción de NREL a Vail.**

Este ciclo de conducción simula un circuito real de carretera que va desde el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los EE.UU. (NREL) a la ciudad de Vail, Colorado. Los datos de este circuito fueron recogidos por ingenieros del NREL para poder simular el comportamiento del vehículo en un escenario real [12]. Los datos del ciclo simulan un recorrido por autovía o autopista en donde las velocidades son altas. Además las pendientes son significativas. Esto hace que sea muy exigente a la hora de demandar par al vehículo, por tanto nos sirve para estudiar al vehículo en situaciones de exigencias altas de potencia. En la figura 3.12 se muestra un esquema de la velocidad que se tiene que alcanzar en el circuito en función del tiempo y en la figura 3.13 un esquema con la altitud en función de la distancia, lo que puede dar una idea del perfil del circuito.

El ciclo dura 1 h y 40 minutos y recorre una distancia total de 140 km. Las velocidades son altas en la mayor parte del tiempo (100 km/h) aproximadamente pero también hay tramos en los que la velocidad es baja. Además las aceleraciones son muy fuertes en zonas de pendientes pronunciadas, con lo que la exigencia de potencia para el vehículo es máxima.

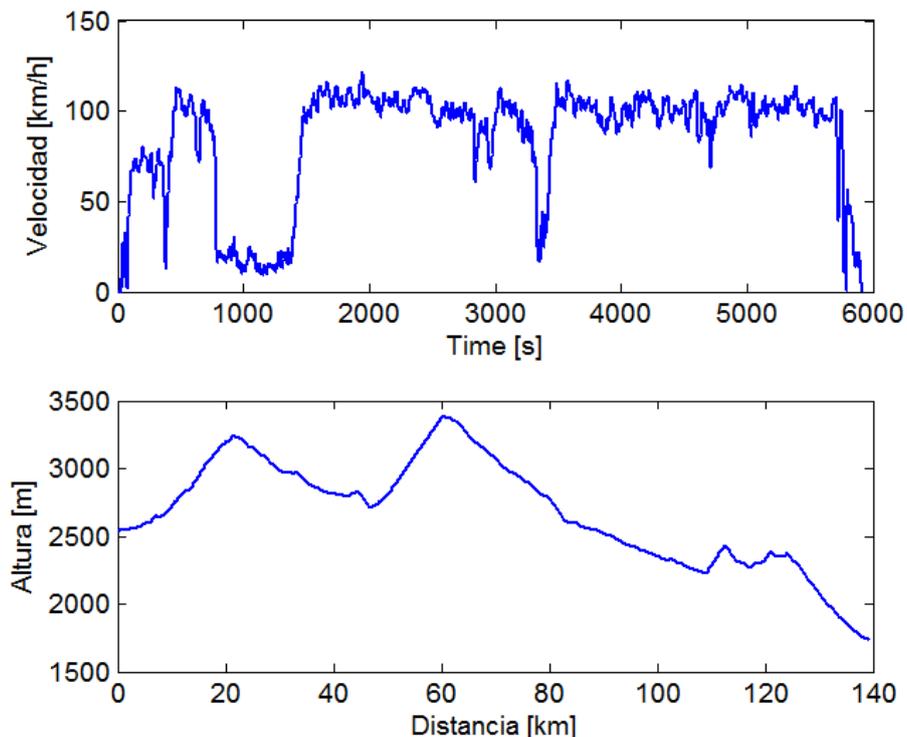


Figura 3.12. Velocidad y perfil del ciclo VAIL2NREL

b) Test de aceleración de 0 a 100 km/h.

En este test se mide el tiempo que tarda el vehículo en alcanzar los 100 km/h partiendo desde parado y en un terreno liso (sin pendiente). Con este test se estudia las aceleración máxima que puede dar el vehículo y el gasto de energía, así como el comportamiento de las diferentes máquinas y de la batería a la hora de realizar el test. La figura 3.14 muestra un esquema del bloque en cuestión:

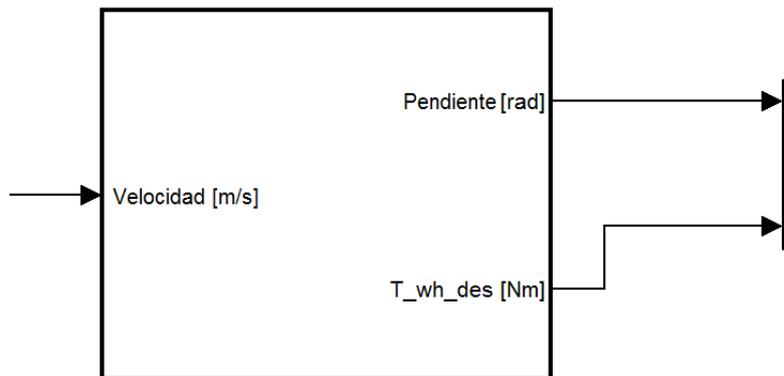


Figura 3.14. Test de aceleración de 0 a 100 m/h.

A partir de la velocidad, el bloque calcula la demanda de par que se le exige al vehículo (T_{whdes}) y la pendiente, que en este caso siempre será nula. El test termina cuando el vehículo alcance los 100 km/h.

c) Test de aceleración de 0 a 1000 m.

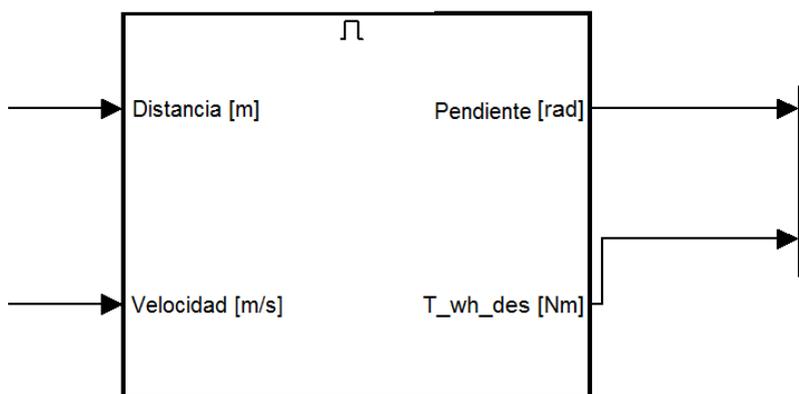


Figura 3.15. Test de aceleración de 0 a 1000 m.

El test de aceleración de 0 a 1000 metros nos permite medir el tiempo que tarda el vehículo en recorrer 1000 metros de distancia. Es otra forma de analizar el

comportamiento del vehículo y sus prestaciones para distintos casos. Por ejemplo podemos analizar el gasto de la batería o el funcionamiento del motor durante la prueba según la pendiente que puede ser modificada.

La figura 3.15 anterior muestra un esquema del bloque. En función de la velocidad el bloque calcula la demanda de par (T_{whdes}). La prueba finaliza cuando el vehículo haya recorrido los 1000 m.

3.2.2.2 Estrategia de control.

En este bloque es donde se implementa la estrategia de control diseñada para la gestión energética del vehículo. Como se observa en la figura 3.16 en el bloque entran las variables calculadas anteriormente en el primer bloque (*Ciclo de conducción*) que son el par de frenada ($T_{regenlim}$), el par que se le está demandando al vehículo (T_{wh}), la distancia recorrida hasta el momento (D_{tot}) y la velocidad media hasta el momento (v_{vehmed}). Además también entran dos variables que son muy necesarias para realizar los cálculos como son la velocidad instantánea del vehículo (V_{veh}) y el estado actual de la batería (SOC) que vienen del bloque de la dinámica del vehículo.

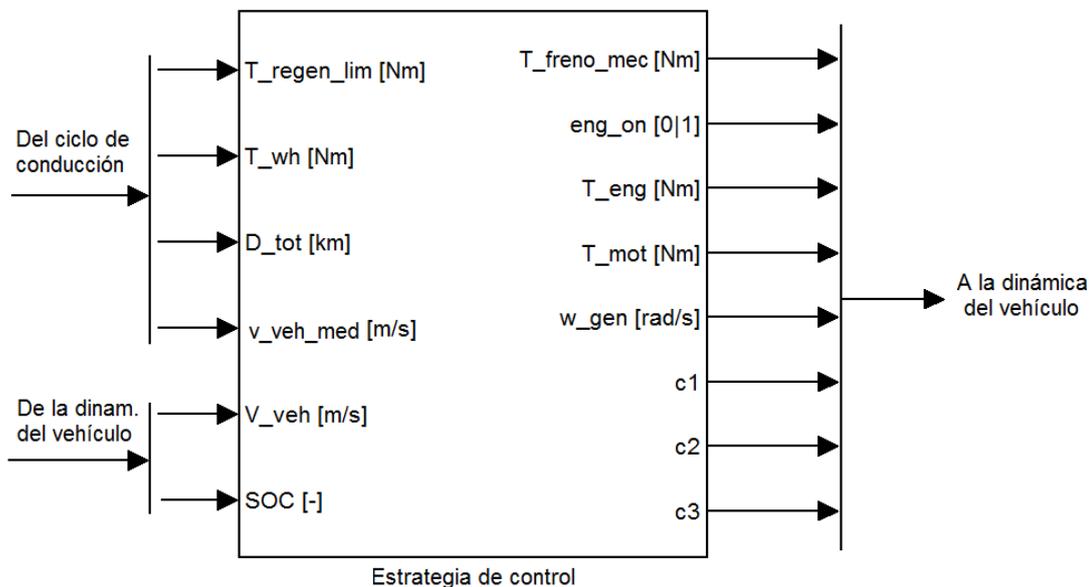


Figura 3.16. Bloque de Estrategia de control

Como podemos observar en el bloque, las variables que tenemos que dar entregarle al bloque donde está implementada la dinámica del vehículo y que son

las de salida para el bloque de *Estrategia de control* son el par que se destina al freno mecánico ($T_{frenomec}$), la bandera que indica si el motor de gasolina se encuentra apagado o encendido (eng_{on}), el par al que debe funcionar el motor de gasolina (T_{eng}), el par que debe entregar el motor eléctrico (T_{mot}), la velocidad a la que debe girar el generador (ω_{gen}) y el estado de los tres embragues (c1, c2 y c3). Para los tres embragues se dará un 1 si el embrague está bloqueado y un 0 si el embrague está abierto.

3.2.2.3 Dinámica del vehículo

En este bloque está implementada toda la arquitectura mecánica destinada a la propulsión del vehículo, es decir, las tres máquinas (motor, generador y motor de gasolina), la batería y la transmisión (caja de engranajes planetarios). A partir de los datos proporcionados por la estrategia de control que hemos diseñado y en base a las características propias de cada máquina del vehículo, el bloque calcula la velocidad en cada instante y toma datos de consumo, potencias, pares que suministra cada máquina, velocidades de cada máquina, etc.. para cada iteración y los manda al *Workspace* de *MATLAB*, haciendo posible que podamos estudiar esos datos para cada instante. La figura 3.17 ofrece un esquema de las variables con las que trabaja este bloque.

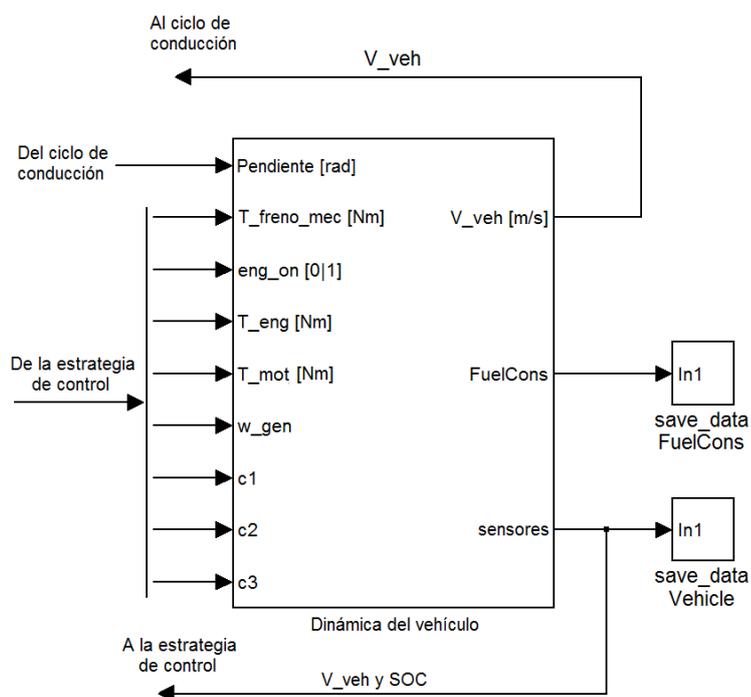


Figura 3.17. Bloque Dinámica del vehículo

En el bloque entran las variables que se han calculado en el bloque de la *Estrategia de control* además de los datos de pendiente procedente directamente del *Ciclo de conducción*. Todo ello con el objeto de calcular la velocidad del vehículo que se consigue con los datos dados.

Por otra parte, del bloque sale la velocidad del vehículo que va al *Ciclo de conducción* para que se inicie de nuevo todo el proceso de cálculo. Además se guardan datos en los bloques (*save_data*) tanto de consumo de fuel como de datos particulares de cada máquina y de la batería. Dos de estos datos como la velocidad del vehículo (V_{veh}) y el estado de carga de la batería (SOC) se mandan directamente al bloque de *Estrategia de control* para que puedan ser utilizados en los cálculos de la siguiente iteración.

Las figuras 3.18 y 3.19 indican las variables que son guardadas en el Workspace del *save_data FuelCons* y del *save_data Vehicle* y que serán las que emplearemos en el análisis de los resultados.

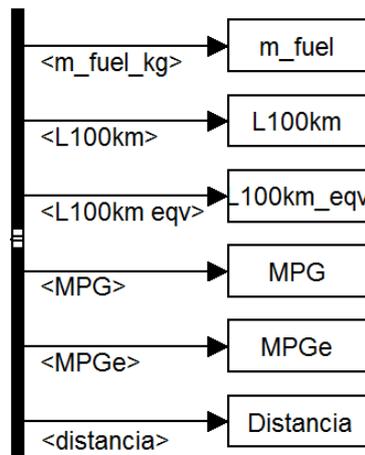


Figura 3.18. Esquema *save_data Fuel Cons.*

A continuación se describe qué es cada variable:

Variable	Descripción
m_fuel_kg	Es la masa de gasolina en kg que ha consumido el vehículo durante la prueba.
L100km	Son los litros de gasolina que consume a los 100 km para la prueba simulada.
MPG	Millas por galón de gasolina.
MPGe	Millas por galón de gasolina equivalente.

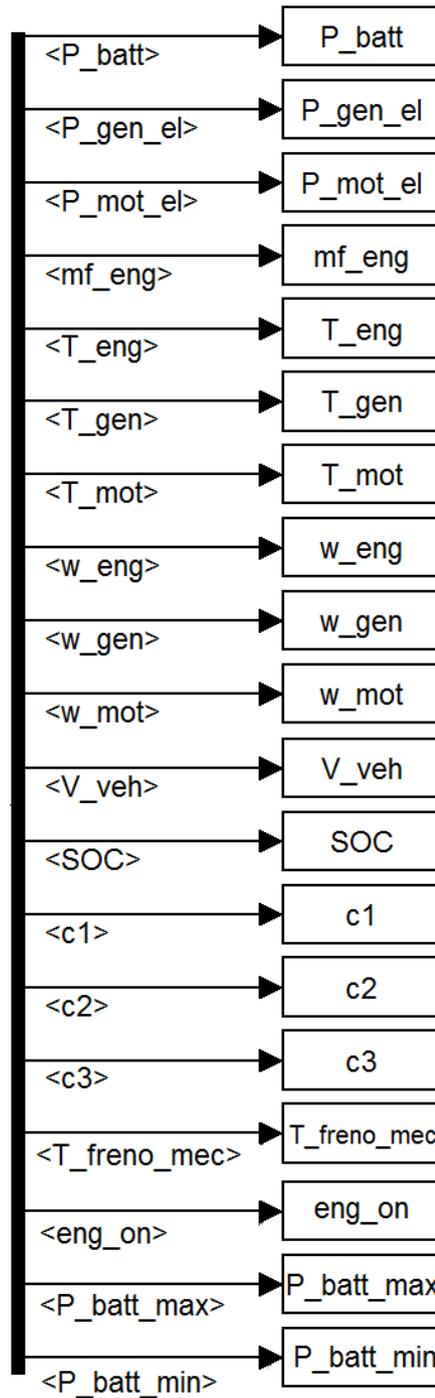


Figura 3.19. Esquema save_data Vehicle

A continuación se describe qué es cada variable:

Variable	Descripción
P_{batt}	Es la potencia eléctrica en Watios de la batería que ha se ha consumido o recargado en cada instante durante el transcurso de la prueba.
P_{genel}	Es la potencia eléctrica en Watios que ha consumido o recargado el generador en cada instante.

P_{motel}	Es la potencia eléctrica en Watios que ha consumido o recargado el motor eléctrico en cada instante
m_{feng}	Es el fuel consumido por el motor de gasolina en kg
T_{eng}	Es el par que ha dado el motor de gasolina en cada instante en [N·m]
T_{gen}	Es el par que ha dado el generador eléctrico en cada momento en [N·m]. Puede ser positivo cuando esté dando par para la impulsión o negativo cuando recargue la batería.
T_{mot}	Es el par que ha dado el motor eléctrico en cada momento en [N·m]. Puede ser positivo cuando esté dando par para la impulsión o negativo cuando recargue la batería.
ω_{eng}	Es la velocidad en [rad/s] a la que ha girado el motor de gasolina en cada instante.
w_{gen}	Es la velocidad de rotación en [rad/s] a la que ha girado el generador eléctrico en cada instante.
ω_{mot}	Es la velocidad en [rad/s] a la que ha girado el motor eléctrico en cada instante
V_{veh}	Velocidad lineal del vehículo.
SOC	Es el estado de la batería en cada instante. Su valor está en el intervalo [0.25,0.95]
$c1$	Es un indicador de cómo se encuentra el embrague 1. Si el embrague está bloqueado el valor será de 1 y si está abierto de 0.
$c2$	Es un indicador de cómo se encuentra el embrague 2. Si el embrague está bloqueado el valor será de 1 y si está abierto de 0.
$c3$	Es un indicador de cómo se encuentra el embrague 3. Si el embrague está bloqueado el valor será de 1 y si está abierto de 0.
T_{frenomec}	Es el par en [N·m] de frenada que ha sido destinado al par de freno mecánico.
eng_{on}	Es un indicador de como se encuentra el motor de gasolina en cada instante. Si el motor está arrancado el valor será de 1 y si está apagado de 2.
P_{battmax}	Es la potencia en Watios a la que se satura la batería cuando se descarga. Este valor es constante ya que es una característica de la batería. El valor se establece en 110000 Watios.
P_{battmin}	Es la potencia en Watios a la que se satura la batería cuando se recarga. Este valor también es constante y se establece en -60000 Watios.

A continuación se profundiza un poco más en los bloques que implementan a cada máquina, a la batería y a la transmisión para así tener una idea más clara acerca del funcionamiento del vehículo pero sin entrar en detalle en cada función o cada subsistema, ya que no es imprescindible para entender el trabajo aquí desarrollado:

a) Motor eléctrico

El motor eléctrico (MOT) con las características descritas anteriormente es el que está implementado en el simulador. Este bloque tiene la función de calcular el par motor saturado (T_{sat}), que no es más que una comprobación de que con el par y la velocidad a la que está funcionando no satura la batería, y mandarlo a la transmisión. Además de eso, también calcula la potencia eléctrica que consume de la batería o recarga (P_{el}). La figura 3.20 muestra un esquema de este bloque:

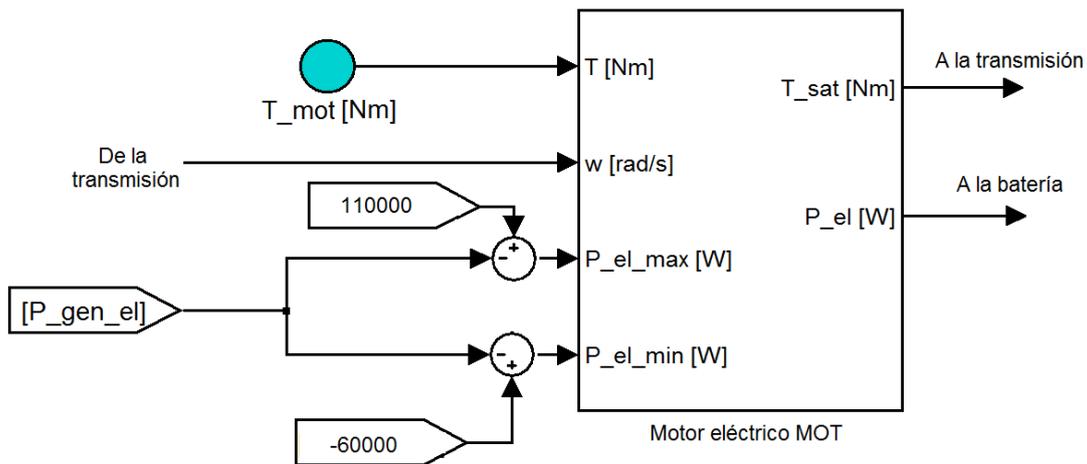


Figura 3.20. Esquema del bloque del motor eléctrico (MOT)

En primer lugar el bloque recoge el par del motor eléctrico (T_{mot}) que hemos calculado en el bloque de *Estrategia de control* y que ha sido mandado al bloque de la *Dinámica del vehículo* donde está este implementado. Las demás variables proceden de dentro de la *Dinámica del vehículo*. La velocidad de giro en rad/s viene de la que se ha calculado en el bloque de transmisión a partir de la velocidad del generador y del estado de los embragues.

En cuanto a las potencias eléctricas máximas y mínimas (P_{elmax} y P_{elmin}) son las que se utilizan para las comprobaciones de saturación, es decir si P_{elmax} supera los 110 Kw se emite una advertencia de que la batería se satura y de igual forma si P_{elmin} es menor que -60 KW se emite otra advertencia. Lo que ocurre antes de que entren estas dos variables en el bloque es que si el generador y el motor están impulsando conjuntamente, claro está que el motor no puede consumir más de la diferencia entre la potencia eléctrica máxima a la que se satura la batería (110000 W) y la del generador, por ello se cumple que:

$$P_{batt_max} = 110000 - P_{gen_el} \quad (20)$$

De igual forma, si el motor y el generador están recargando conjuntamente, el motor tiene que recargar menos de los 60 Kw ya que el generador está recargando otro tanto, de ahí que se haga el cálculo de:

$$P_{batt_min} = -60000 - (-P_{gen_el}) \quad (21)$$

En caso de que alguna de las dos potencias (positiva o negativa) supere alguno de sus límites, el motor reducirá el par (T_{sat}) que suministre a la transmisión para así reducir la potencia consumida o recargada. Esto es lo que se denomina *par saturado*.

b) Generador eléctrico.

El bloque del generador eléctrico GEN realiza algo parecido a lo que hace el motor en su bloque, y es comprobar desde el punto de vista de la capacidad propia de la máquina que puede dar el par (T) que se le está exigiendo desde la transmisión para la velocidad (ω) a la que está girando y así determinar la potencia eléctrica que recarga o consume de la batería (P_{el}).

El par (T) que se le exige es calculado en la transmisión, ya que depende del estado de los embragues y del par que da el motor eléctrico. También la velocidad del generador (ω) que aunque ha sido determinada en la *Estrategia de control* va primero a la transmisión, ya que depende también del estado de los embragues.

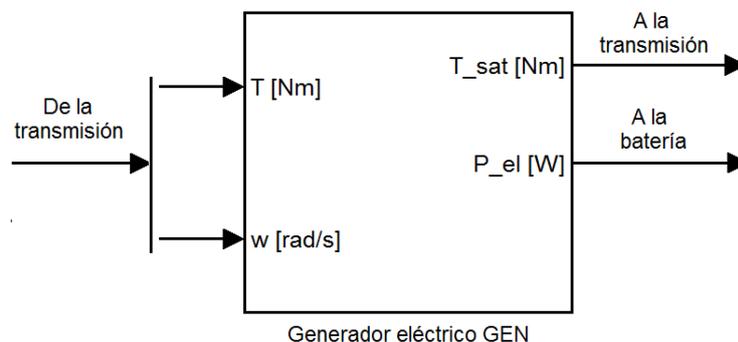


Figura 3.21. Esquema del bloque del generador eléctrico

Una vez que se ha comprobado que el par exigido lo puede dar el generador, este va de nuevo a la transmisión para calcular definitivamente el par

total que se destina a la impulsión o a la recarga. La figura 3.21 muestra el esquema del generador eléctrico.

c) La batería

Un elemento muy importante en cualquier vehículo eléctrico es lógicamente su batería y sus características. La batería va a ser la que más va a limitar tanto en la entrega de potencia como en la recarga y va a hacer que no sea posible aprovechar todas las prestaciones que pueden ofrecer el motor eléctrico y el generador. Esto, como ya se verá más adelante, se va a hacer presente sobretodo en las aceleraciones del vehículo, ya que no va a poder acelerar todo lo rápido que puede hacerlo el motor eléctrico debido a esta limitación de saturación, y también se va a hacer notar a la hora de aprovechar las frenadas, ya que no va a ser posible aprovechar toda la frenada regenerativa para recargar la batería.

La figura 3.22 muestra un esquema del bloque de la batería dentro de la *Dinámica del vhehículo*.

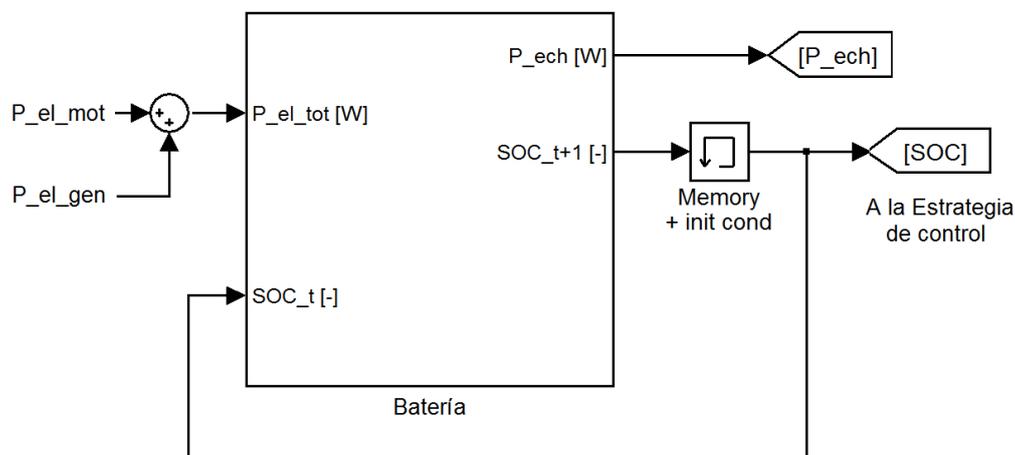


Figura 3.22. Esquema de la batería

El objetivo de este bloque es sacar dos parámetros que son el estado de la batería (SOC) y el flujo potencia eléctrica (P_{ech}) para cada iteración de la simulación una vez que ya se conozca la potencia eléctrica que se está consumiendo o recargando en ese instante ($P_{el_{tot}}$). Esa potencia eléctrica vendrá en todo momento por la suma de la potencia eléctrica del motor más la del generador, tanto si el generador está parado, en cuyo caso $P_{el_{gen}}$ será nulo, como si no.

$$P_{el_{tot}} = P_{el_{mot}} + P_{el_{gen}} \quad (22)$$

Partiendo de la potencia eléctrica total que está en movimiento ($P_{el\text{tot}}$) y del estado de la batería (SOC) de la iteración anterior se calcula el nuevo SOC (de ahí que el estado de la batería que se calcule se almacena en un *Memory* y se introduce de nuevo en el bloque). Este dato se manda al bloque de la *Estrategia de control* para que se utilice en la siguiente iteración.

La otra variable (P_{ech}) es el producto de la intensidad y del voltaje utilizado en la batería y se utiliza para cálculos de consumo y otros.

d) El motor térmico.

En el bloque del motor térmico se aplica la misma filosofía de cálculo que en la del motor eléctrico descrita anteriormente, es decir, se recogen los datos de estado de motor (apagado o encendido) y el par que éste debe entregar (T_{eng}) y que se han determinado en la *Estrategia de control* y la velocidad de giro (w) que viene calculada de la transmisión. A partir de aquí lo que se hace es comprobar que el motor térmico puede dar el par que se le exige ($T_{eng\text{sat}}$) para esa velocidad y además calcula el consumo que supone esa entrega de potencia. La figura 3.23. muestra un esquema del bloque del motor térmico que está dentro del bloque *Dinámica del vehículo*.

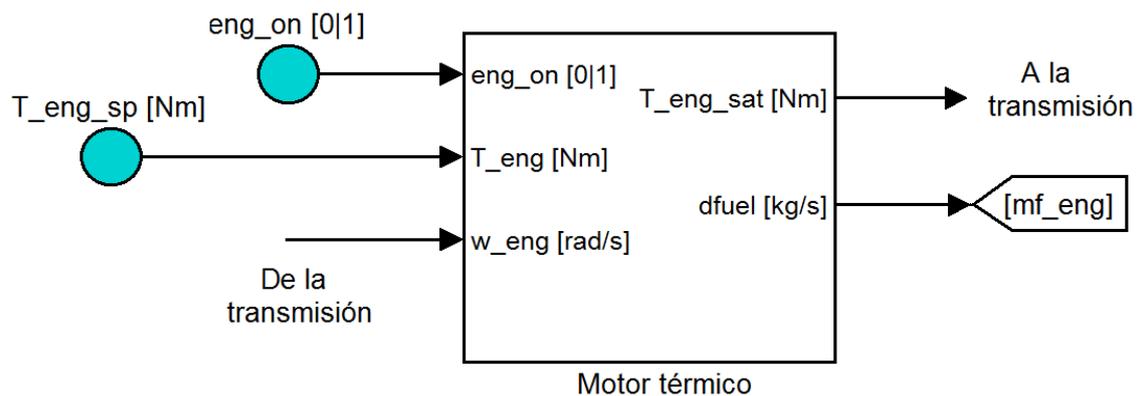


Figura 3.23. Esquema del bloque Motor térmico.

El par ya comprobado se envía al bloque de transmisión para que se calcule el par total de impulsión y los datos de consumo se envían al *save_data Fuel Cons* descrito anteriormente.

e) Transmisión.

Este es el bloque que recoge datos del estado de los embragues (c1, c2 y c3) y de la velocidad a la que debe funcionar el generador (ω_{gen}) procedentes del bloque de la *Estrategia de control* para calcular el par de impulsión total del vehículo que determinará después su velocidad. La figura 3.24. muestra un esquema de este bloque, ubicado dentro del bloque *Dinámica del vehículo*:

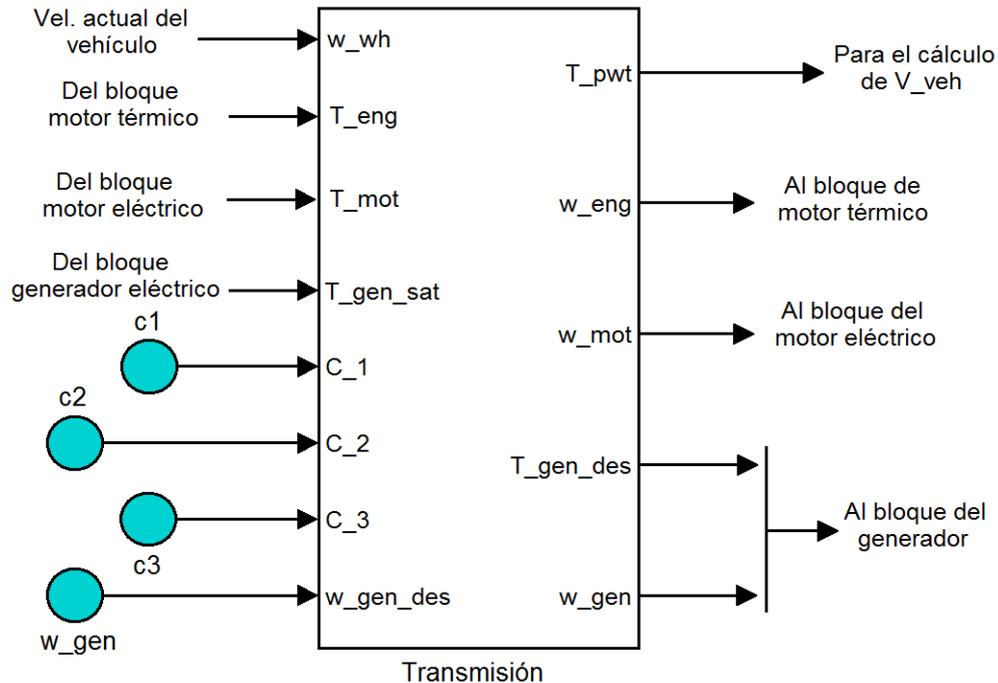


Figura 3.24. Esquema del bloque de la transmisión

En primer lugar el bloque lo que hace es leer los estados de los embragues c1, c2 y c3 y la velocidad de giro del generador (ω_{gen}) procedentes de la *Estrategia de control*. Utilizando la velocidad de giro de las ruedas (ω_{wh}) que se obtiene dividiendo la velocidad del vehículo (V_{veh}) entre el radio de las ruedas (0,33) calcula las velocidad del motor térmico y del motor eléctrico utilizando las siguientes relaciones matemáticas:

$$\omega_c = \omega_{wh} \cdot 2,16 \quad (23)$$

$$\omega_{mot} = \omega_c \cdot (\rho + 1) - \omega_{gen} \cdot \rho \quad (24)$$

$$\omega_{eng} = \omega_{gen} \quad (25)$$

siendo 2,16 la relación final entre el carrier y las ruedas del vehículo y ρ la relación entre los engranajes de la corona y del sol de la transmisión:

$$\rho = \frac{83}{37} = 2,24 \quad (26)$$

Con esto se han calculado las velocidades ω_{mot} y ω_{eng} que son enviadas a los bloques del motor eléctrico y térmico respectivamente para realizar las comprobaciones descritas anteriormente.

Una vez que llegan a la transmisión los pares de los motores eléctrico y térmico (T_{mot} y T_{eng}) se procede al cálculo del par del generador deseado (T_{gendes}), siguiendo la siguiente relación:

$$T_{gen} = T_s \cdot \rho - T_{eng} \quad (27)$$

El par T_{gen} es el que se le va a exigir que dé al generador y por lo tanto éste se envía al bloque del generador junto con su velocidad (ω_{gen}) para que se realicen la comprobaciones descritas antes y se calcule la potencia eléctrica que consume o recarga. Del bloque del generador el par T_{gen} va de nuevo a la transmisión como (T_{gensat}) para calcular el par total de impulsión (T_{pwt}) junto con el par que da el motor eléctrico. Hay que recordar que en la impulsión del vehículo intervienen solo las máquinas eléctricas (MOT y GEN), y por lo tanto el par dado al sol por el motor y el dado a la corona por el generador tienen que ser iguales, cumpliendo siempre con las relaciones siguiente:

$$\frac{T_{gen}}{\rho} = T_c = T_{mot} \cdot (\rho + 1) \quad (28)$$

$$T_{pwt} = T_c \cdot 2,16 \quad (29)$$

Por tanto, dependiendo del estado del embrague 2 (c2) el bloque calcula T_c por un modo u otro:

Si $c2 = 1$ (Modos 2 y 4) el bloque calcula T_c de la siguiente manera:

$$T_c = \frac{T_{gensat}}{\rho} \quad (30)$$

Si $c_2 = 0$ (Modos 1 y 3) el bloque calcula T_c de la forma:

$$T_c = T_{mot}(\rho + 1) \quad (31)$$

Este apartado da una visión global del funcionamiento y de cómo los bloques que implementan el vehículo calculan las variables cuya comprensión son importantes para el estudio del trabajo aquí desarrollado.

3.3 Métodos

En la sección *Métodos* del capítulo 3 del proyecto se describe con detalle el funcionamiento interno de nuestra estrategia de control propuesta. Dividiremos la sección en tres apartados:

En primer lugar se explica el proceso llevado a cabo por la estrategia para realizar la gestión energética y de potencia del vehículo, donde se detalla cómo son utilizadas las variables que entran en el bloque *Estrategia de control*. Se expone el *bloque de decisión* donde se implementa la estrategia, el subsistema donde se calcula el par que debe entregar el motor eléctrico a la transmisión (*Bloque PME*) y todo lo referente a la frenada. Además, se describe con detalle la parte más importante del control, la optimización. Como se verá más adelante, es el núcleo de nuestra estrategia de control y de ello depende gran parte de los procesos utilizados.

En segundo lugar se proponen 4 tipos de vehículos que vamos a emplear para comparar los resultados de consumos energéticos con los de nuestro Volt.

En tercer lugar explicamos el método empleado para el cálculo de costes económicos, de emisiones y de autonomía.

3.3.1 Estrategia de control del Chevrolet Volt

La idea de la estrategia de control en la gestión energética es que para un circuito desconocido se optimice el gasto de energía seleccionando uno de los 4 modos de funcionamiento disponibles en el vehículo a cada instante. Para ello, se ha desarrollado una optimización en *MATLAB* que realiza los cálculos necesarios

para saber si es conveniente acoplar el generador a la transmisión o no en cada momento. Ésta optimización trabaja en función de la velocidad y el par que se demande en el carrier [ω_c y T_c] y obtiene la velocidad a la que debe girar el generador en cada caso [ω_r], para así después decidir en el **Bloque de Decisión** qué modo coger dependiendo de si es necesario cargar la batería o no.

Básicamente, la idea es la siguiente: si la optimización indica que es conveniente acoplar el generador, se adoptará el modo 4 si se necesita cargar batería o modo 2 si no se necesita. Por el contrario si la optimización indica que no es conveniente acoplar el generador a la transmisión, se adoptará el modo 3 si se necesita cargar batería o modo 1 si no se necesita.

Este es el concepto básico de nuestra estrategia de control aunque, como veremos más adelante, hay otras condiciones que pueden cambiar el modo de funcionamiento del vehículo. En la figura siguiente se muestra un diagrama conceptual de lo que hemos hablado en el párrafo anterior:

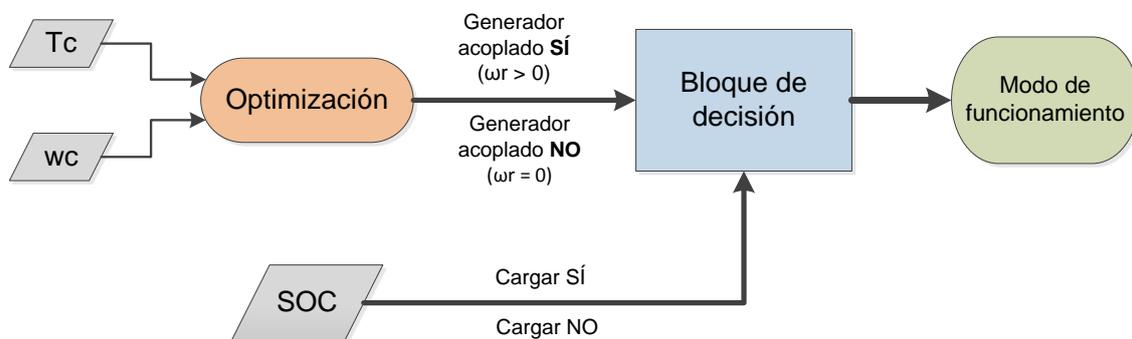


Figura 3.25. Diagrama conceptual del control energético.

Como vimos en el apartado 3.2.2.2 *Bloque estrategia de control*, las variables que intervienen en el bloque son las siguientes:

ENTRADA	
$T_{regenlim}$	Par de frenada que pueden dar las máquinas del vehículo
T_{wh}	Par demandado en las ruedas
V_{veh}	Velocidad del vehículo instantánea
SOC	Estado de carga de la batería
D_{tot}	Distancia total recorrida
V_{vehmed}	Velocidad del vehículo media

SALIDA	
$T_{frenomec}$	Par de frenada proporcionado por el freno mecánico
eng_{on}	Estado del motor de gasolina (arrancado o parado)
T_{eng}	Par que entrega el motor de gasolina
T_{mot}	Par que entrega el motor eléctrico
ω_{gen}	Velocidad de giro del generador eléctrico
c1	Estado del embrague 1 (bloqueado o abierto)
c2	Estado del embrague 2 (bloqueado o abierto)
c3	Estado del embrague 3 (bloqueado o abierto)

Tanto la distancia total recorrida [D_{tot}] como la velocidad del vehículo media [V_{vehmed}] no se van a utilizar porque nuestra estrategia de control está diseñada para circuitos desconocidos, ya que interpretamos que el recorrido que tiene pensado realizar el conductor del vehículo puede verse modificado o no lo conoce exactamente. Por otro lado nos quedan las variables de par demandado en las ruedas [T_{wh}], velocidad del vehículo instantánea [V_{veh}] y el estado de carga de la batería [SOC] que serán utilizadas para calcular el estado de los embragues [c1, c2 y c3] que determinarán los modos, el estado del motor térmico [eng_{on}] y su par [T_{eng}], la velocidad del generador [ω_{gen}] y el par del motor eléctrico [T_{mot}]. Por último la capacidad de dar par de frenada que tienen las máquinas del vehículo representada por la variable [$T_{regenlim}$] se utilizará para calcular el par de frenada destinada al freno mecánico [$T_{frenomec}$].

Las variables [T_{wh}] y [V_{veh}] son el par referido a las ruedas y la velocidad del vehículo. Para poder operar con estas variables de forma más práctica las pasamos a par y velocidad que suponen en el carrier, aplicando las constantes de proporcionalidad apropiadas:

$$\frac{T_{wh}}{2,16} = T_c \quad (32)$$

$$\frac{V_{veh}}{0,33} = \omega_{wh} \cdot 2,16 = \omega_c \quad (33)$$

siendo 2,16 la relación final carrier - ruedas y 0,33 el radio en metros de las ruedas.

Con las variables [ω_c], [T_c] y [SOC] entramos en el subsistema de potencia. Ver figura 3.26.

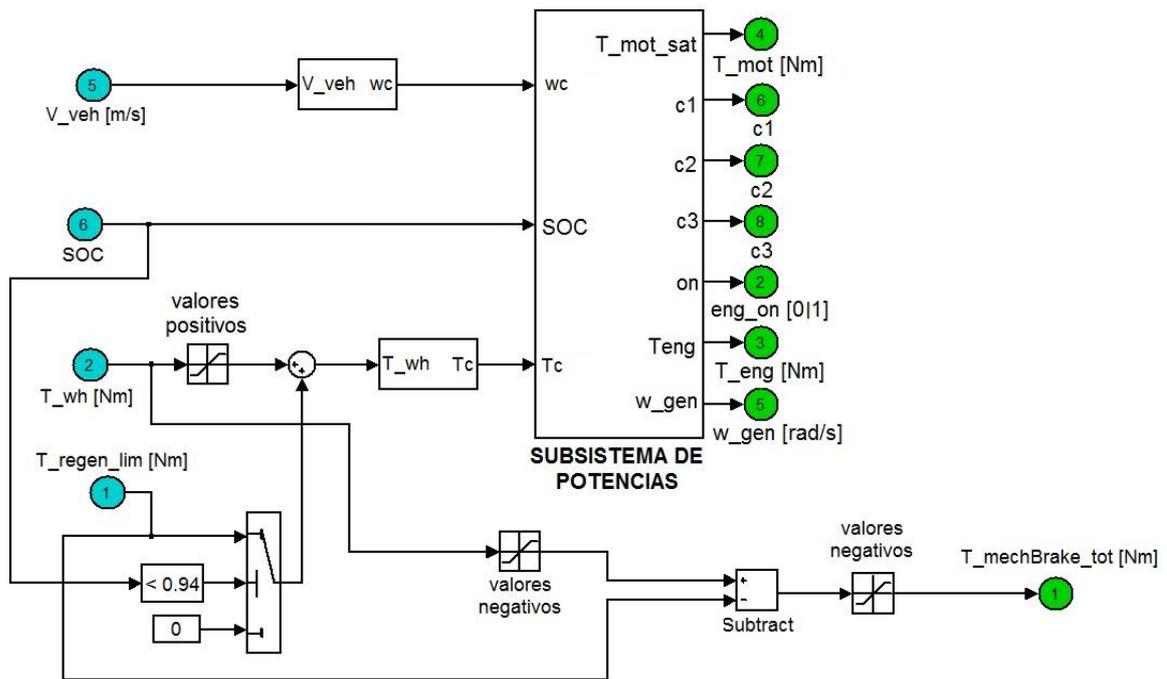


Figura 3.26. Esquema implementado en MATLAB del bloque Estrategia de control

3.3.1.1 Subsistema de potencias

Dentro del subsistema de potencias lo primero que se hace es enviar la velocidad y el par que se demanda en el carrier (ω_c y T_c) al bloque de optimización, donde se calcula si es conveniente acoplar el generador a la transmisión (modos 2 o 4) o no hacerlo. Para ello, la optimización saca el valor de velocidad de giro más óptimo para el generador en ese momento $[\omega_r]$. Con lo cual si la variable que saca la optimización es superior a 0 ($\omega_r > 0$) quiere decir que es más óptimo que el generador se acople a la transmisión y por tanto el vehículo opere en los modos 2 o 4. La velocidad de giro del generador será en todo momento la que nos indique la optimización:

$$\omega_{gen} = \omega_r \quad (34)$$

Por el contrario, si la optimización saca un valor de $\omega_r = 0$ quiere decir que es más óptimo que el vehículo sea impulsado tan solo por el motor eléctrico (modos 1 o 3). En este caso, el embrague c2 se abre y el generador ya no está acoplado a la transmisión, con lo que su velocidad será o bien independiente al sistema de

impulsión (modo 3) o nula. (ver figura 3.2 del apartado 3.2.1.1 *Características generales*).

Una vez que ya tenemos un valor de velocidad de giro óptimo para el generador [ω_r] entramos en el *Bloque de decisión* junto con las variables de estado de carga [SOC] y las de par y velocidad del carrier [T_c y ω_c]. Con ellas calcularemos los valores de las variables que hay que sacar del bloque general *Estrategia de control* hacia la dinámica del vehículo. La siguiente tabla muestra las variables que entran y salen del bloque de decisión del que vamos a hablar ahora:

ENTRADA	
ω_r	Velocidad óptima para el generador
SOC	Estado de carga de la batería
ω_c	Velocidad en el carrier
T_c	Par demandado en el carrier

SALIDA	
c1	Embrague 1
c2	Embrague 2
c3	Embrague 3
eng _{on}	Estado motor gasolina
T_{eng}	Par motor de gasolina
ω_{gen}	Velocidad del generador
ω_s	Velocidad del sol de la transmisión

La figura 3.27. muestra el esquema implementado en MATLAB referido al subsistema de potencias.

Todas las variables que salen del bloque de decisión salen del bloque general *Estrategia de control* y van a la dinámica del vehículo excepto la variable [ω_s] que es la velocidad a la que debe girar el sol de la caja de engranajes planetarios, es decir el motor eléctrico, y que va en función del modo de funcionamiento del vehículo. Esta velocidad debe cumplir en todo momento las siguientes relaciones:

$$\text{Para modos 1 y 3 } (\omega_r = 0): \quad \omega_s = (\rho + 1) \cdot \omega_c \quad (35)$$

$$\text{Para modos 2 y 4 } (\omega_r > 0): \quad \omega_s = (\rho + 1) \cdot \omega_c - \omega_r \cdot \rho \quad (36)$$

siendo ρ la relación entre el número de dientes de la corona y del sol:

$$\rho = \frac{Nr}{Ns} = \frac{83}{37} = 2,24 \quad (37)$$

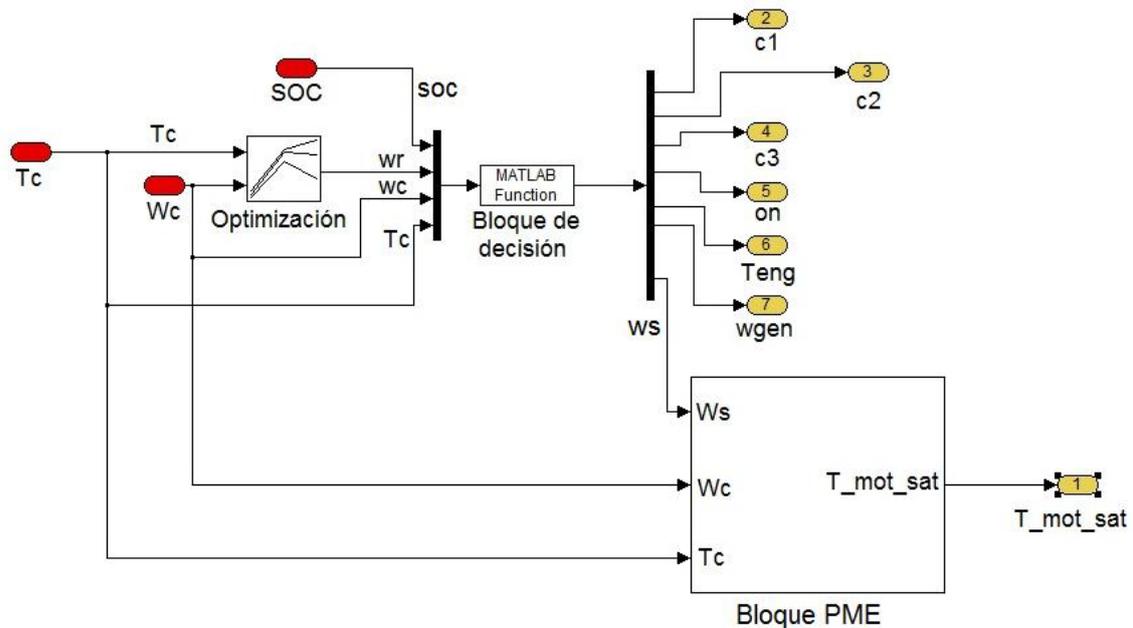


Figura 3.27. Esquema implementado en MATLAB del subsistema de potencia

La variable $[\omega_s]$ determinada en el bloque de decisión pasa al bloque de cálculo del par motor eléctrico (*Bloque PME*) para obtener el par que el motor entrega a la transmisión $[T_{motsat}]$, ya que debe someterse a una serie de condiciones que veremos más adelante.

3.3.1.1.1 Estrategia de decisión

En el bloque decisión está implementada la estrategia que sigue el vehículo para elegir el modo de funcionamiento en cada instante. La figura siguiente muestra el procedimiento que sigue el vehículo para la selección de los modos.

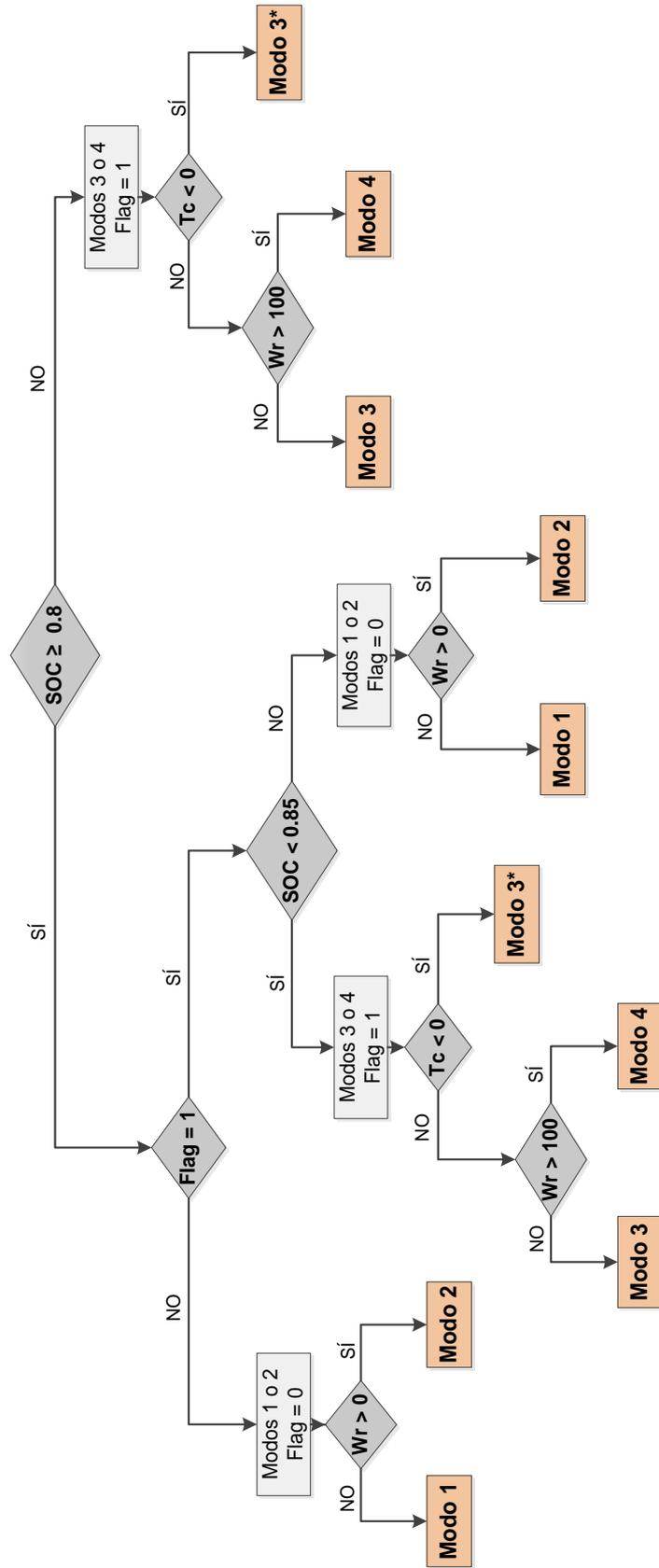


Figura 3.28. Estrategia de decisión

Los valores de las 7 variables de salida del bloque de decisión según el modo de funcionamiento elegido son los siguientes:

MODO 1	
c1	1
c2	0
c3	0
eng _{on}	0
ω_{gen} [rad/s]	0
T_{eng} [N·m]	0
ω_s [rad/s]	$\omega_c \cdot (\rho + 1)$

MODO 2	
c1	0
c2	1
c3	0
eng _{on}	0
ω_{gen} [rad/s]	ω_r
T_{eng} [N·m]	0
ω_s [rad/s]	$\omega_c \cdot (\rho + 1) - \omega_r \cdot \rho$

MODO 3	
c1	1
c2	0
c3	1
eng _{on}	1
ω_{gen} [rad/s]	350
T_{eng} [N·m]	95
ω_s [rad/s]	$\omega_c \cdot (\rho + 1)$

MODO 4	
c1	0
c2	1
c3	1
eng _{on}	1
ω_{gen} [rad/s]	ω_r
T_{eng} [N·m]	95
ω_s [rad/s]	$\omega_c \cdot (\rho + 1) - \omega_r \cdot \rho$

MODO 3*	
c1	1
c2	0
c3	1
eng _{on}	1
ω_{gen} [rad/s]	104.7
T_{eng} [N·m]	0
ω_s [rad/s]	$\omega_c \cdot (\rho + 1)$

Lo primero que evalúa la estrategia de control es el estado de carga de la batería [SOC]. Para asegurarnos de que la batería en ningún momento se queda sin carga la estrategia tiene la orden de mantener el SOC entre el 80% y el 85% en todo momento.

- **Si SOC < 0,8**

Si la batería está por debajo del 80% la estrategia da la orden de cargar la batería, por lo tanto, el vehículo va a operar en modo 3 o en modo 4. La decisión final de operar en uno u otro depende en primer lugar de si el vehículo está frenando ($T_c < 0$) y en segundo lugar del resultado de la optimización [ω_r].

Debido a que el vehículo tiene frenada regenerativa y además tiene la capacidad de cargar la batería mediante el sistema ENG - GEN, puede darse el caso de que se junten las dos situaciones, es decir, que se sume la potencia de carga del sistema motor de gasolina - generador y la potencia eléctrica procedente de la frenada, que podría ocasionar la saturación de la batería. En nuestro vehículo la batería se satura durante la carga a los 60 Kw ($P_{carga} \leq 60 \text{ Kw}$), con lo cual:

$$P_{C_{frenada}} + P_{C_{gasolina}} \leq 60 \text{ Kw} \quad (38)$$

Para solucionar este problema, durante el breve periodo de tiempo en el que se está recargando la batería y el vehículo realiza una frenada ($T_c < 0$), éste pasa del modo en el que estuviese (3 o 4) a operar en modo 3* que es una adaptación del modo 3 en la que se pone el motor de gasolina a ralentí (1000 rpm) y la entrega de par es nula ($T_{eng} = 0$), consiguiendo así anular la potencia de recarga por gasolina y dejar que durante el tiempo de frenada la recarga se realice solo a través de la potencia eléctrica generada a partir de esa frenada.

Siempre que el vehículo no esté frenando, es decir, cuando tengamos un $[T_c]$ positivo, la decisión de recargar en modo 3 o modo 4 viene en función del resultado de la optimización, es decir, del valor de $[\omega_r]$ que puede ser variable para cada instante. Lo normal sería que si $[\omega_r]$ es mayor que 0 el vehículo operase en modo 4 y si es igual a 0 en modo 3, pero nos encontramos con el problema de que si la velocidad de giro del generador es muy baja la potencia de recarga es insignificante y en consecuencia prolongamos de forma innecesaria el tiempo de recarga. Es por ello por lo que se ha impuesto la condición de que el vehículo opere en modo 4 para recargar si el resultado de la optimización $[\omega_r]$ es superior a 100 rad/s. Como hemos dicho antes en la ecuación (34) la velocidad del generador va a ser la que saque la optimización y como el sistema ENG - GEN gira a la misma velocidad, la de w_{gen} , el motor de gasolina va a operar siempre en modo 4 a un par constante $[T_{eng}]$ de 95 N·m suficientes para garantizar una potencia de carga igual o mayor a la que se consuma en los casos más exigentes y a un rango de velocidades de entre 1000 y 4500 rpm. Con esta medida se ha dado prioridad a la eficiencia de recarga del generador, que siempre va a estar en torno al 90%. Si por el contrario $[\omega_r] \leq 100 \text{ rad/s}$ el vehículo realizará la recarga en modo 3 y la potencia

de carga será fija (ver apartado 3.2.1.1 *Características generales. Modo 3*), ya que la velocidad del sistema ENG - GEN (ω_{gen}) se establece constante en 350 rad/s y el par que entrega el motor [T_{eng}] en 95 N·m. Este criterio de valores para [ω_{gen}] y [T_{eng}] establecido se obtiene tras observar el mapa de eficiencia del motor de gasolina en función del par y velocidad del eje ENG - GEN (Figura 3.29).

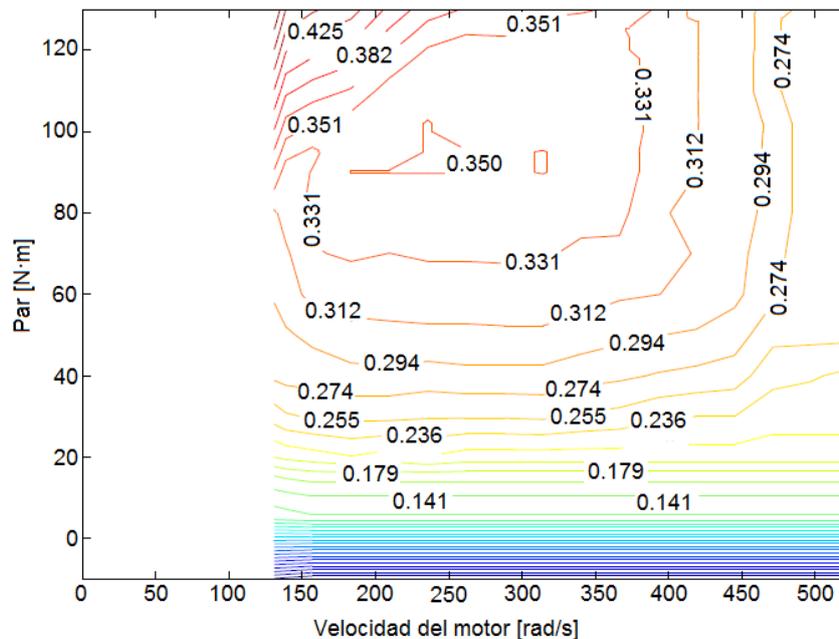


Figura 3.29. Eficiencia del motor

Si observamos el gráfico vemos que la región más óptima del motor está en torno a los 95/100 N·m a velocidades medias, (desde 150 a 400 rad/s). Hemos escogido 350 rad/s porque es la región con más eficiencia del generador (en torno al 94%) y del motor de gasolina al mismo tiempo (34%). Por tanto, para estos valores de T_{eng} y ω_{gen} en modo 3, la potencia eléctrica de carga queda establecida en 31,06 Kw cumpliendo con la siguiente ecuación:

$$P_{C_{modo\ 3}} = T_{eng} \cdot \omega_{gen} \cdot \eta_{gen}(\omega_{gen}) = 31,06\ Kw \quad (39)$$

En el capítulo de *Resultados* utilizaremos un vehículo sin modo 4 equivalente a un vehículo híbrido en serie que solo dispone del modo 3 para recargar y con las mismas máquinas que el Volt para compararlo con nuestro vehículo y veremos las ventajas de adoptar una estrategia en la que la recarga se realiza de una forma más lenta, y que requiere que el motor de gasolina esté más

tiempo arrancado pero efectuando a la vez una recarga que implica un consumo menor de energía que si mantuviésemos al sistema ENG-GEN funcionando de manera independiente a la transmisión (ver apartado *4.4.2 Volt vs híbrido*).

- **SI SOC $\geq 0,8$**

Una vez que se comprueba que el estado de carga de la batería es superior al 80% lo que se evalúa a continuación es la variable [flag] que es una variable auxiliar que indica si el vehículo se encuentra cargando o no. Si [flag = 1] el vehículo está operando en uno de los dos modos de carga (3 o 4). Quiere esto decir que aún no ha llegado al 85% donde se para de recargar la batería. Si por el contrario [flag = 0], el vehículo se encuentra operando en uno de los dos modos eléctricos (1 o 2) ya que o bien se encuentra aún en la primera descarga de la batería y no ha llegado nunca al 80% o si ha llegado al 80% ha terminado la recarga en el 85 y en estos momentos está volviéndose a descargar.

Si nos encontramos en este último caso en el que la variable [flag = 0] lo siguiente que se evalúa es la optimización. Si la optimización devuelve un valor para $[\omega_r]$ mayor que 0 quiere esto decir que es más óptimo acoplar el generador a la transmisión para que se reduzca la velocidad del motor eléctrico, con lo que el modo de funcionamiento sería el modo 2. En caso de que la optimización devuelva un valor nulo para $[\omega_r]$ querrá esto decir que el modo de funcionamiento óptimo es el modo 1. En el apartado de optimización se explica con más detalle las situaciones en las que es más óptimo acoplar el generador y en las que no. (ver apartado *3.3.1.2 Bloque de optimización*).

Si cuando evaluamos la variable [flag] nos encontramos con que [flag = 1] ocurre que el vehículo está cargando debido a que en algún momento llegó al 80% y aun no ha alcanzado el 85% por lo tanto lo siguiente a evaluar es si el estado de carga de batería ha alcanzado ya ese 85% en el que [flag] pasaría a ser 0 y se pararía de recargar. En el momento en que $SOC \geq 0,85$ el vehículo cambia de alguno de los modos de carga a alguno de los modos plenamente eléctricos (modos 1 o 2). Como ya se ha explicado anteriormente la decisión de elegir el modo 1 o 2 depende del resultado que devuelve la optimización para $[\omega_r]$. Si $[\omega_r > 0]$ modo 2 y si $[\omega_r = 0]$ modo 1. En caso de que SOC no haya alcanzado el 85% se entra de nuevo en el módulo de recarga y el vehículo funcionará en los modos 3 o

4. Se volvería a evaluar si se encuentra frenando, en cuyo caso operaría en modo 3*. Si no se encuentra frenando se evalúa el resultado de la optimización y si $[\omega_r > 100 \text{ rad/s}]$ se elige el modo 4 y sino el modo 3, tal y como hemos explicado anteriormente cuando $\text{SOC} < 0,8$.

3.3.1.1.2 Bloque de decisión

En este bloque se calcula el par en N·m que debe entregar el motor eléctrico en cada instante. El par calculado aquí va sujeto a una serie de condiciones que deben de cumplirse con el objetivo de proteger la batería. El problema que tenemos es que en modo 1 la potencia exigida va a ser muy alta, ya que el vehículo usará este modo para acelerar y no siempre vamos a poder entregar la potencia exigida, debido a que la potencia que se demande a la batería en ningún caso tiene que ocasionar su saturación (110 Kw para carga y 60 Kw para descarga. Ver apartado 3.2.1.2 *Características de las máquinas. La batería*).

La solución que hemos adoptado para este problema es que cada vez que el motor demande una potencia superior a 110 Kw se limite el par entregado, de tal forma que siempre se cumpla con la siguiente condición:

$$P_{dem} = \frac{T_s \cdot \omega_s}{\eta_{mot}(T_s, \omega_s)} \leq 110 \text{ Kw} \quad (40)$$

Así la velocidad de giro del motor $[\omega_s]$ es siempre la calculada en el bloque de decisión y solo actuaremos reduciendo el par hasta que se cumpla la condición de la ecuación (40).

Lo mismo ocurre durante una frenada. Cuando el bloque de decisión decide que es más óptimo frenar con el motor eléctrico (modo 1 y 3*) existe el riesgo de saturar la batería para la carga, es decir, sobrepasar los 60 Kw límite. Para solventar el problema se hace lo mismo que para la impulsión, es decir, se limita el par hasta que la potencia de carga sea menor o igual a 60 Kw.

Para ambos casos, si la potencia que se demanda o se genera a la batería no supera los límites establecidos para la saturación, el motor entregará el par que se demande sin ninguna restricción. La figura 3.30. muestra el esquema con el procedimiento que sigue el bloque PME para calcular el par $[T_{mot}]$:

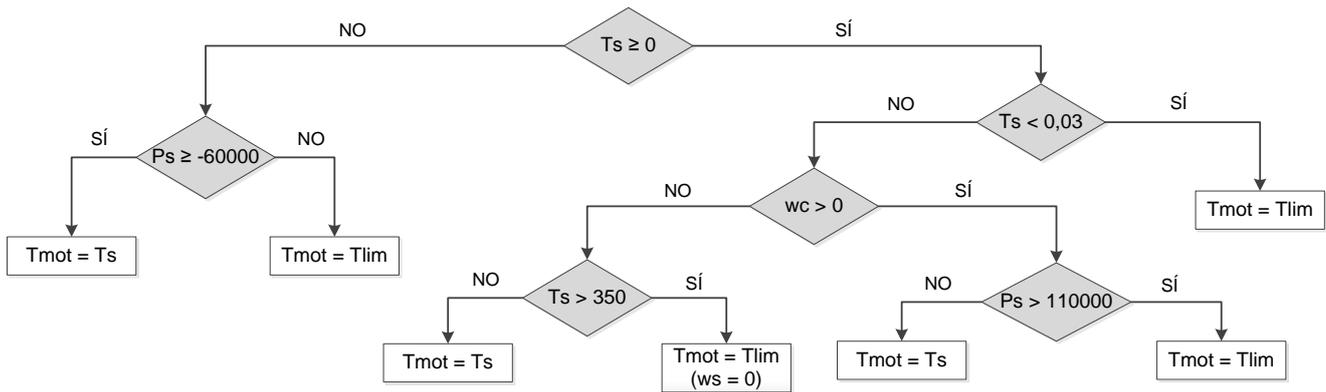


Figura 3.30. Esquema para el cálculo del par motor T_{mot}

Lo primero que hace el bloque es determinar cuál es el par en el sol [T_s] que supone el par en el carrier [T_c] aplicando la siguiente relación:

$$T_s = \frac{T_c}{(1 + \rho)} \quad (41)$$

Una vez que el bloque ha determinado [T_s] lo evalúa y comprueba si el vehículo se encuentra frenando. Si es así ($T_s < 0$) se calcula la potencia de carga que supondría aplicar el [T_s] que se demanda a la velocidad [ω_s] a la que debe girar y si ésta es menor que -60000 (recordar que para carga el signo del par es negativo) quiere decir que la batería se satura, con lo que se aplicaría la limitación de par en base a una tabla de datos proporcionada por el simulador (ver anexo I). En caso de que ese par no sature la batería el par que entregue motor eléctrico [T_{mot}] es el que se demande [T_s] sin ninguna restricción.

Por otra parte si se comprueba que el vehículo no está frenando sino que se está demandando par para impulsión [$T_s > 0$], en primer lugar lo que se hace es flexibilizar un poco el pedal de acelerador, es decir, para que el pedal no sea tan sensible a pequeñas variaciones y que éstas se traduzcan en movimientos bruscos del vehículo, se ha establecido que si el par demandado en el sol es menor que 0,03 el motor eléctrico no considere tal demanda y el par entregado sea nulo. En segundo lugar se comprueba si el vehículo está parado o tiene una cierta velocidad. En caso de que el vehículo esté parado [$\omega_c = 0$] se pueden dar dos situaciones; la primera que el conductor quiera una fuerte aceleración, lo que se traduciría en una demanda altísima de par que ocasionaría la saturación de la batería. Es por ello por

lo que se limita el par a partir de una demanda de 350 N·m. La segunda situación es que el conductor quiera acelerar lentamente y el par demandado lo pueda proporcionar el motor eléctrico sin problemas, en cuyo caso se entrega el par que se pide. El último supuesto que nos queda es que el vehículo no esté parado, sino que tenga una cierta velocidad [$\omega_c > 0$], en cuyo caso se adopta la misma estrategia para la protección de la batería adoptada para las frenadas, es decir, se calcula la potencia que demanda el motor eléctrico para el par que se exige y la velocidad a la que debe girar y se comprueba que esa potencia no sea superior a 110 Kw. Si esa potencia es superior se limita el par en base a unos datos proporcionados por el simulador y que son característicos del motor. En caso de que se exija un par que puede dar el motor sin saturar la batería, el par motor entregado [T_{mot}] será el mismo que se demande sin restricciones.

Para ver el código fuente del esquema anterior implementado en *MATLAB* ir al anexo II.

3.3.1.1.3 Frenada

El último tema por ver antes de entrar en la optimización es el procedimiento que lleva a cabo el vehículo en las frenadas, ya que una de las ventajas que tienen los vehículos que disponen de máquinas eléctricas es que éstas son reversibles y pueden ser utilizadas tanto para generar potencia mecánica como para generar electricidad. En nuestro caso, disponemos de dos máquinas eléctricas (generador y motor eléctrico) con las que podemos aprovechar la energía cinética procedente de una frenada y convertirla en energía eléctrica para recargar la batería.

Cuando el ciclo demanda al vehículo un par negativo ($T_{wh} < 0$), es decir, cuando se le exige que reduzca su velocidad, el vehículo tiene una capacidad de frenada determinada a través de sus máquinas ($T_{regenlim}$). Esta variable es calculada por el *Ciclo de conducción* y enviada al bloque *Estrategia de control*. Una parte de la frenada total que se requiere la realizan las máquinas para recargar la batería, y la parte que éstas no puedan asumir la realiza el freno mecánico ($T_{mechBrake}$). El procedimiento es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Para } T_{wh} \geq 0 &\longrightarrow \begin{cases} T_{regenlim} = 0 \\ T_{mechBrake} = 0 \end{cases} \\ \text{Para } T_{wh} < 0 &\longrightarrow \begin{cases} T_{regenlim} < 0 \\ T_{mechBrake} = T_{wh} - T_{regenlim} < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Si $[T_{mechBrake}] < 0$ quiere decir que al vehículo se le está exigiendo una frenada mayor de la que pueden desarrollar sus máquinas, y por lo tanto, será necesaria la acción del freno mecánico. Si por el contrario $T_{mechBrake} = 0$, la capacidad de frenada de las máquinas es mayor de la exigida y no será necesario el freno mecánico.

El procedimiento de frenada mostrado en la Figura 3.31. se realiza atendiendo a una serie de limitaciones que tiene el sistema:

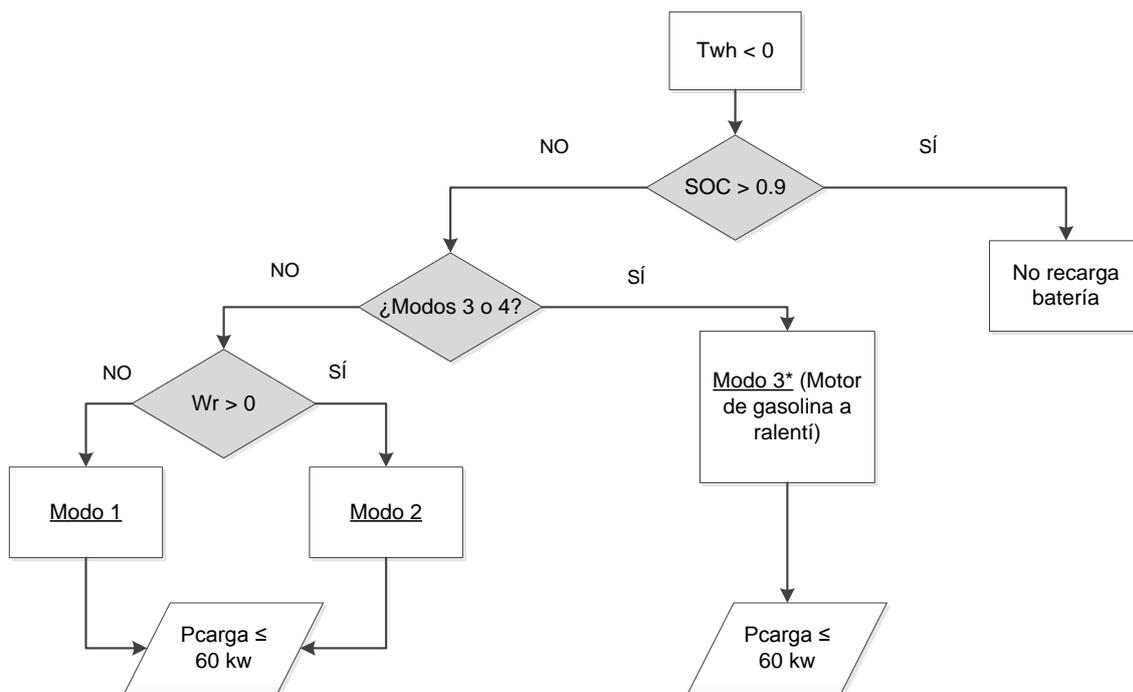


Figura 3.31 Procedimiento para el cálculo del par de frenada

La primera limitación es que esa recarga espontanea que produce una frenada no debe hacer que la batería supere su nivel máximo, establecido en el 95 %. Para ello se establece un intervalo de seguridad en el que no se permite recargar la batería a través de la frenada. Este intervalo va desde el 94% al 95%, con lo cual, cuando el estado de la batería esté entre el 94% y el 95% la frenada se

seguirá realizando a través de las máquinas pero no se aprovechará para recargar la batería.

Otra de las limitaciones que hay que tener en cuenta a la hora de aprovechar las frenadas es que la capacidad que tiene el motor eléctrico de generar electricidad es superior a la capacidad que tiene la batería de ser recargada, es decir, toda la energía eléctrica producida por el motor eléctrico debido a una frenada no podrá ser destinada en su totalidad para recargar la batería. El máximo posible es de 60 kw de potencia y a partir de este valor la batería se satura. Para evitar este problema, hemos tomado una serie de medidas:

En primer lugar se comprueba que el vehículo no esté recargando la batería a través del motor térmico, esto es, que no esté operando en los modos 3 o 4. En caso de que el vehículo estuviera operando en alguno de estos dos modos existe un alto porcentaje de que se sature la batería, ya que a la potencia de carga que estaría aportando a través del motor térmico habría que sumarle la que aporta el motor eléctrico debido a la frenada. Para solucionar el inconveniente hemos optado por poner el motor térmico a ralentí (velocidad a 1000 rpm y par 0 N·m) y darle prioridad a la energía que proviene de la frenada, creando una adaptación del modo 3 a la que denominamos 3*. Con esto conseguimos no saturar la batería durante el tiempo en el que se junta la carga por motor térmico y la carga por frenada y consumir menos combustible, ya que durante este corto periodo de tiempo el motor térmico se encuentra funcionando a ralentí y consumiendo lo mínimo. (ver figura 3.28)

Por el contrario, si el vehículo está operando en los modos 1 o 2 se limita el par entregado por el motor eléctrico de tal forma que para la velocidad a la que gira el motor y el par que está entregando nunca llegue a superar los 60 kw de carga. Por lo tanto, en todo momento:

$$P_{carga} = \omega_s \cdot T_s \leq 60.000 W \quad (42)$$

de lo contrario, se limita el par T_s de tal forma que esa potencia de carga nunca supere los 60 kw.

3.3.1.2 Bloque Optimización

El objetivo del bloque optimización es proporcionar un dato que sirva como base a la estrategia de decisión (ver figura 3.28) para hacer el funcionamiento del vehículo lo más óptimo posible y consumiendo la mínima energía, pero cumpliendo siempre con las exigencias de par y velocidad.

La optimización está basada en calcular la velocidad a la que tiene que girar la corona $[\omega_r]$ de la transmisión sea cual sea la demanda de par y de velocidad en cada instante. Para ello utilizaremos la función *Pattern Search* en MATLAB (ver sección 2.4.5.1 *Función patternsearch*). Como resultado se obtiene una tabla de doble entrada con los datos de $[\omega_r]$ en función del par $[T_c]$ exigido y velocidad $[\omega_c]$ en el carrier, de tal forma que en el bloque *Estrategia de control* solo se tenga que acceder con los datos de par y velocidad a esa tabla para obtener de forma rápida la velocidad $[\omega_r]$ que sirva de base después a la estrategia de decisión para elegir el modo de funcionamiento del vehículo.

Los datos de los que disponemos y que nos han servido como punto de partida para elaborar la tabla son los datos de eficiencia de cada máquina en función de su velocidad y par. (ver anexo I). De esta forma, sabemos la eficiencia con la que opera el vehículo en el modo 1 y con la que lo hace en modo 2.

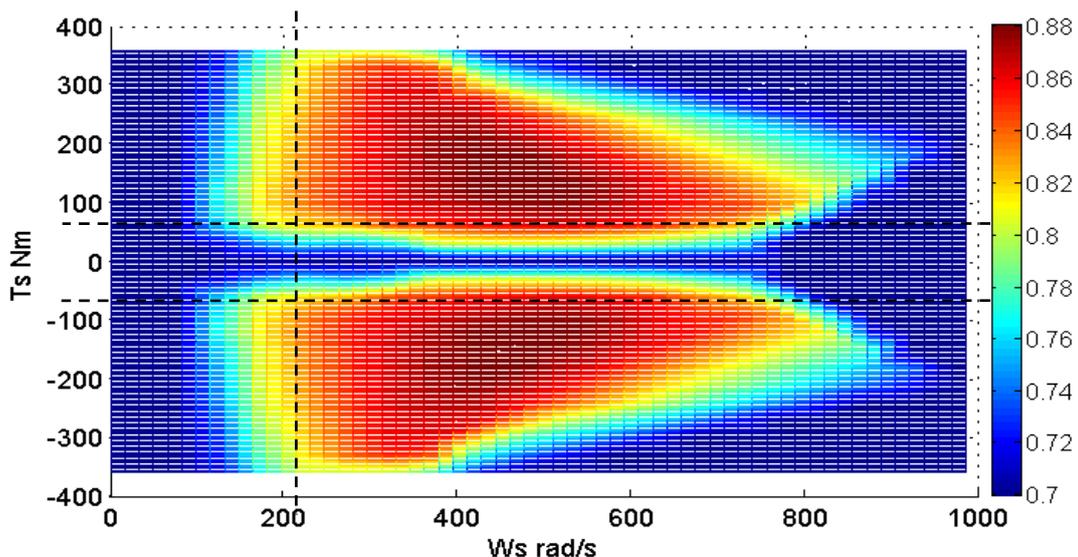


Figura 3.32. Eficiencia del motor eléctrico [MOT] (Modo1)

La figura 3.32 muestra la eficiencia del motor eléctrico en función de su velocidad $[\omega_s]$ y el par exigido en el sol $[T_s]$, correspondiéndose con la eficiencia con la que opera el vehículo en modo el 1.

En esta figura se observa el mapa de eficiencia en función de la velocidad y el par en el sol $[T_s]$ y $[\omega_s]$ y en él se pueden apreciar las zonas de mayor y menor eficiencia, tanto para los pares positivos (impulsión) como para los negativos (generación de electricidad). Lo primero que observamos es que las zonas de mayor eficiencia son las de pares elevados y las de menor eficiencia son regiones a baja velocidad, por debajo de los 200 rad/s de velocidad de giro de motor, que equivale a que el vehículo circulase a 34 km/h en modo 1. Vemos que si el vehículo circula por debajo de esta velocidad el rendimiento de la máquina está entre el 70 y el 80% que es el mínimo posible. Además otra zona en la que el motor trabaja de forma menos eficiente es cuando entrega pares pequeños, por debajo de ± 60 N·m, que equivalen a unos ± 195 N·m en el carrier y unos ± 421 N·m en las ruedas. Lo que significa que para cualquier velocidad en modo 1, si al vehículo se le exige un par por debajo de los 420 N·m, sea positivo o negativo, el motor trabajará al mínimo rendimiento posible, lo que se traduce en un consumo elevado de potencia eléctrica cuando la velocidad sea alta, ya que la potencia consumida o de carga será para el modo 1 la siguiente:

$$P_{elect} = \frac{T_s \cdot \omega_s}{\eta_{mot}(T_s, \omega_s)} \quad (43)$$

Surge de aquí la necesidad de optimizar el consumo de potencia eléctrica para cuando a las ruedas se exijan menos de 421 N·m. Estos casos se producirán cuando el conductor pretenda que su vehículo circule a una velocidad más o menos regular tras una aceleración, y lo que le exija a las ruedas del vehículo van a ser pares que en gran medida estarán por debajo de esos 421 N·m, ya que lo que se pretende es mantener esa velocidad alcanzada. Por tanto, la solución que podemos adoptar es estudiar cómo se comporta en cuanto a eficiencia energética un funcionamiento combinado entre motor y generador, es decir, nuestros modos 2 y 4. La figura 3.33 muestra la eficiencia del generador en función de su velocidad y par $[\omega_r]$ y $[T_r]$.

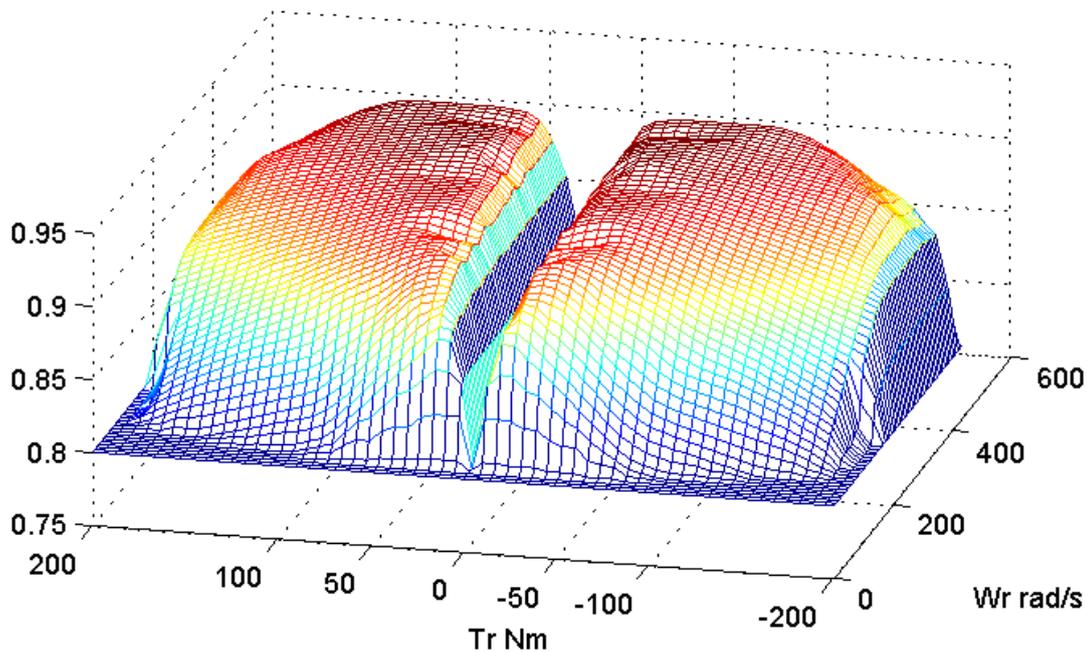


Figura 3.33. Eficiencia del generador (GEN)

En la figura se observa que la eficiencia mínima del generador es del 80%, eficiencia que es considerablemente superior a la mínima del motor eléctrico. Vemos que a partir de ± 50 N·m en el anillo, que equivale a 22 N·m en el carrier, la eficiencia es ya cercana al 90% para casi todas las velocidades. Esta eficiencia no es alcanzable con el motor eléctrico para pares tan bajos, lo que nos lleva a inclinarnos por la idea de combinar motor y generador para regiones de par bajo:

La idea de que se ha seguido para optimizar los modos 2 y 4 ha sido partir de la velocidad $[\omega_c]$ a la que vaya el vehículo en cada momento y repartir las velocidades de motor $[\omega_s]$ y generador $[\omega_r]$, dándole más incidencia al generador que es más eficiente para quitársela al motor eléctrico. Solamente podremos interferir en las velocidades de cada máquina, ya que el par que se requiere en el carrier lo proporciona el motor eléctrico y ahí no podemos actuar en este bloque. Con lo cual, para darle más importancia al generador, aumentaremos su velocidad (ω_r) y reduciremos la del motor eléctrico (ω_s) , que aunque su eficiencia será mínima (70% - 80%), su velocidad es tan baja que en el cómputo global ahorramos potencia eléctrica. La optimización tratará entonces de calcular cuál es la pareja de velocidades $[\omega_r, \omega_s]$ a la que se ahorra más potencia eléctrica en comparación con otras.

Hasta ahora hemos hablado solo de situaciones en las que el vehículo circula a velocidades constantes o acelera de forma muy lenta donde los pares exigidos son bajos (menores de 400 N·m en las ruedas). Pero ¿qué ocurre cuando se le exige al vehículo aceleraciones rápidas o pares muy elevados?

Volviendo a mirar las gráficas de eficiencia de motor eléctrico (Figura 3.32) y del generador (Figura 3.33) se observa que el generador es más eficiente que el motor, y que por lo tanto, el generador realizaría el trabajo de una forma más óptima. Pero existen dos razones por las que solo se acelera con el motor eléctrico, es decir, en los modos 1 o 3. En primer lugar nuestra arquitectura mecánica no lo permite, ya que no existe ningún modo de funcionamiento en el que pueda operar solo el generador eléctrico (ver figura 3.2). En segundo lugar el motor eléctrico es capaz de desarrollar un par máximo de 354 N·m, mientras que el generador como máximo solo puede dar 183 N·m (ver sección 3.2.1.2 *Características de las máquinas*), con lo cual, en una aceleración, el motor eléctrico nos da mejores prestaciones que el generador. El límite establecido para considerar aceleración rápida lo hemos establecido en 260 N·m en el carrier, es decir, el vehículo va a operar en modo 1 o 3 cuando el par en el carrier supere los 260 N·m.

Otro tema a considerar es en qué modo realizar las frenadas, es decir, cuándo conviene frenar en modo 1 o en modo 2 y a qué velocidad tiene que ir el generador [ω_r]. Hay que aclarar que si el vehículo se encuentra recargando la batería, siempre se va a frenar en modo 3*. (ver apartado 3.3.1.1.3 *Frenada*).

El criterio a seguir para determinar cuándo es conveniente frenar en modo 1 o frenar en modo 2 ha sido el mismo que para el de la impulsión, es decir, el vehículo frenará en modo 1 cuando el par demandado en el carrier supere los 260 N·m en valor absoluto (recordar que para frenadas el par es negativo). Esto se ha hecho para disminuir el riesgo de saturación de la batería, ya que para un par de 260 N·m independientemente de la velocidad a la que vaya el vehículo, el modo 2 no genera suficiente potencia eléctrica en una frenada como para alcanzar los 60 Kw.

3.3.1.2.1 Aplicación función *PatternSearch*

Mediante la función *PatternSearch* tenemos la posibilidad de encontrar la pareja de velocidades ω_r y ω_s para la cual se consume la mínima potencia eléctrica en el modo 2 y 4 ($T_c < 260$ en impulsión y $T_c > -260$) en generación de electricidad).

Partimos de los datos de eficiencia del motor $[\eta_s]$ y del generador $[\eta_r]$ en función de sus pares y velocidades $[T_s$ y $\omega_s]$ y $[T_r$ y $\omega_r]$ proporcionados por el simulador en tablas:

T_{s1}	η_{s11}	η_{s12}
T_{s2}	η_{s21}	η_{s22}
T_{s3}	η_{s31}	η_{s32}

T_{r1}	η_{r11}	η_{r12}
T_{r1}	η_{r21}	η_{r22}
T_{r1}	η_{r31}	η_{r33}

ω_{s1}	ω_{s1}
---------------	---------------

ω_{r1}	ω_{r1}
---------------	---------------

Estas tablas de datos las adaptamos de tal forma que cada una de sus velocidades y pares concuerden con dos vectores comunes para los dos, uno que va a ser el vector velocidad en el carrier $[\omega_c]$ y otro que va a ser vector par en el carrier $[T_c]$, cumpliendo con las relaciones (13 y 15) y utilizando la función *griddata* de MATLAB (ver apartado 2.5.4.2 *Función griddata*). Así conseguimos tener lo siguiente:

T_{c1}	T_{s1}	η_{s11}	η_{s12}	T_{r1}	η_{r11}	η_{r12}
T_{c2}	T_{s2}	η_{s21}	η_{s22}	T_r	η_{r21}	η_{r22}
T_{c3}	T_{s3}	η_{s31}	η_{s32}	T_r	η_{r31}	η_{r32}
		ω_{s1}	ω_{s2}		ω_{r1}	ω_{r2}
		ω_c	ω_c		ω_{c1}	ω_{c2}
		1	2			

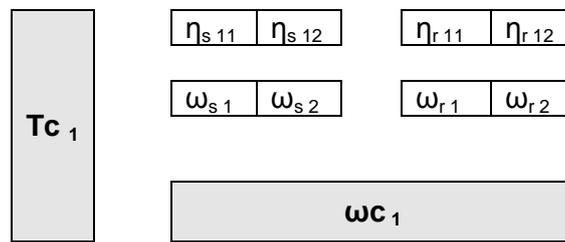
Al mismo tiempo generamos una tabla vacía en la que almacenaremos los datos de $[\omega_r]$ óptimas calculada por la función *PatternSearch*.

El proceso de cálculo se hace utilizando dos bucles anidados, uno en el que se coge toda una fila de velocidades para un T_c constante, y otro en el que

iremos cogiendo cada una de esas velocidades ω_c por separado. El procedimiento a seguir a partir de aquí es el siguiente:

En primer lugar los bucles seleccionan el primer T_c y el primer ω_c (La posición (11)). Una vez hecho esto entramos en la función PatternSearch.

Una vez que estamos en la función PatternSearch con el ω_c y el T_c se cogen las filas de eficiencias del motor y del generador para el T_c que ha entrado en la función, junto con sus respectivas velocidades ω_s y ω_r . Con lo cual, dentro de la función tendríamos lo siguiente:



Lo primero que se hace ahora es seleccionar la primera velocidad en el sol [ω_{s1}] y se calcula [ω_r] que lleva asociado a la velocidad [ω_{c1}], cumpliendo con la relación (44):

$$\omega_r = \frac{(\rho + 1) \cdot \omega_c - \omega_s}{p} \quad (44)$$

Cuando ya tenemos [ω_{s11}] y [ω_{ra1}] calculamos las eficiencias que llevan asociadas para esas velocidades y el par T_c (calculando los equivalentes a T_s y T_r según la relación 15). Una vez que tenemos las eficiencias $\eta_{s(\omega_{s11})}$ y $\eta_{ra(\omega_{ra})}$ hallamos la potencia eléctrica consumida para este par de velocidades, usando la ecuación:

$$P_{el11} = \frac{T_c \cdot \omega_{s11}}{(1 + \rho) \cdot \eta_{s(\omega_{s11})}} + \frac{T_c \cdot \omega_{ra} \cdot \rho}{(1 + \rho) \cdot \eta_{ra(\omega_{ra})}} \quad (45)$$

Esta potencia eléctrica se almacena como [P_{el1}] y a continuación se coge la velocidad ω_{s2} y se hace el mismo proceso, es decir, se calcula la velocidad en el anillo asociada [ω_{ra2}] para la velocidad en el carrier con la que estamos trabajando en esta iteración [ω_{c1}], se determinan las eficiencias con los vectores que tenemos

dentro de la función y se calcula la nueva potencia eléctrica $[P_{el\ 2}]$. La función PatternSearch evalúa cuál es la menor potencia eléctrica y sacará el valor de la velocidad en el anillo $[\omega_{ra}]$ para esa potencia, que es lo que a nosotros nos interesa.

Esta primera velocidad del anillo es la óptima y se almacena en la tabla vacía que creamos antes en la posición 11.

$\omega_{ra\ 11}$	

Llegado a este punto la iteración finaliza y el bucle de velocidades pasa a la siguiente velocidad que sería $[\omega_{c\ 2}]$ realizando el mismo proceso. Cuando el bucle hace la misma operación con todas las velocidades $[\omega_c]$, el bucle de pares $[Tc]$ pasa a la segunda fila, que sería $[Tc\ 2]$, y así sucesivamente hasta completar toda la tabla de velocidades óptimas.

Tc₁	$\omega_{ra\ 11}$	$\omega_{ra\ 12}$
Tc₂	$\omega_{ra\ 21}$	$\omega_{ra\ 22}$
Tc₃	$\omega_{ra\ 31}$	$\omega_{ra\ 32}$
$\omega_{c\ 1}$		$\omega_{c\ 2}$

La siguiente figura muestra el resultado gráfico de la optimización, en el que se representa la velocidad $[\omega_r]$ en función del par $[Tc]$ y la velocidad $[\omega_r]$. Para cada iteración en la simulación el bloque acude a esta tabla con los datos de par y velocidad en el carrier y saca el valor de velocidad de giro del generador correspondiente. Si el par $[Tc]$ demandado está comprendido entre -260 y 260 el resultado será un $[\omega_r]$ optimizado y en caso contrario el valor de la velocidad del generador será nulo, indicando que el modo de funcionamiento tiene que ser el modo 1.

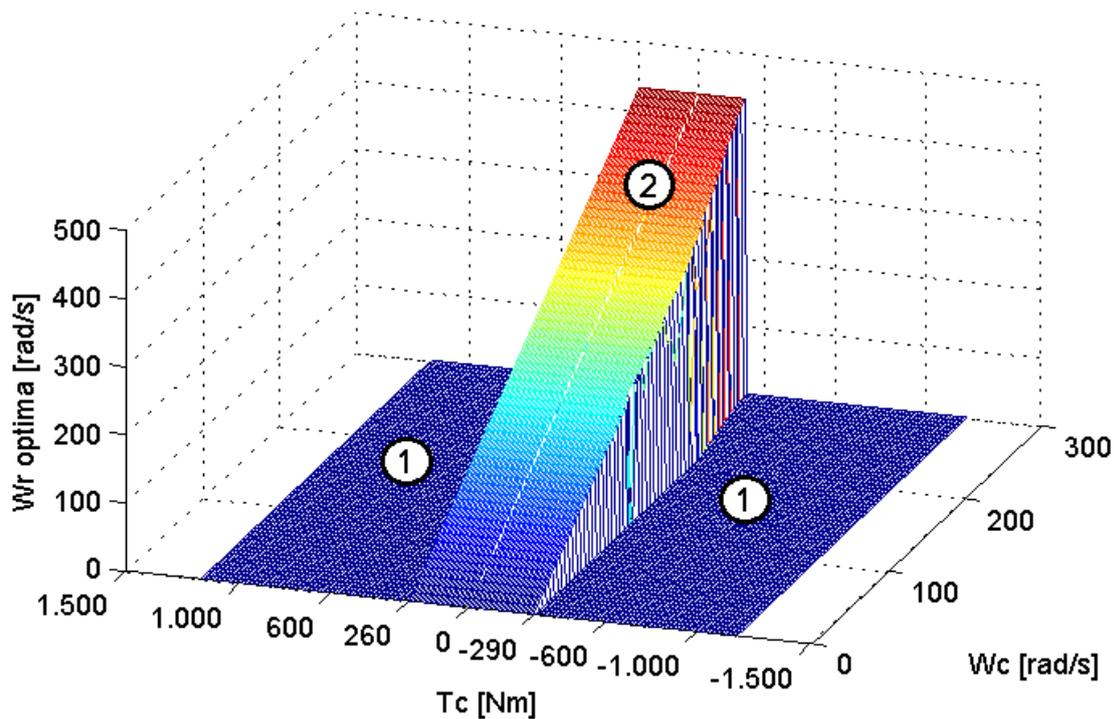


Figura 3.34. Resultado de la optimización para ω_r .

La siguiente figura muestra el resultado de la optimización $[\omega_r]$ tras haber aplicado las condiciones de la estrategia de de decisión (ver figura 3.28) para los modos 3 y 4. En ella se muestran qué $[\omega_r]$ corresponde a cada modo de funcionamiento. Como se observa, en tareas de impulsión cuando $[T_c > 0]$ el modo 4 solo entra cuando la velocidad en el carrier $[\omega_c]$ es mayor a 100 rad/s. Para una velocidad en el carrier menor a 100 y y el resto de pares y velocidades el vehículo se impulsa en modo 3. Para tareas de frenada el modo de operación es el modo 3* y en la figura se observa que la velocidad de giro de $[\omega_r]$ que es la del sistema independiente ENG - GEN gira a 100 rad/s que equivale al ralentí del motor de gasolina. Hay que recordar que este resultado no es fruto de la optimización directamente sino que se ha cogido la optimización y se le han aplicado las condiciones antes mencionadas.

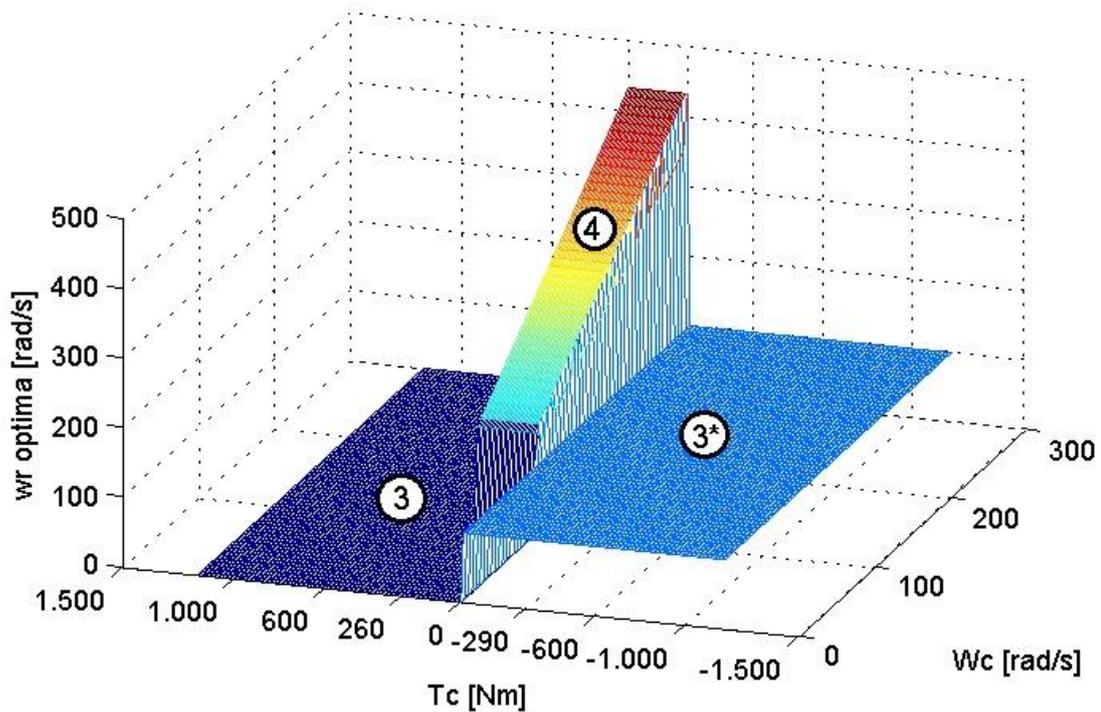


Figura 3.34. Velocidad $[\omega_r]$ para los modos 3 y 4

3.3.2 Otros vehículos propuestos

En este apartado se definen los vehículos que hemos empleado para comparar sus resultados de consumos de cada ciclo con nuestro Chevrolet Volt. Los vehículos son cuatro: Un eléctrico puro (EV), un híbrido en serie, el Volt sin el sistema de frenada regenerativa y un vehículo de gasolina. Los cuatro vehículos son adaptaciones de nuestro Volt y por tanto tienen las mismas máquinas pero dispuestas de distinta forma, respetando las prestaciones que son comunes para todos.

3.3.2.1 Vehículo eléctrico (EV)

Este vehículo es una adaptación en la que opera solo con el modo 1 del Volt, es decir, con el motor eléctrico. Queda por tanto suprimido el sistema ENG - GEN y con ello la posibilidad de recarga de la batería a partir de la gasolina, con lo que toda energía del vehículo procede del enchufe. La siguiente figura muestra un diagrama de la adaptación mecánica que se ha hecho a partir del Volt para simular un vehículo eléctrico puro:

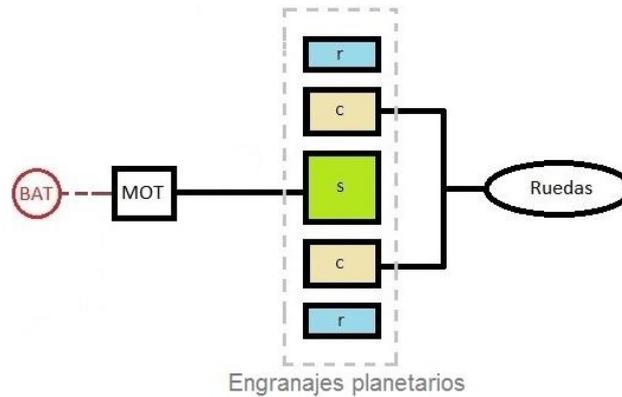


Figura 3.35. Transmisión del vehículo eléctrico (EV)

El anillo de la caja de engranajes planetarios queda bloqueado reduciendo el sistema a un grado de libertad, con lo cual, la relación sol - carrier - ruedas sigue siendo la misma que para el modo 1 (ver sección 3.2.1.1 *Características generales. Modo 1*).

3.3.2.2 Vehículo híbrido en serie

Se ha hecho también una adaptación del Chevrolet Volt para conseguir un híbrido en serie con la misma disposición que se muestra en la figura 2.3 del capítulo 2. La impulsión y la frenada se sigue realizando a través del motor eléctrico (equivalente al modo 1 del Volt) pero se mantiene el sistema ENG - GEN sin acoplar a la transmisión, por lo tanto, queda solo para funciones de recarga de la batería (equivalente al modo 3). La velocidad de rotación del sistema ENG - GEN se establece constante en 350 rad/s y el motor de gasolina entrega un par también constante de 95 N·m por las mismas razones por las que se usa en el modo 3 de nuestro Volt. La siguiente figura muestra la adaptación que hemos hecho a partir del Volt para conseguir simular el híbrido en serie:

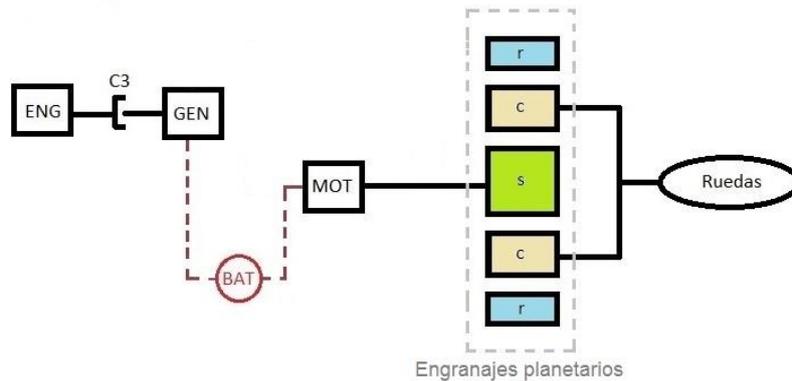


Figura 3.36. Transmisión del vehículo híbrido en serie.

La estrategia de control mostrada en la siguiente figura queda por tanto simplificada con respecto a la que hemos propuesto para el Chevrolet Volt, quedando además fuera de uso el bloque de la optimización.

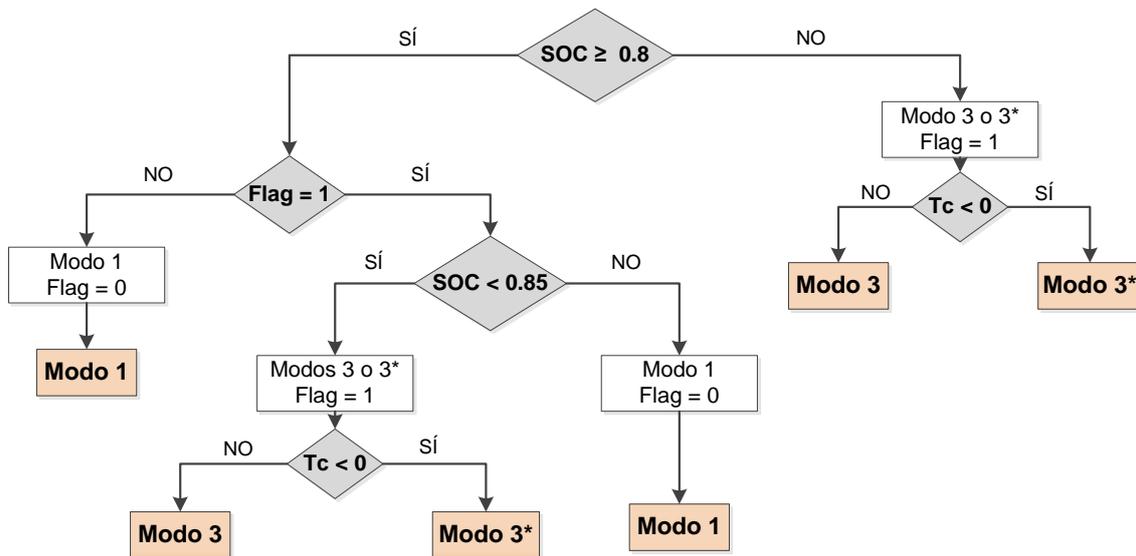


Figura 3.37. Estrategia de control para híbrido en serie

Como podemos ver en la figura el híbrido en serie también tiene modo 3* debido a que dispone al igual que el Volt del sistema de frenada regenerativa.

3.3.2.3 Chevrolet Volt sin frenada regenerativa

Esta es una adaptación a nuestro Volt original que hemos hecho para analizar las ventajas que tiene un vehículo con el sistema de frenada regenerativa que sea capaz de aprovechar la energía cinética de las frenadas para recargar la batería frente a otro vehículo que no lo tenga. El vehículo frena también con las

máquinas al igual que los demás pero ese par de frenada no genera ninguna potencia eléctrica. Este vehículo por tanto no dispone de modo 3*, pero sí que dispone de todos los demás modos. La figura 3.37 muestra la estrategia de control adaptada a nuestro Volt, que como se observa son ambas muy similares.

Al igual que el Volt original este vehículo necesita del bloque optimización para calcular ω_r en los modos 2 y 4, por lo tanto, sigue también el diagrama de la figura 3.34.

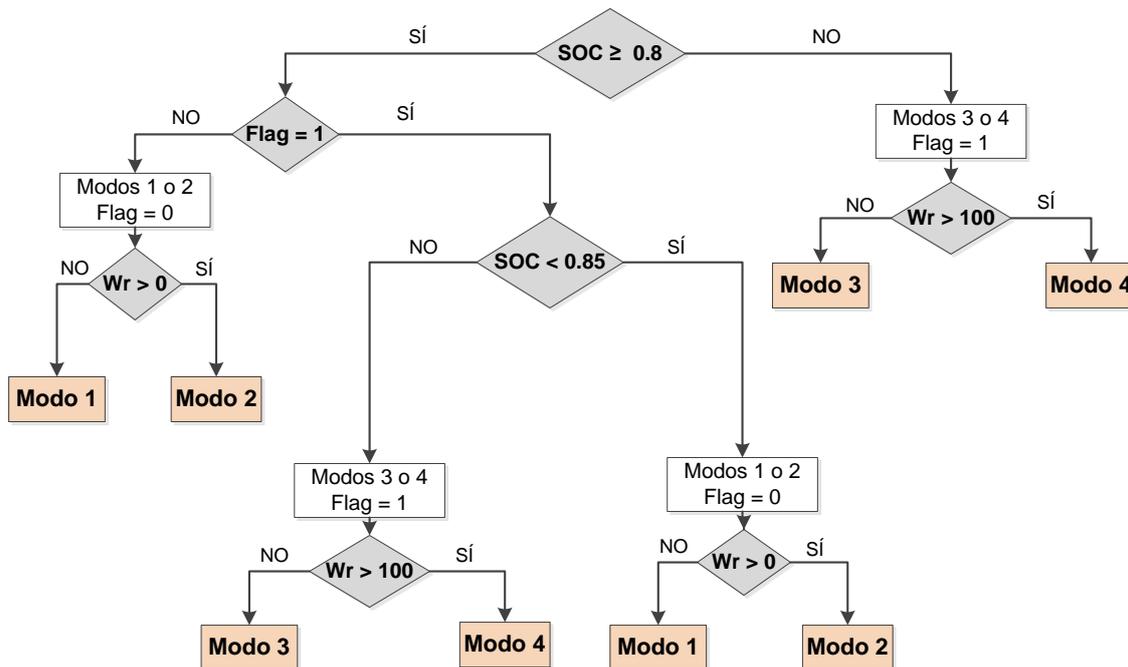


Figura 3.37. Estrategia de control Volt sin frenada regenerativa

3.3.2.4 Vehículos de gasolina

- **Adaptación del Chevrolet Volt**

Para comparar los consumos de energía de los vehículos anteriores con uno de gasolina hemos cogido el motor térmico del Chevrolet Volt original y lo hemos enganchado a la transmisión para que impulse el vehículo. El problema que nos surgió fue que el motor era demasiado pequeño y no tenía potencia para cumplir con las exigencias del circuito. La solución que adoptamos fue duplicar la capacidad de ese motor, pasando de una cilindrada de 1,4 l a 2,8 l. Por tanto, los datos de consumo que resulten de aquí corresponden al de un vehículo de una cilindrada mayor a los vehículos de la gama del Volt.

La figura 3.38 muestra un diagrama de cómo están conectadas las máquinas en esta adaptación.

Como se ve la transmisión ya no es igual que en los demás sino que el motor de gasolina se conecta directamente al carrier, por lo que la relación entre el par que da el motor y las ruedas es solo de 2,16.

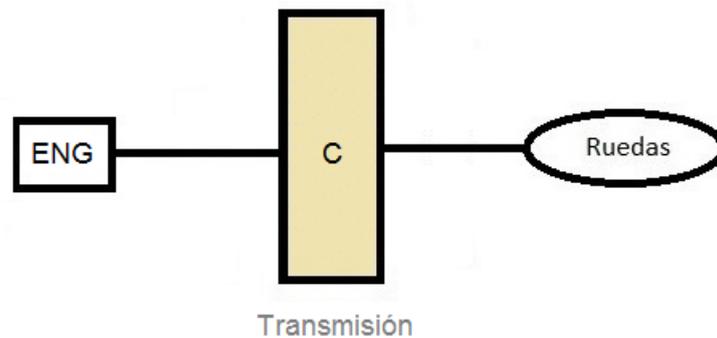


Figura 3.38. Transmisión del vehículo de gasolina.

- **Chevrolet Cruze**

Para tener otra referencia de consumos de un vehículo de gasolina, vamos a comparar los resultados del ciclo NEDC de nuestros vehículos con la información que ofrece Chevrolet para el Cruze en su página web [18]. Hemos escogido el Cruze 1.8 gasolina Auto, que está equipado con un motor de gasolina que ofrece unas prestaciones similares a nuestro Volt, es decir, una aceleración de 0 a 100 km/h igual al nuestro. Los datos que disponemos del vehículo son los siguientes:

Cilindrada [cc]	1796
Potencia máxima [kw/CV @ rpm]	(104/141 @ 6200)
Par máximo [N·m @ rpm]	(176 @ 3800)
Aceleración de 0 a 100 km/h [s]	10,5
Velocidad máxima [km/h]	195
Consumo combinado [l/100 km]	7,5
Emisiones CO ₂ [g/km]	174
Normativa	Euro V

El consumo combinado corresponde al ciclo NEDC en todos los catálogos que ofrecen las compañías automovilísticas por lo tanto, serán estos datos los que nos sirva de referencia para comparar los consumos con los otros vehículos.

3.3.3 Cálculo de costes económicos, emisiones y autonomías

Un aspecto muy importante a considerar en este proyecto es analizar cada consumo en términos económicos y ambientales, es decir, cuánto implica en euros y en emisiones de CO₂ la realización del vehículo en cada circuito. Para ello, calcularemos el coste en euros considerando tarifa de luz y gasolina actualizada y las emisiones de CO₂ que supone cada circuito. En este apartado explicaremos el proceso que seguiremos para el cálculo del coste y emisiones.

3.3.3.1 Coste económico

Nuestro vehículo tiene un coste eléctrico del enchufe y un coste de gasolina, por tanto, para calcular el coste total hay que calcular el coste de ambos.

Para el cálculo del coste eléctrico hemos tomado como dato el coste del kwh en España para el mes de diciembre de 2012 en una tarifa diaria normal. El procedimiento es el siguiente [15]:

La idea es que el coste eléctrico que a nosotros nos supone el circuito es el que nos falte por completar la batería al llegar al terminar de realizarlo, por tanto, lo que hacemos es calcular los kwh de electricidad que faltan para cargar completamente la batería cuando hemos realizado el ciclo completamente. Sabemos que la batería tiene una capacidad de 16 kwh. El estado de carga inicial de la batería es de 0.95 y sabemos el estado final de la batería tras realizar el circuito de conducción que ha sido obtenido a través de la simulación, con lo cual, mediante una regla de 3 obtendremos el coste eléctrico que ha supuesto la realización del ciclo:

$$Coste_{elec} = (0.95 - SOC_{final}) \cdot 16 [kwh] \cdot 0.146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] \quad (46)$$

Para el cálculo de la gasolina, solo tenemos que mirar el dato de litros de gasolina consumidos que ha calculado el simulador y aplicarle el coste del litro de gasolina 98. Este precio lo hemos cogido el 10 de diciembre de 2012 y es de 1.301 €/l [19].

$$Coste_{gas} = masa_{gas}[kg] \cdot \frac{1}{0.750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1.301 \left[\frac{€}{l} \right] \quad (47)$$

Como el simulador nos da el consumo de combustible en kg de gasolina, aplicamos una constante de conversión que se corresponde con la densidad de la gasolina (0,75 kg/l). Por tanto, en los casos en los que el consumo sea una combinación de electricidad y gasolina, el coste total es la suma del coste de ambos:

$$Coste_{total} = Coste_{elec} + Coste_{gas} \quad (48)$$

3.3.3.2 Emisiones de CO₂

Para que un vehículo pueda ser comercializado en Europa, sus emisiones tienen que cumplir con normas legislativas europeas, como ya apuntamos en el capítulo 2. El cálculo de las emisiones de CO₂ [15] es, al igual que el coste, una combinación de lo que se ha emitido para generar la electricidad que ha consumido el vehículo y lo que se ha emitido quemando la gasolina que ha consumido. Para el cálculo de emisiones de CO₂ vamos a utilizar los datos de la siguiente tabla:

Producción y distribución de gasolina (gCO ₂ / MJ de fuel)*	12,5	
Combustión de gasolina (gCO ₂ / MJ de fuel)*	73,4	
Producción de electricidad (gCO ₂ / MJ de energía)*	España	74,16
	Media Europea	94,7
	US	147,5
	China	207,8
	Media mundial	140

*Los datos de emisiones de CO₂ en la producción y distribución de gasolina y de la combustión de la gasolina han sido obtenidos de [23]. Los de producción de electricidad de [24]

En España el mix eléctrico, que es el factor de emisión de CO₂ atribuible al suministro eléctrico es de 74,16 gCO₂/MJ en 2011. (Datos proporcionados por IDAE) [20].

Sabemos que la energía que almacena en total la batería es de 16 kwh (57,6 MJ). La energía eléctrica procedente del enchufe que se requiere para

realizar el circuito es la que tendremos que recargar una vez realizado éste, por tanto, calculamos el porcentaje de batería que tendríamos que recargar restando al máximo de la batería el estado final de carga.

Para el cálculo de las emisiones de gasolina, utilizaremos los datos de energía consumida procedente de la gasolina que hemos obtenido en el simulador y le aplicamos los datos de la tabla anterior.

Basándonos en que el ciclo NEDC recorre **11,07 km**, el Artemis Highway **29.55 km** y el VAINRAIL **139.56 km** y en los datos de emisiones de CO₂/MJ de la tabla, podemos calcular las emisiones de cada vehículo en los tres circuitos:

$$E_{elec}: (0.95 - SOC_{final}) \cdot 57,6 [MJ] \cdot mix_{elec} \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = [gCO_2] \quad (49)$$

$$E_{PDgas}: (gas_{consum} [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = [gCO_2] \quad (50)$$

$$E_{gas}: (gas_{consum} [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = [gCO_2] \quad (51)$$

$$E_{total}: (E_{elec} + E_{PDgas} + E_{gas}) [gCO_2] \cdot \frac{1}{Distancia [km]} = \left[\frac{gCO_2}{km} \right] \quad (52)$$

3.3.3.3 Autonomías

Para el cálculo de la autonomía utilizaremos los datos de MJ/km tanto de gasolina como de electricidad que nos proporciona el simulador.

En primer lugar calculamos cuántos megajulios son capaces de almacenar la batería (de la batería solo se aprovecha un 70%) y el tanque de gasolina.

$$Batería: 16 \text{ kwh} \cdot 3,6 \frac{MJ}{kwh} = 57,6 MJ_{elect} \cdot 0,7 = 40,3 MJ_{elect} \quad (53)$$

$$Tanque: 35,2 \text{ l} \cdot 32 \frac{MJ}{l} = 1224 MJ_{gas} \quad (54)$$

Con estos datos y con los de MJ/km de cada uno hallamos la autonomía eléctrica procedente del enchufe de la batería y la autonomía que proporciona el tanque de gasolina:

$$\frac{Capac_{bateria} [MJ_{elec}]}{Consumo_{elec} \left[\frac{MJ}{km} \right]} = Autonomía_{elec} [km] \quad (55)$$

$$\frac{Capac_{tanque} [MJ_{gas}]}{Consumo_{gas} \left[\frac{MJ}{km} \right]} = Autonomía_{gas} [km] \quad (56)$$

$$Autonomía_{total} = Autonomía_{elec} + Autonomía_{gas} [km] \quad (57)$$

En los casos en los que no haya sido necesario un consumo de gasolina para realizar el circuito, el dato de $Consumo_{gas}$ se obtiene con la media de ese consumo para los otros dos circuitos.

4. Resultados y discusión

Donde se presentan de forma lógica los resultados obtenidos así como una interpretación y discusión de los resultados y su significado.

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos por el simulador para los distintos vehículos y ciclos de conducción. El capítulo se divide en tres partes:

En primer lugar se exponen los resultados referentes a nuestro Chevrolet Volt, tanto en los test económicos como en los de aceleración.

En segundo lugar analizamos y comparamos desde un punto de vista de ahorro energético los resultados de los otros vehículos propuestos que hemos descrito en el capítulo anterior para cada ciclo de conducción, tomando como referencia nuestro Volt.

Por último comparamos uno por uno más detenidamente nuestro Volt con el híbrido, el Volt sin frenada regenerativa y el eléctrico para analizar cuáles son las ventajas de los sistemas y de la estrategia de control de que dispone nuestro vehículo frente a otros que no lo tienen.

Todas las simulaciones de todos los vehículos se han obtenido utilizando las siguientes constantes:

C0	Coeficiente de carga carretera [N]	105,95
C1	Coeficiente de carga carretera [N/(m/s)]	0
C2	Coeficiente de carga carretera [N/(m/s) ²]	0,434
rtire	Radio de los neumáticos [m]	0,33
intire	Inercia de una rueda [kg·m ²]	0
mass	Masa total del vehículo [kg]	1812

Hay que señalar que los coeficientes C0, C1 y C2 corresponden a los coeficientes de la carretera utilizados para el cálculo de la fuerza de tracción:

$$f_{trac} = c2 \cdot V_{veh}^2 + c1 \cdot V_{veh} + c0 \quad (58)$$

Los costes económicos han sido solo calculados para España.

Los resultados de emisiones han sido calculados a partir de los datos de mix eléctrico y de producción de gasolina para España, Europa, Estados Unidos, China y también según la media mundial.

4.2 Resultados del Chevrolet Volt

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos por la simulación para el Chevrolet Volt que lleva nuestra optimización. Se enfocará a comparar los resultados para cada ciclo de conducción y valorar cómo se comporta el vehículo en cada uno de ellos. Además se mostrarán los resultados obtenidos en los test de aceleración para valorar las prestaciones de nuestro vehículo.

4.2.1 Test Económico

En este apartado presentaremos los resultados obtenidos a través del simulador para los ciclos de conducción NEDC (*New European Driving Cycle*), Artemis Highway y para el ciclo de conducción de NREL a Vail. (ver sección 3.2.2.1 *Ciclos de conducción*).

El objetivo de estas pruebas es simular el gasto de energía tanto eléctrica como de gasolina empleado para la realización de las mismas y poder así valorar el comportamiento de nuestro vehículo en términos de eficiencia. Además realizaremos una estimación de su autonomía, del coste que supone para el usuario realizar cada prueba y calcularemos las emisiones de CO₂ que ello supone.

Al final presentaremos una tabla final con los resultados más representativos para comparar el comportamiento del vehículo para cada ciclo de conducción.

4.2.1.1 Ciclo de conducción NEDC (*New European Driving Cycle*)

Este ciclo es el de referencia para todos los vehículos que se quieran comercializar en Europa. El consumo y emisiones que resultan de este ciclo es el que presentan las compañías automovilísticas en las especificaciones técnicas en los catálogos de sus vehículos. Estos consumos corresponden a consumos mixtos,

ya que el ciclo simula a la vez un recorrido urbano y extraurbano. A nosotros nos va a servir para ver cómo se comporta el coche en circuitos urbanos y sobretodo analizar cómo realiza los cambios entre los modos 1 y 2, ya que van a ser los que más se usen para este circuito.

Los resultados de consumo, coste y emisiones obtenidos para nuestro vehículo en el ciclo NEDC son los siguientes:

Energía total [MJ]	4,182
Energía total por km [MJ/km]	0,380
Estado de la batería final [%]	87,42
Litros a los 100 km	-
Coste económico [€]	0,177
Autonomía [km]	876

Emisiones de CO ₂ para el ciclo NEDC [gCO ₂ /km]	
España	29,4
Europa	37,6
Estdos Unidos	58,3
China	82,5
Mundo	55,6

Las emisiones obtenidas en el ciclo NEDC son las que se toman como referencia para ver si se cumple con la normativa de emisiones europea. Nuestro objetivo ha sido lograr unas emisiones de CO₂ en el ciclo NEDC, usando para el cálculo datos en Europa, que estuvieran por debajo de 120 g/km, tal y como se exigió para vehículos de nueva matriculación en el año 2012 en la comisión europea COM 2007/19 [17]. Para el ciclo NEDC las emisiones de CO₂ en Europa que lleva asociada la producción de la electricidad que el vehículo ha consumido han sido de 37,6 g/km, por lo tanto se logra satisfactoriamente el objetivo marcado.

La figura 4.1 se muestra la evolución del estado de carga de la batería, el consumo energético acumulado en mega julios y la velocidad del vehículo a lo largo de todo el recorrido.

Como podemos observar en la última gráfica, el vehículo cumple en todo momento con la velocidad que le exige el ciclo NEDC. Lógicamente el estado de carga está muy ligado al consumo de energía, de tal forma que la gráfica de una es la inversa a la otra. Observamos que el gran salto de consumo de energía se

produce a partir del segundo 800, donde empieza la zona extraurbana del ciclo con velocidades superiores a 50 km/h.

La línea de puntos de puntos negra que indica el 94% en la gráfica de estado de carga, marca el límite a partir del cual empieza el aprovechamiento de la energía de la frenada. Como se observa, la energía eléctrica producida por la frenada no tiene mucha incidencia hasta la zona extraurbana, debido a que hasta este punto el ciclo simula un circuito urbano en el que las velocidades no superan los 50 km/h. En cambio en la zona extraurbana ese aprovechamiento se hace más notable, sobre todo cuando el vehículo alcanza los 120 km/h y frena hasta detenerse. Es en esta frenada en la que más se hace notar y en la que se consigue generar más energía a partir de ella, llegando a ganar hasta 2 puntos de estado de carga.

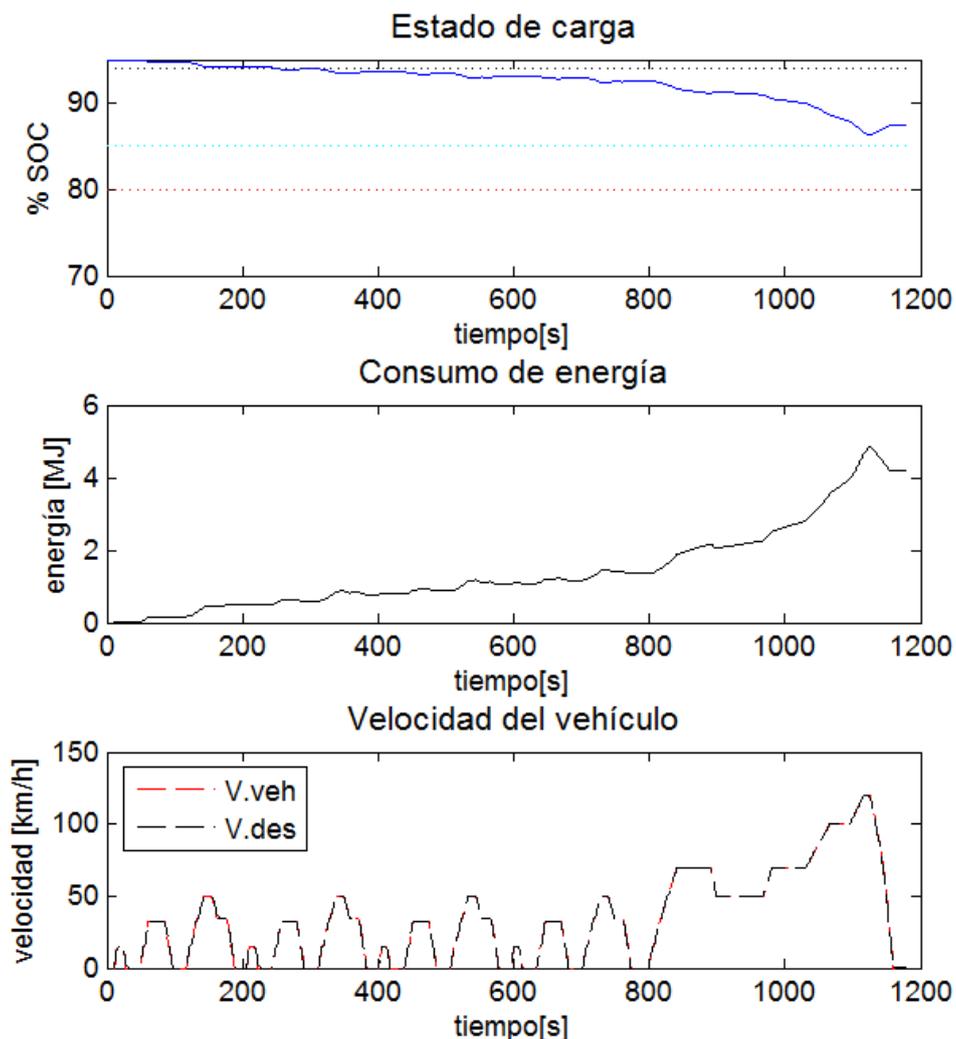


Figura 4.1. Estado de carga, Consumo de energía y velocidad del vehículo en ciclo NEDC

En la siguiente figura vemos los modos de funcionamiento en los que opera el vehículo en función de la velocidad a la que circula:

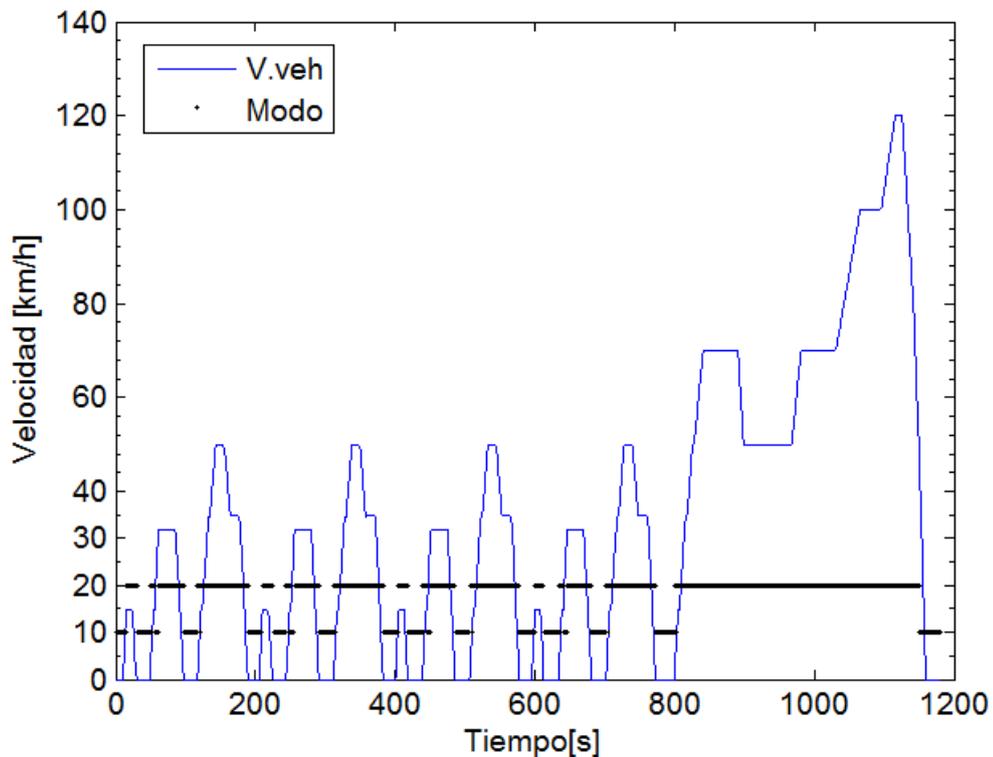


Figura 4.2. Modos de funcionamiento del vehículo en el ciclo NEDC

A simple vista se observa que el vehículo funciona en modo 1 cuando está parado y sólo en algunas de las aceleraciones y frenadas. En cambio cuando el vehículo ha alcanzado una cierta velocidad o realiza variaciones de velocidad de forma lenta, el modo de operación es el modo 2. Para ver mejor estas situaciones la siguiente figura muestra una aceleración que corresponde con un intervalo de tiempo que va desde el segundo 435 hasta el 455. En estos 20 segundos el vehículo acelera de 0 a 50 km/h y es por tanto una aceleración lenta. En la figura de la izquierda se representa la velocidad del vehículo junto con los modos de funcionamiento (10 equivale a modo 1 y 20 a modo 2) y en la figura de la derecha se representa el par demandado en el carrier [T_c] también con los modos de funcionamiento (100 es modo 1 y 200 modo 2).

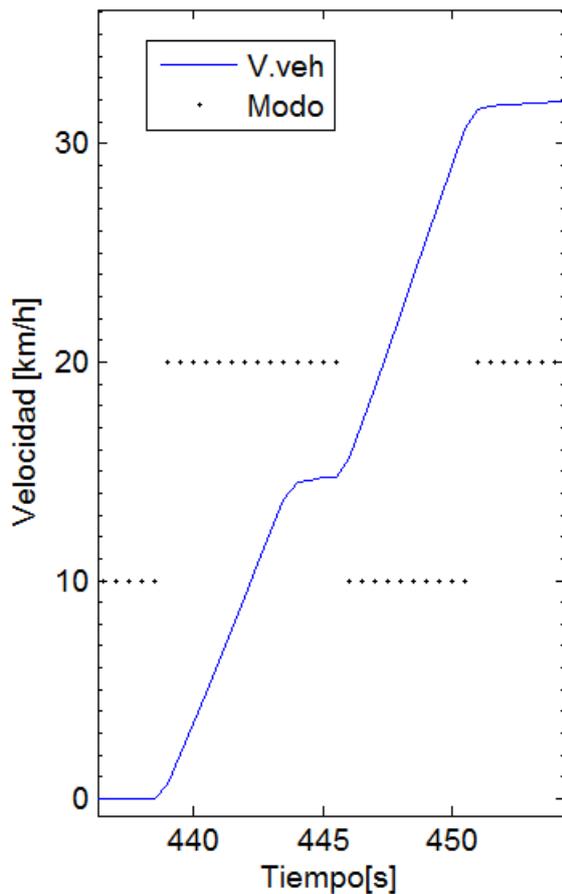


Figura 4.3.a. Velocidad

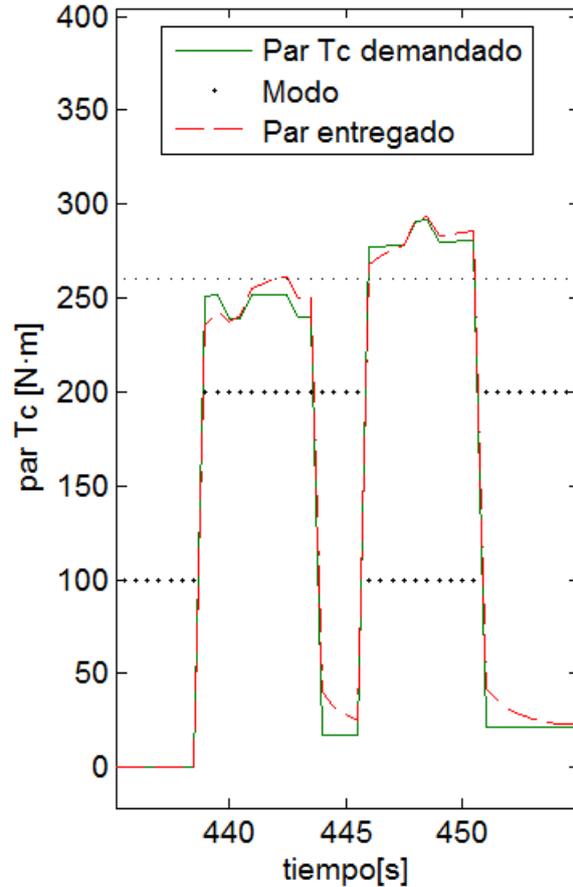


Figura 4.3.b. Par demandado y entregado

Si observamos la gráfica de velocidad vemos que en un principio el vehículo está parado, y operando en modo 1. En el momento en que empieza la aceleración, vemos en la gráfica de par de la derecha que el par demandado no supera los 260 N·m, por lo tanto el vehículo cambia al modo 2, tal y como establecimos en el bloque Estrategia de control (ver sección 3.3.1 *Estrategia de control del Chevrolet Volt*). La aceleración se completa en dos partes, y se puede ver que en la segunda parte se está exigiendo una aceleración mayor, siendo el par demandado superior a los 260 N·m, con lo cual, el control cambia a modo 1 para completar la aceleración. Una vez alcanzada la velocidad deseada (en $t = 452$) ya no es necesario tanto par y éste disminuye a 20 N·m, cambiando de nuevo al modo 2. Éstos resultados nos muestran que efectivamente los modos de funcionamiento son acordes a lo establecido en la estrategia de control.

Un detalle a tener en cuenta en la entrega de par es que el motor eléctrico no da el par exactamente como se demanda sino que, como podemos observar en la figura 4.3.b. de la derecha, la reacción de la máquina es más lenta, y de ahí a que la curva roja de par entregado sea más curvada en los cambios bruscos de par que la curva de demanda.

Otro aspecto a tener en cuenta es cómo se ha comportado el vehículo en cuanto a consumo y recarga de potencia eléctrica y si se ha tenido que limitar el par en algún momento, ya que es importante de cara a la conservación de la batería. La figura 4.4 nos muestra la evolución de consumo y recarga de la batería a lo largo del ciclo.

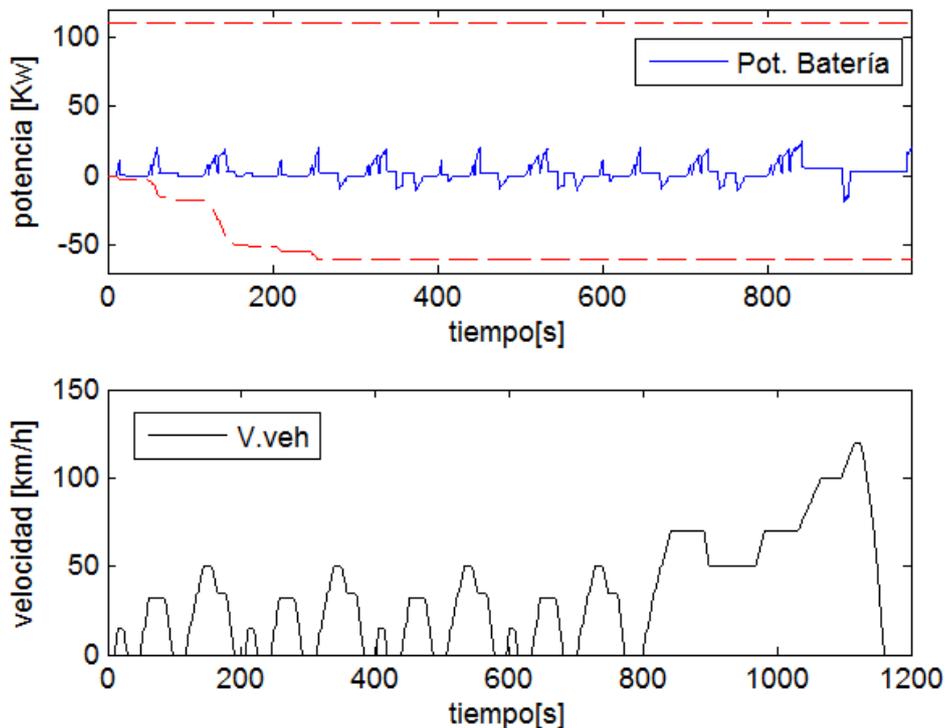


Figura 4.4. Evolución de la potencia eléctrica de la batería para el ciclo NEDC

Las líneas rojas de la gráfica de potencia indican los límites por el cual se satura la batería, tanto para la descarga, establecido en 110 Kw, como para la carga, -60 Kw. Un detalle es que el límite para la carga no es constante en -60 Kw en todo el recorrido sino que va en función del estado de carga. Esto se debe a que al principio, cuando la batería está completamente llena no sería posible recargarla porque superaría su límite máximo de carga (95%), por tanto, a medida que se va gastando la batería se va aumentando su capacidad de recarga hasta que llega a

su máxima capacidad (-60 Kw) en el segundo 250. Si miramos la figura 4.1 de estado de carga en este instante coincide con el mismo en que el estado de carga llega al 94%. Como se observa, en ningún momento del ciclo el consumo o la carga de la batería llega a los límites de saturación, con lo cual, podemos concretar que en todo momento se entregó todo el par que se pedía.

Estos resultados son propios de los circuitos urbanos donde las velocidades son bajas y en los que no se producen frenadas muy prolongadas. Es por ello por lo que el vehículo ha estado operando continuamente en los modos 1 y 2, y ha conseguido realizar los 11 km del circuito finalizando con un 87 % de carga, con lo que no ha sido necesaria la intervención de energía procedente de la gasolina, sino que toda la energía empleada procedía del enchufe. Además su autonomía para este circuito está estimada en 870 km.

4.2.1.2 Ciclo de conducción Artemis highway

Este ciclo nos servirá para medir el consumo del vehículo en carretera. Además podemos analizar los modos de operación para aceleraciones y frenadas, ya que en algunas ocasiones se va a exigir un alto par tanto positivo como negativo. Veremos también como cambia el vehículo entre los modos 1 y 2 y entre los modos de carga 3 3* y 4.

Los resultados generales referentes a consumo, emisiones y coste de nuestro vehículo para el ciclo Artemis Highway son los siguientes:

Energía total [MJ]	55,82
Energía total por km [MJ/km]	1,890
Estado de la batería final [%]	83,44
Litros a los 100 km	4,520
Coste económico [€]	2,01
Autonomía [km]	927

Emisiones de CO ₂ para el ciclo Artemis highway [gCO ₂ /km]	
España	141,0
Europa	145,7
Estados Unidos	157,6
China	171,5
Mundo	156,0

En el ciclo Artemis las emisiones totales son una combinación entre las que han producido la quema de gasolina y las que lleva asociada la producción de electricidad que se ha gastado. Las emisiones de CO₂ de nuestro vehículo en este ciclo han sido de 145,7 g/km en Europa. En este ciclo ya no es obligatorio que las emisiones estén por debajo de 120 g/km puesto que el ciclo no es de referencia para ello. Hay que señalar que este ciclo simula 29 km de vía rápida reales. En el siguiente apartado compararemos esto con otros vehículos.

A continuación se muestran todos los datos de energía consumida, tanto eléctrica como de gasolina:

Energía eléctrica	Total [MJ]	6,00	Energía procedente de la gasolina	Total [MJ]	49,82
	Por km [MJ]	0,20		Por km [MJ]	1,69
	MJ a los 100 km	20,32		MJ a los 100 km	168,7

Energía total	Total [MJ]	55,82
	Por km [MJ]	1,89
	MJ a los 100 km	189,03

Para realizar el circuito de acuerdo a la exigencia de velocidad de forma satisfactoria el vehículo consumió 6 MJ de energía eléctrica procedente de la batería. Pero para proporcionar la autonomía suficiente para conseguirlo el vehículo empleó 49,82 MJ más procedente de la gasolina. En total el circuito supuso un gasto de 55,8 MJ. Estos datos de consumo serán comparados en el siguiente apartado con los obtenidos de los vehículos descritos en la sección 3.3.2 *Otros vehículos propuestos*, y nos servirá para justificar las mejoras que suponen este vehículo y su estrategia de control.

A continuación analizaremos las gráficas de estado de batería, modos de funcionamiento y potencia eléctrica consumida al igual que para el ciclo NEDC.

La siguiente figura muestra la evolución del estado de carga de la batería, el consumo de energía en mega julios y la velocidad del vehículo a lo largo de todo el recorrido.

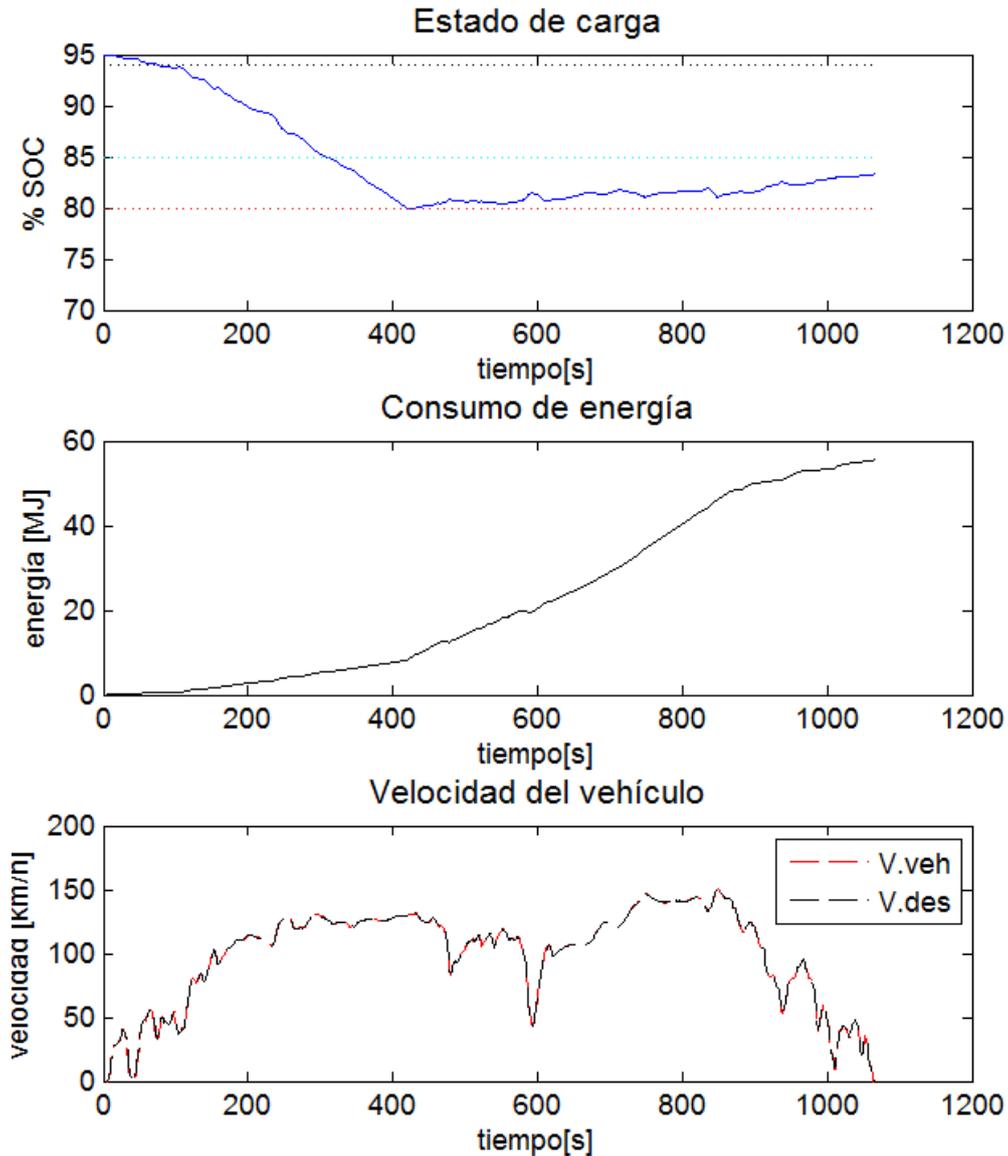


Figura 4.5. Estado de carga, consumo de energía y velocidad del vehículo en ciclo Artemis Highway

En la gráfica de estado de carga de la batería vemos que se va descargando hasta que llega al 80 % (línea roja) en el segundo 420. A partir de este punto el vehículo cambia a los modos de carga coincidiendo con el aumento de la pendiente en la gráfica de consumo. La tendencia del estado de carga a partir de este momento es siempre ascendente salvo en algunos intervalos pequeños en los que el vehículo consume más de lo que carga, ya que en algunos casos el vehículo alcanza casi los 150 km/h. Como se observa, la recarga se realiza de forma lenta y no se llega a alcanzar el 85% en el que pararía de recargar. Se ha optado por esta estrategia porque es más eficiente que la de recargar la batería en

poco tiempo, tal y como veremos en la sección 4.4.2 *Volt vs Híbrido* donde comparamos un vehículo con modo 4 y otro sin modo 4.

En la siguiente figura veremos con qué modos de funcionamiento afronta el vehículo las exigencias de este circuito en cada momento:

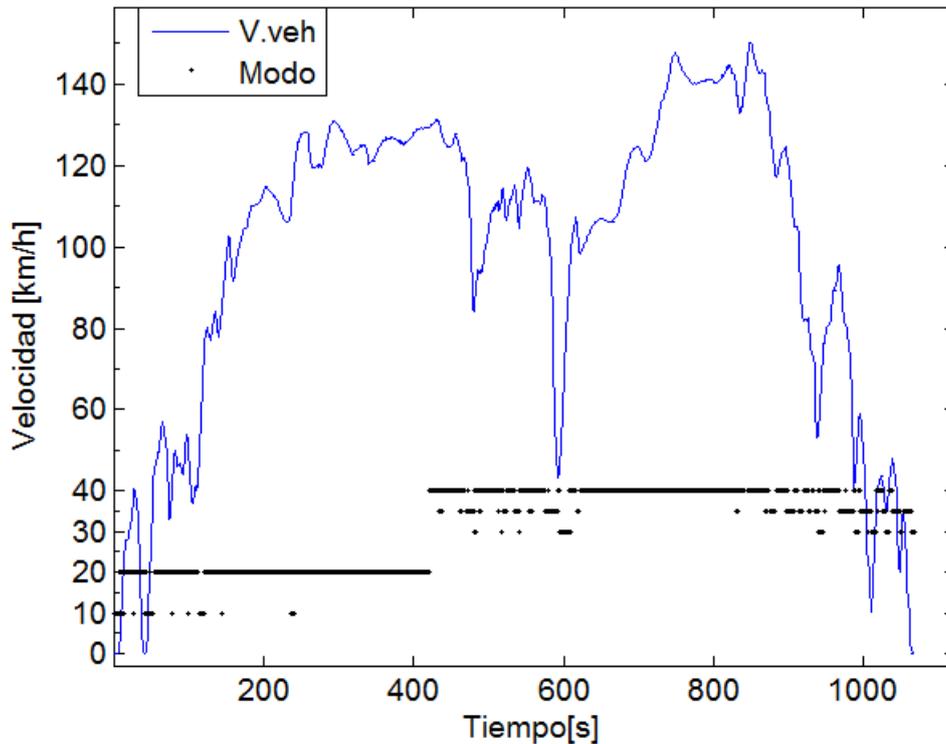


Figura 4.6. Modos de funcionamiento del vehículo en el ciclo Artemis Highway

En esta gráfica vemos la velocidad del vehículo en cada instante y su modo de funcionamiento. Observamos que hasta el segundo 420, la estrategia va intercalando modo 1 y 2 en función de la necesidad. Para las aceleraciones modo 1 si estas implican un par en el carrier de más de 260 N·m, y en modo 2 en el caso contrario. A partir del segundo 420 donde el estado de carga llega al 80% el vehículo pasa a operar entre los modos de recarga. Cuando se trata de aceleraciones si el par supera los 260 N·m el modo de actuación es el modo 3 (30) y en caso contrario el modo 4 (40). Para las frenadas el modo en el que opera el vehículo es el 3* (35). A continuación veremos algunos casos concretos en los que el vehículo cambie entre los modos 3, 3* y 4 y que pueden ser representativos.

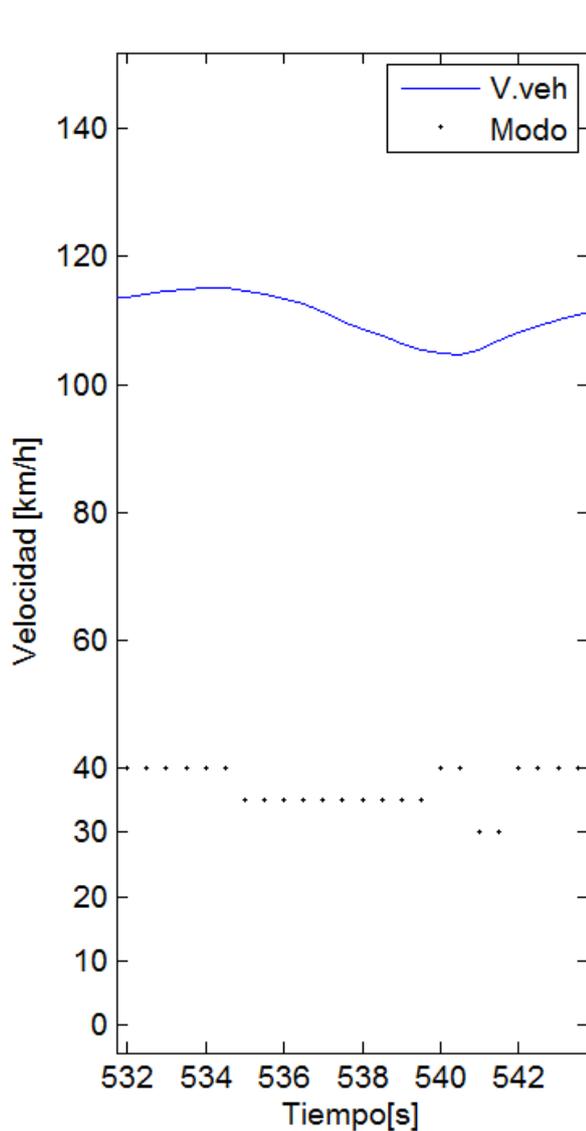


Figura 4.7.a. Velocidad

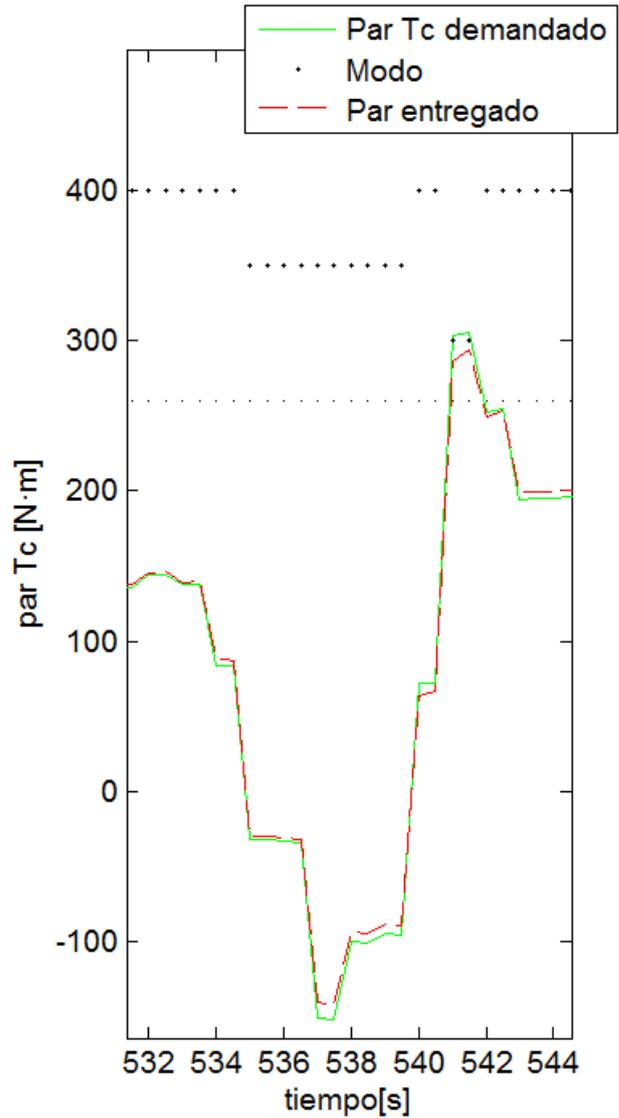


Figura 4.7.b. Par demandado y entregado

El intervalo comprende entre los segundos 535 y 544 en los que se representa una frenada y una aceleración. Puesto que esto sucede a partir del segundo 420 nos encontramos en el tiempo en el que el vehículo se está recargando y por lo tanto los modos de operación se mueven entre los modos 3, 3* y 4. En un principio, el vehículo sigue un régimen de marcha en el que se intenta mantener una velocidad ya alcanzada, con lo cual el par que se exige es inferior a 260 N·m, y el vehículo opera en modo 4. Cuando $t = 535$ se demanda una frenada y la estrategia cambia a modo 3* en el que se mantiene el motor arrancado, a ralentí y entregando un par nulo ($T_{eng} = 0$) para seguir recargando la batería con lo

que se genere en la frenada. Cuando el par demandado deja de ser negativo en el segundo 439 aproximadamente y se demanda un par positivo para impulsar al vehículo se evalúa si éste es mayor a 260 N·m y como no lo es, la estrategia opta por el modo 4 de funcionamiento. Pero entre los segundos 540 y 542 se da el caso de que el par que se demanda sí que es mayor a 260 con lo cual, como se observa en la gráfica de pares de la derecha, la estrategia cambia al modo 3 durante este intervalo de tiempo para después volver al modo 4 y continuar con la velocidad alcanzada.

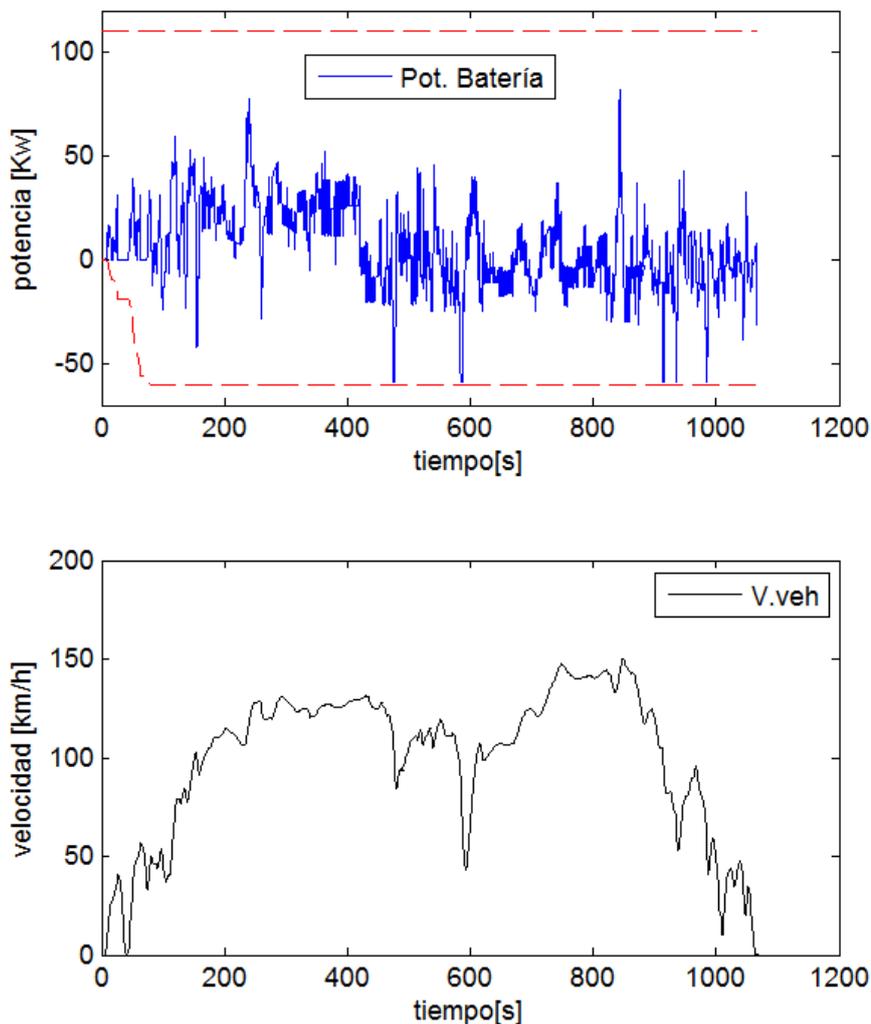


Figura 4.8. Evolución de la potencia eléctrica de la batería para el ciclo Artemis Highway

Por último es interesante echar un vistazo a la evolución de la potencia eléctrica que ha entrado y salido de la batería a lo largo de todo el circuito, ya que existen frenadas considerablemente fuertes. (Figura 4.8). En este circuito, dado que

las velocidades son altas y las aceleraciones y frenadas rápidas, los pares que se demandan son elevados y en consecuencia las potencias que entran y salen de la batería también lo son. Esto incide especialmente en las frenadas y, como se ve en varios puntos en la figura 4.8, la potencia de carga es superior a los 60 Kw y tiene que actuar el limitador de potencia. En la gráfica siguiente podemos ver un claro ejemplo de cómo actúa el limitador de potencia en una frenada que alcanza el límite de saturación, por ejemplo en $t = 470$.

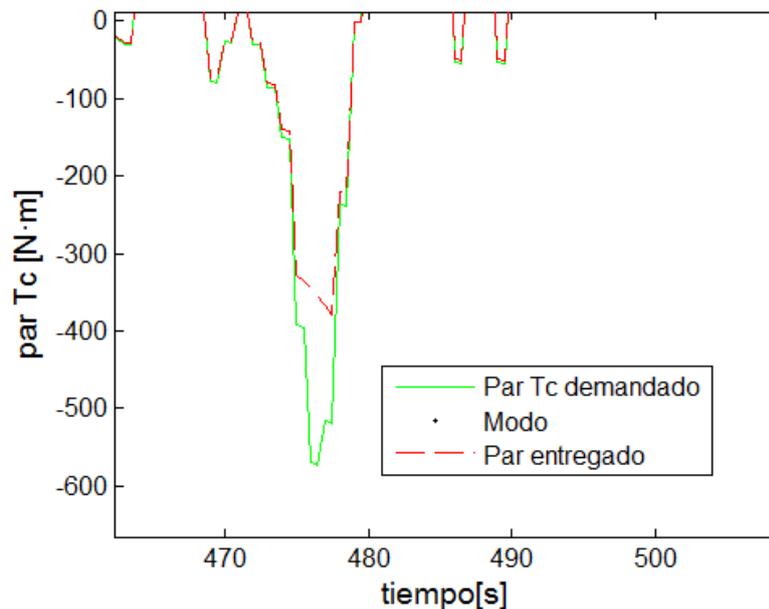


Figura 4.9. Limitación de potencia.

La línea de puntos verde que indica el par demandado le exige un par cercano a -600 pero el limitador de potencia actúa y lo limita a -320 N·m. Vemos que la limitación no es constante sino que primero limita a -320 N·m y luego a casi -400; esto se debe a que el motor está disminuyendo su velocidad de giro y hace que pueda aumentar el par entregado (en este caso negativo). La limitación de par en la impulsión se realiza de la misma forma que para la frenada pero limitando a 110 Kw.

4.2.1.3 Ciclo de conducción de NREL a Vail

En este ciclo de conducción le daremos más importancia al estudio de la evolución del estado de carga de la batería que a los modos de funcionamiento, ya

que sus modos de operación van a cambiar frecuentemente entre los modos de recarga y los modos eléctricos.

Los resultados generales referentes a consumo, emisiones y coste de nuestro vehículo para el ciclo de NREL a Vail son los siguientes:

Energía total [MJ]	213,2
Energía total por km [MJ/km]	1,528
Estado de la batería final [%]	86,44
Litros a los 100 km	4,03
Coste económico [€]	7,53
Autonomía [km]	2255

Emisiones de CO ₂ para el ciclo Artemis highway [gCO ₂ /km]	
España	113,5
Europa	114,3
Estados Unidos	116,2
China	118,3
Mundo	116

Al igual que el ciclo Artemis, el ciclo de NREL a Vail tampoco está homologado y por lo tanto las emisiones no sirven como referencia para nuestro vehículo. Observamos que las emisiones de nuestro Volt para este circuito son de 114,3 g/km ligeramente más bajas que en el ciclo Artemis. Esto es debido a que en el ciclo de NREL a Vail, una parte se hace con pendiente positiva y otra con pendiente negativa. Las pendientes negativas ayudan a realizar una recarga de la batería más rápida y efectiva, lo que hace que los modos eléctricos puros (1 y 2) tengan una mayor incidencia a lo largo del recorrido del circuito, reduciendo así el consumo de energía procedente de la gasolina.

A continuación se muestran todos los datos de energía consumida, tanto eléctrica como de gasolina:

Energía eléctrica	Total [MJ]	3,31	Energía procedente de la gasolina	Total [MJ]	209,9
	Por km [MJ]	0,024		Por km [MJ]	1,5
	MJ a los 100 km	2,37		MJ a los 100 km	150

Energía total	Total [MJ]	213,24
	Por km [MJ]	1,53
	MJ a los 100 km	152,8

Para completar los casi 140 km de recorrido, ha sido necesario echar mano de nuestra fuente de energía auxiliar para recargar la batería en momentos puntuales, gastándose de ésta unos 210 MJ en total. En cambio, el gasto de energía eléctrica del vehículo por kilómetro es el más bajo en las tres pruebas realizadas. Esto se debe a que gran parte del circuito se hace cuesta abajo y durante estos tramos no se está consumiendo nada de energía, de ahí el dato de autonomía tan alto para este circuito. Además también se hace notar la importancia que tiene en este circuito el aprovechamiento de las frenadas. Aprovechando la frenada para generar energía, estamos usando al bajar la energía que hemos empleado antes para subir sin desperdiciar esa energía cinética en el freno mecánico. En el apartado 4.4.1 compararemos en este circuito el comportamiento de nuestro vehículo con frenada y sin frenada y analizaremos las ventajas de tener este sistema frente a no tenerlo.

En la gráfica de estado de carga de la figura 4.10 se puede observar cómo evoluciona la batería. Cuando se hace la primera descarga y llega al 80% se activan los modos de recarga (generalmente el modo 4) pero, debido a que coincide con un tramo de pendiente positiva no logra remontar la tendencia y sigue consumiéndose más de lo que se puede recargar, llegando así el estado de carga al 75%. Una vez que se ha superado este tramo antes del segundo 1000 la potencia de carga vuelve a ser superior a la consumida y el estado de carga sube hasta el 85%, momento en el cual pasa de nuevo a los modos eléctricos 1 o 2 según convenga. Hasta ahora no habíamos podido comprobar este caso, ya que en el ciclo NEDC no se llegaba a descargar más del 87 % y en el Artemis la recarga se realiza de forma más lenta y no alcanzaba el 85%. Posteriormente entre los segundos 2500 y 3000 se produce de nuevo el gasto de energía que implica la segunda subida del circuito. En este caso, el estado de carga llega a estar incluso por debajo del 70%. Verificamos así la necesidad de establecer los límites de carga entre el 80 y el 85% para tener flexibilidad y suficiente margen de seguridad para no gastar por completo la batería en situaciones como ésta.

Hay que resaltar que los casos en los que la potencia de carga no puede hacer frente al consumo solo se producen en casos muy puntuales en los que la velocidad y demanda de par es muy alta, debido a pendientes agudas.

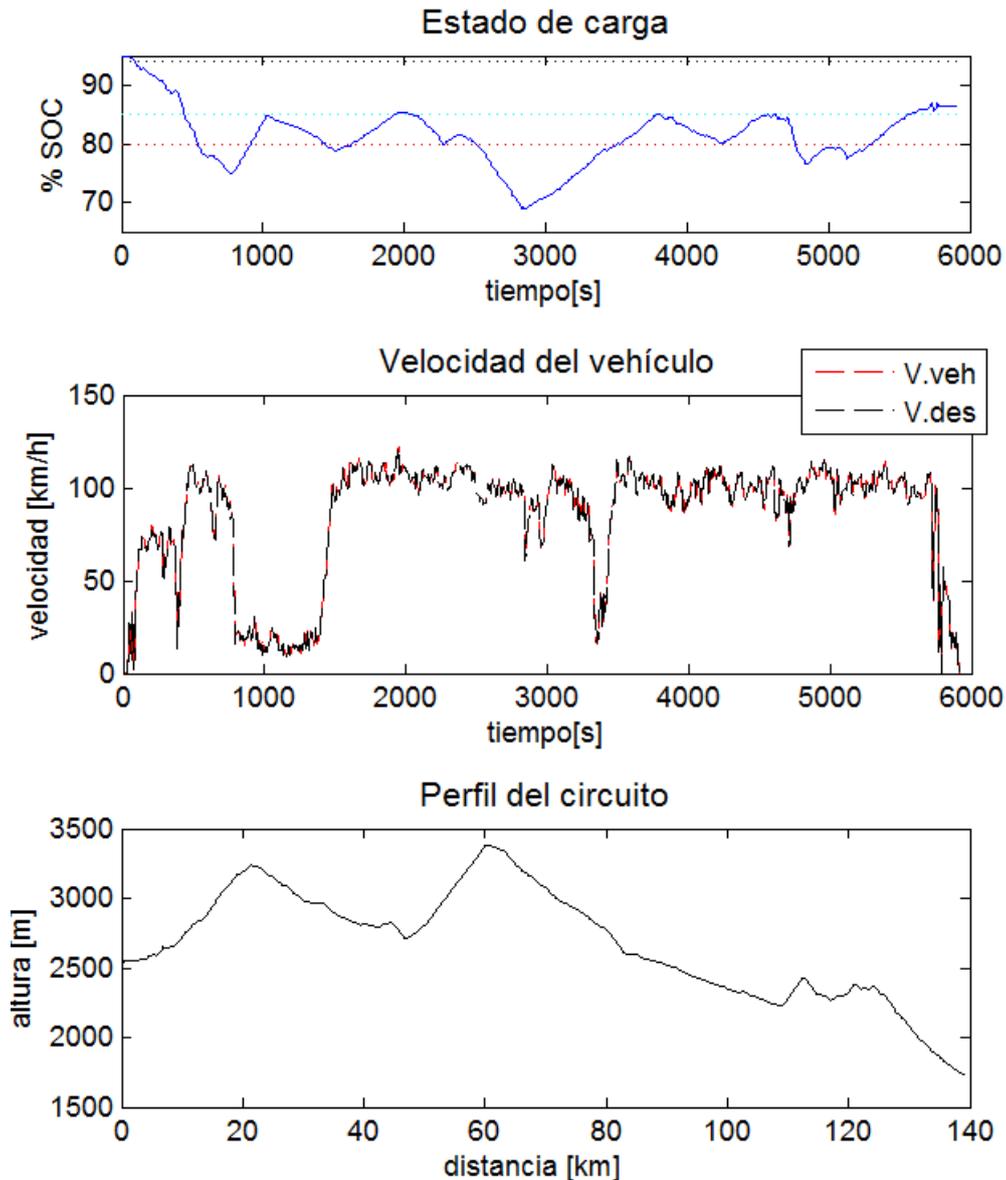


Figura 4.10. Estado de carga del vehículo, velocidad y perfil del circuito Vail

En la figura 4.11 vemos los modos de funcionamiento con los que el vehículo ha funcionado en este ciclo de conducción. Entre los modos 1 y 2, el más usado es el modo 2 incluso para frenar, lo que indica que los pares demandados en el carrier son altos pero no llegan a ser superiores a 260 N·m. Para los modos de recarga se utiliza mayormente el modo 4 por el mismo motivo, con la diferencia de que en cada frenada el modo cambia a 3* (35), poniendo el motor de gasolina a ralentí y dejando toda la capacidad de recarga de la batería a la energía procedente de la frenada. Este sistema de aprovechamiento y el elevado número de frenadas y

tramos de pendiente negativa hacen posibles un gasto de energía por kilómetro tan bajo.

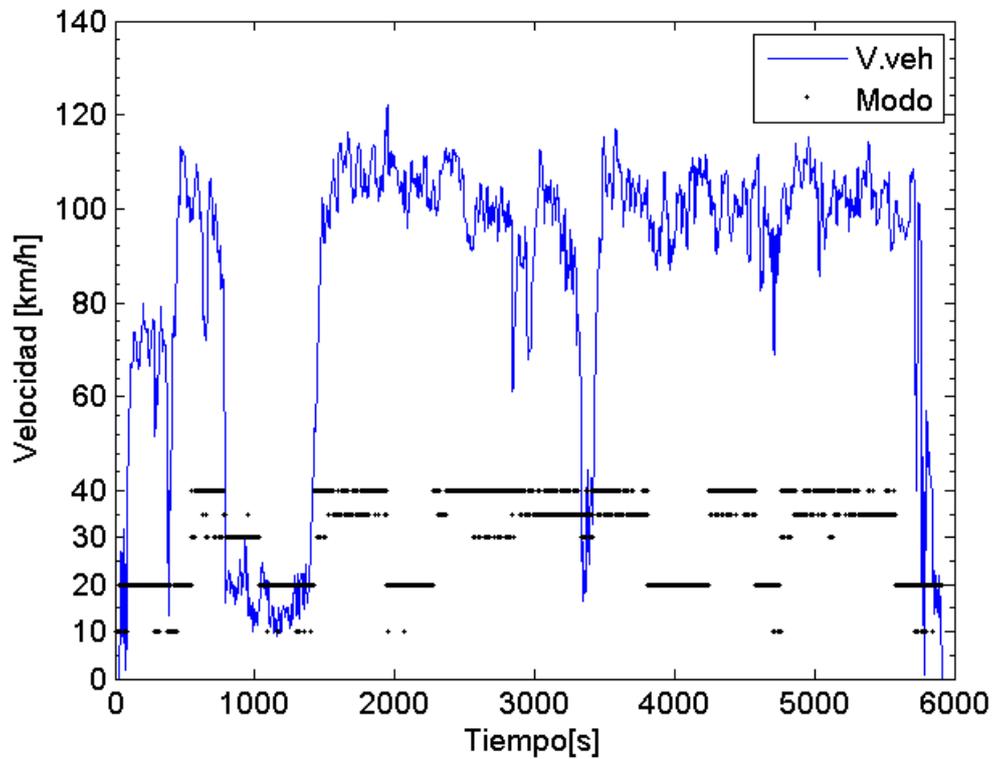


Figura 4.11. Modos de funcionamiento del vehículo en el ciclo Vail

A continuación vamos a ver un intervalo en el que la batería alcanza el 80% y pasa al modo recarga:

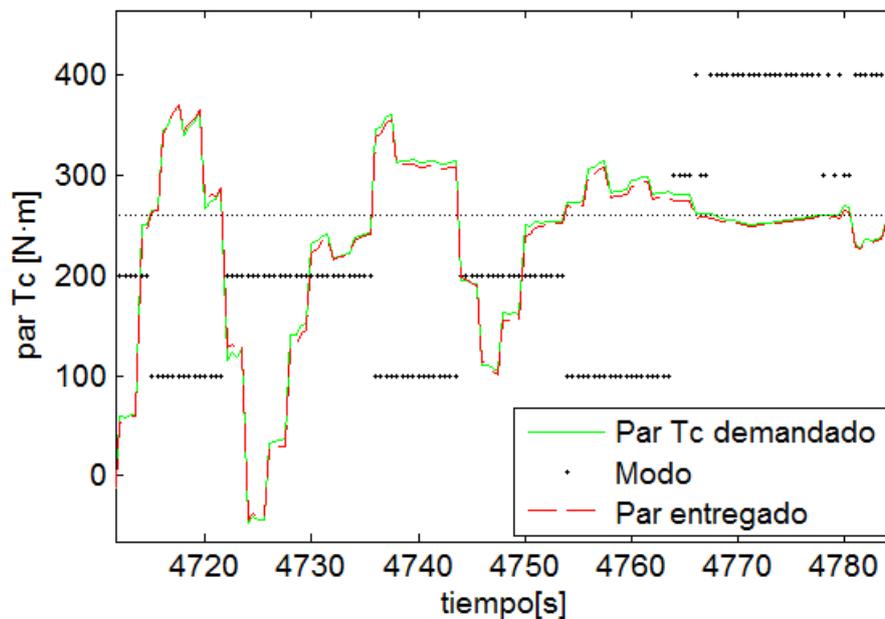


Figura 4.12. Par Tc demandado y entregado en el intervalo de tiempo [4710,4770]

En la gráfica vemos cómo al principio el vehículo opera en los modos puramente eléctricos, cambiando entre los modos 1 y 2 cada vez que el par demandado pasa la línea de puntos que marca los 260 N·m. En el segundo 4765 se encuentra operando en modo 1, pero resulta que el estado de carga alcanza el 80 % con lo cual la estrategia cambia a uno de los modos de recarga, en este caso al modo 3, ya que el par demandado tampoco supera los 260 N·m, para pasar después al modo 4. A lo largo de todo el circuito el par demandado es generalmente alto, manteniéndose cerca de la línea de puntos pero sobrepasándola solo en casos puntuales.

Como hemos señalado antes, para este ciclo de conducción es muy importante el tema de la frenada, y por lo tanto lo es también la potencia de carga procedente de las mismas. La siguiente figura nos muestra la potencia eléctrica que ha entrado y salido de la batería a lo largo de todo el circuito.

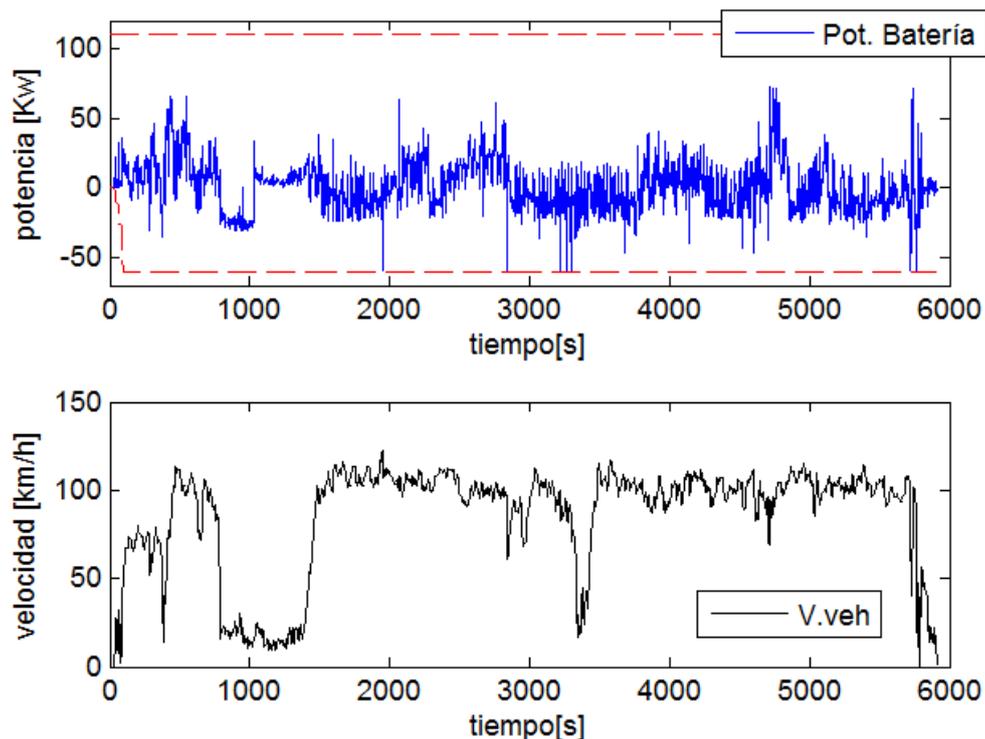


Figura 4.13. Evolución de la potencia eléctrica de la batería para el ciclo Vail

Como era de prever, en este circuito el limitador de potencia ha tenido que actuar en varias frenadas que saturaban la batería. Al igual que en el ciclo Artemis cuando las velocidades están en torno a los 100 km/h las frenadas ya son lo suficientemente fuertes como para provocar la saturación de la batería, lo que invita

a pensar que sería necesaria una batería que tuviese más capacidad de carga de la que disponemos.

En este apartado hemos analizado los resultados de consumo para cada ciclo y hemos podido ver cómo ha evolucionado el estado de carga de la batería en cada uno de ellos, los modos de funcionamiento en los que ha operado, la potencia de la batería y casos particulares en los que hemos analizado los modos de funcionamiento, tanto eléctrico puro como los de recarga y cómo limita la estrategia el par para no saturar la batería. Todo ello enfocado a racionalizar el gasto de energía de la forma más óptima y económica posible. Además hemos cumplido satisfactoriamente la normativa europea. A continuación vamos a analizar las prestaciones del vehículo dejando en un segundo lugar la optimización de energía.

4.2.2 Test de aceleración de 0 a 100 km/h

Este test consiste en una prueba en la que el vehículo acelera de 0 a 100 km/h y se mide el tiempo en segundos que tarda en alcanzar dicha velocidad. Con ello podremos evaluar la aceleración del vehículo.

La siguiente tabla muestra los datos obtenidos en la simulación:

Tiempo [s]	10,38
Par máximo [N·m]	353.19 @ 1910 rpm
Estado de batería final [%]	93,1
Energía [MJ]	0.97

Un aspecto muy importante en este test es la limitación que supone la batería, que se satura a los 110 Kw. En la gráfica de la figura siguiente (Figura 4.14.) se muestra la potencia que consume el motor hasta que el vehículo alcanza los 100 km/h.

Aunque al principio el motor entrega el par más alto, la potencia que demanda no llega a los 110 Kw debido a que la velocidad es todavía baja pero a partir del segundo 3,2 en el que el vehículo alcanza los 40 km/h el par que tiene que entregar a esa velocidad supone un consumo de potencia mayor que el que puede dar la batería, con lo que se limita el par entregado de tal forma que la

potencia que demanda no supere los 110 kilovatios con el objetivo de no dañar la batería.

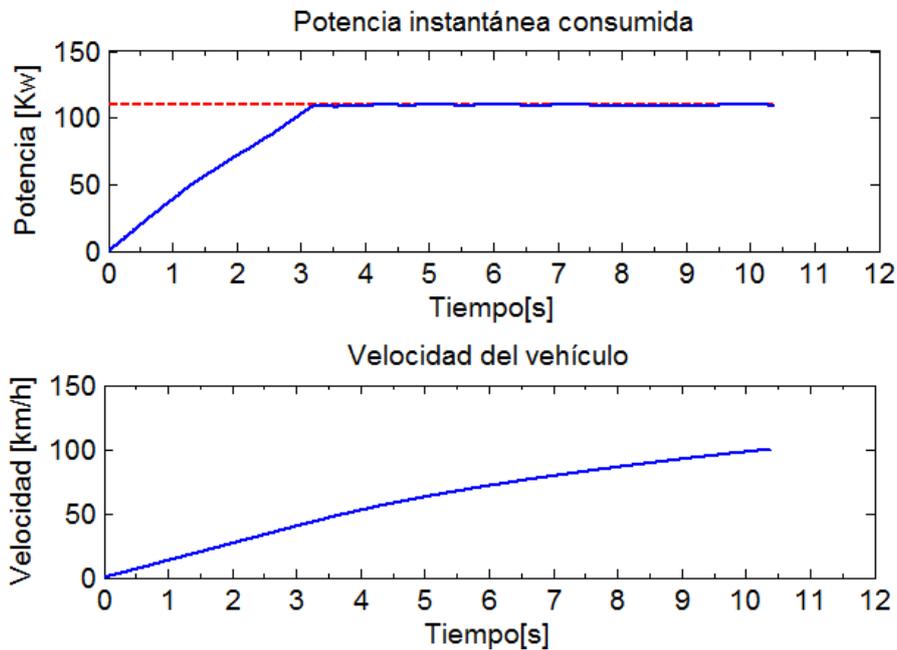


Figura 4.14. Potencia consumida por el motor

En la siguiente figura se muestra el par entregado y el par máximo capaz de dar el motor en función de su velocidad de giro. Además se incluye el mapa de consumo de potencia eléctrica del motor en función del par y la velocidad:

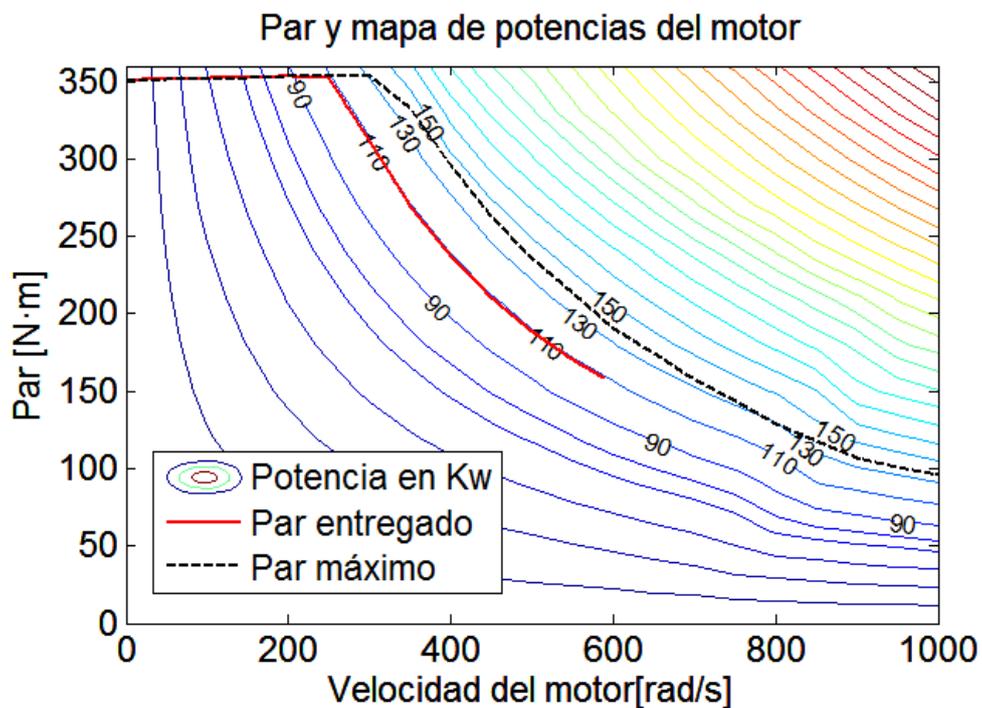


Figura 4.15. Par y mapa de potencias del motor

En la fase inicial de la prueba el par entregado es el máximo que puede dar hasta que llega a la línea de 110 kw de consumo. Para ver las prestaciones reales del motor se ha simulado el test suponiendo que la batería no se satura y estos son los resultados:

Tiempo [s]	8,99
Par máximo [N·m]	354 @ 2391 rpm

En este caso, la curva de par iría donde va la línea de puntos en la figura anterior (ver Figura 4.15). El vehículo ganaría así 1,39 segundos en una aceleración de 0 a 100 km/h, y la potencias demandadas estarían en torno a los 130 - 140 kilovatios.

4.2.3 Test de aceleración de 0 a 1000 m

Este test es otra forma de valorar la aceleración del vehículo. Se trata de medir el tiempo que tarda y la velocidad con la que llega el vehículo a los 1000 metros de distancia.

Hemos simulado la prueba para dos pendientes, una al 0% (liso) y otra al 4 % y estos son los resultados obtenidos:

	Pendiente 0 %	Pendiente 4%
Tiempo [s]	32.28	34.69
Velocidad máxima [km/h]	159	143.7
SOC final	0.882	0.877
Energía [MJ]	3.365	3.613

A continuación, en las figuras 4.16.a y 4.16.b se muestran los mapas de potencia con el par que ha entregado el vehículo en cada caso. Al igual que en el test de aceleración de 0 a 100 km/h el par entregado es el máximo que puede dar hasta que llega a la línea de los 110 Kw de consumo que se limita para no saturar la batería. El par que se demanda en las ruedas es el máximo posible, que sería el equivalente a que un hipotético conductor pisara a fondo durante toda la prueba. Esto hace que el par demandado sea muy alto y por lo tanto el vehículo acelere siempre en modo 1.

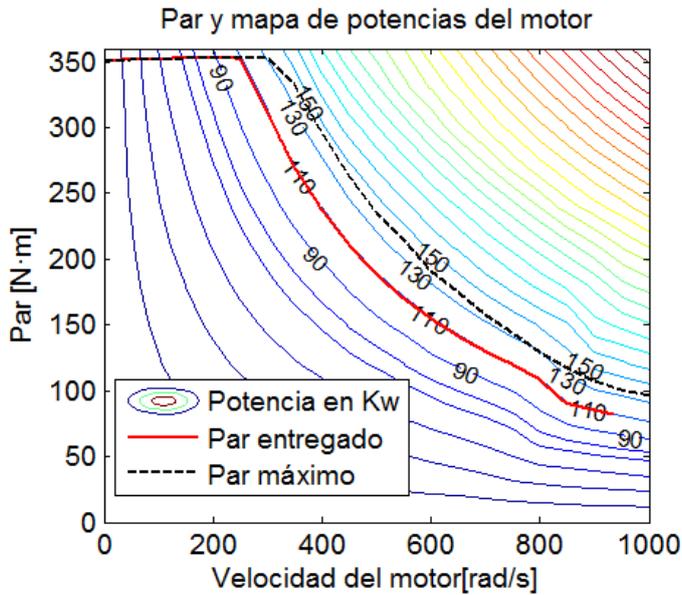


Figura 4.16.a. Par entregado para pendiente 0 %

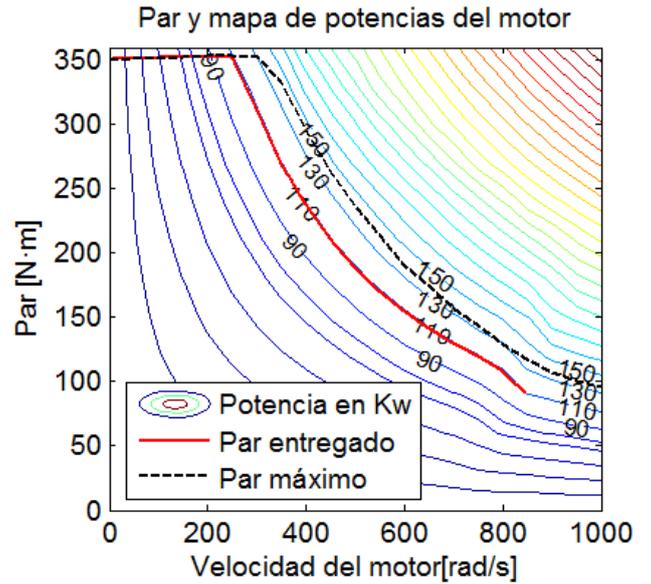


Figura 4.16.b. Par entregado para pendiente del 4 %

Con este test hemos comprobado que el vehículo es capaz de afrontar sin problemas una exigencia de par muy alta tanto en terreno llano como en terreno con pendiente.

4.3 Comparativa entre los vehículos propuestos

En este apartado se presenta una comparativa de resultados de consumo entre los vehículos descritos en el capítulo anterior. Se analiza el consumo en megajulios, las emisiones de CO₂ y la autonomía de cada vehículo. Además se hará un análisis de coste económico para cada uno de ellos en los tres circuitos en los que estamos trabajando. Realizaremos una comparación común entre los 5 vehículos: nuestro Volt, un eléctrico puro, un híbrido en serie, un Volt sin frenada regenerativa y un gasolina. Como se describe en el capítulo anterior todos ellos están simulados utilizando las mismas máquinas que en nuestro Volt pero con una disposición diferente ofreciendo todos las mismas prestaciones.

4.3.1 Ciclo de conducción NEDC (New European Driving Cycle)

La siguiente tabla ofrece los resultados de consumo obtenidos por cada vehículo en el ciclo de conducción NEDC.

Ciclo NEDC						
	Volt	Híbrido en serie	Eléctrico puro	Volt sin frenada	Gasolina	Chevrolet Cruze
Recorrido realizado [km]	11,01	11,01	11,01	11,01	11,01	11,01
Estado de la batería final [%]	87,42	85,99	85,99	85,12	-	-
Litros a los 100 km	-	-	-	-	8,623	7,5
Energía total [MJ]	4,182	4,979	4,979	5,499	34,57	-
Energía total por km [MJ/km]	0,380	0,452	0,452	0,497	3,213	-
Energía eléc. por km [MJ/km]	0,380	0,452	0,452	0,497	-	-
Energía gas. por km [MJ/km]	1,590	1,631	-	1,791	3,213	-
Coste económico [€]	0,180	0,210	0,210	0,230	1,210	1,07
Autonomía [km]	876	839	89	764	381	500

Emisiones CO ₂ para ciclo NEDC en [gCO ₂ /km]						
	Volt	Híbrido en serie	Eléctrico puro	Volt sin frenada	Gasolina	Chevrolet Cruze
España	29,4	35,0	35,0	38,3	233	-
Europa	37,6	44,7	44,7	49,0	233	174
Estados Unidos	58,3	69,5	69,5	76,3	233	-
China	82,5	98,0	98,0	107,5	233	-
Mundo	55,6	66,0	66,0	72,4	233	-

En la tabla de resultados vemos que nuestro Volt es el que menos energía consume, el más económico y el que menos contamina para este circuito. Como para nosotros el ciclo NEDC es el de referencia, hemos introducido la comparativa con el Chevrolet Cruze de gasolina que tiene un motor más pequeño que el que adaptamos a partir del Volt y optimiza mejor el consumo. Las emisiones de todos los vehículos excepto los dos de gasolina están por debajo de los 120 g/km. Vemos que el híbrido en serie y el eléctrico puro tienen los mismos consumos de energía. Esto se debe a que, como se describe en el capítulo anterior, ambos funcionan solo con el motor eléctrico y en ningún caso interviene el generador.

A continuación, en la figura 4.17 se muestra una gráfica con la evolución de gasto de energía en mega julios de cada vehículo. En ella se observa que desde el

primer segundo el consumo del vehículo de gasolina es muy superior al del resto de los vehículos. Hay que señalar que al ser los mismos consumos para el híbrido en serie y el EV sus líneas están superpuestas. Es en la parte extraurbana (a partir del segundo 800) cuando se observa un incremento de la pendiente de la curva en todos ellos, llegando al máximo cuando se alcanzan los 120 km/h. A partir de aquí los vehículos que disponen de frenada regenerativa bajan la curva indicando que se ha generado electricidad. En cambio los vehículos que no disponen del sistema como el Volt sin frenada regenerativa y el gasolina la tendencia es distinta; en el Volt sin frenada no se consume nada puesto que está frenando y el par del motor eléctrico entrega un par nulo y en el Gasolina se sigue consumiendo, ya que el motor sigue estando arrancado.

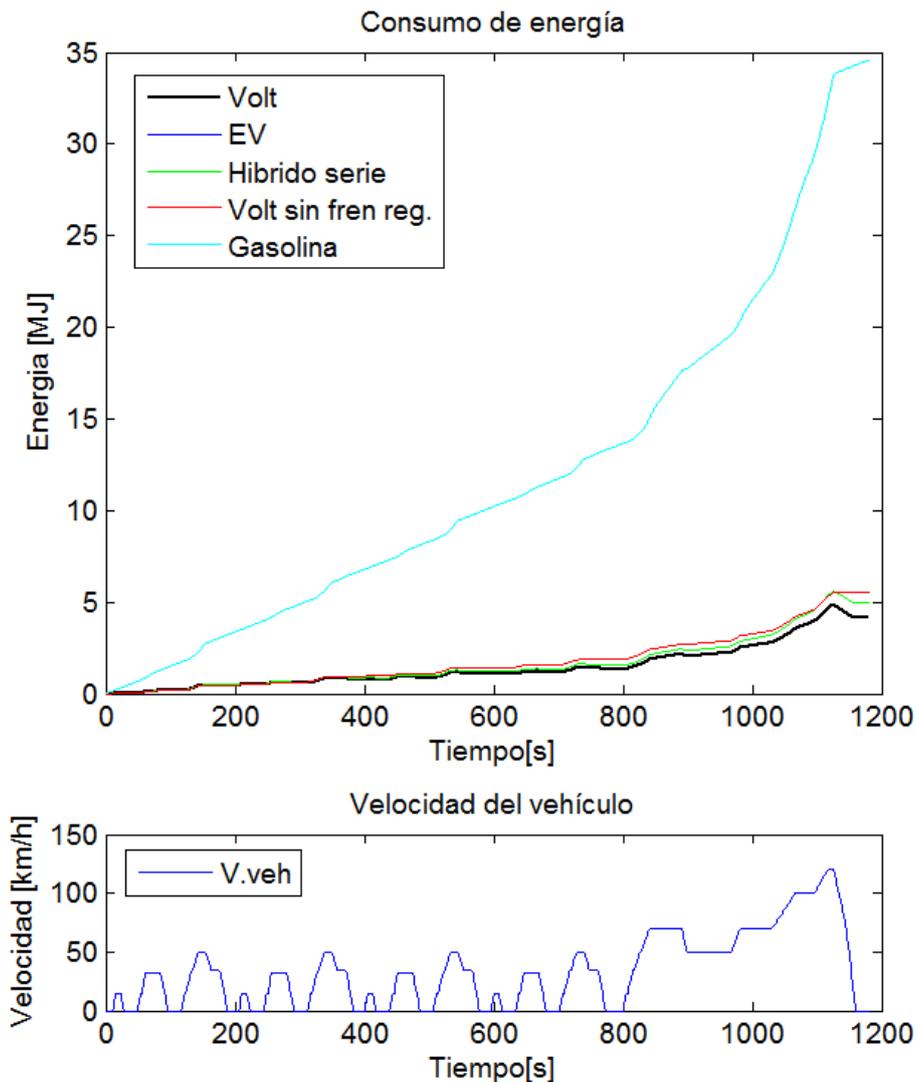


Figura 4.17. Comparativa de consumos para el ciclo NEDC

4.3.2 Ciclo de conducción Artemis highway

La siguiente tabla ofrece los resultados de consumo obtenidos por cada vehículo en el ciclo de conducción Artemis highway

Ciclo Artemis highway					
	Volt	Híbrido en serie	Eléctrico puro	Volt sin frenada	Gasolina
Recorrido [km]	29,55	29,55	29,55	29,55	29,55
Estado de la batería final [%]	83,44	78,05	48,16	84,35	-
Litros a los 100 km	4,520	5,569	-	5,021	10,52
Energía total [MJ]	55,82	70,20	24,97	60,90	144,6
Energía total por km [MJ/km]	1,890	2,377	0,845	2,057	3,921
Energía eléc. por km [MJ/km]	0,200	0,302	0,845	0,185	-
Energía gas. por km [MJ/km]	1,690	2,075	-	1,872	3,921
Coste económico [€]	2,010	2,540	1,090	2,180	4,000
Autonomía [km]	926	723	133	872	312

En un circuito de vía rápida como este los consumos son ligeramente más dispares, ya que los modos 2 y 4 en el Volt y en el Volt sin frenada intervienen durante más tiempo. Aunque el vehículo que menos consume es con diferencia el eléctrico puro. Como se observa, su tendencia es constante durante todo el circuito, debido a que no se quema gasolina. El inconveniente es que baja mucho el estado de carga de su batería (al 48%), y los problemas de autonomía empiezan a ser visibles. Hay que recordar que las baterías no se pueden gastar hasta el 0 % sino que se deja un margen de seguridad y se establece como nivel mínimo el 25%.

La siguiente tabla recoge los datos de emisiones de los distintos vehículos:

Emisiones CO ₂ para ciclo Artemis highway en [gCO ₂ /km]					
	Volt	Híbrido en serie	Eléctrico puro	Volt sin frenada	Gasolina
España	141,0	177,5	67,7	153,3	286
Europa	145,7	184,4	86,0	157,5	286
Estados Unidos	157,6	201,8	134,7	134,5	286
China	171,5	221,7	189,7	181,0	286
Mundo	156,0	199,0	127,8	167,3	286

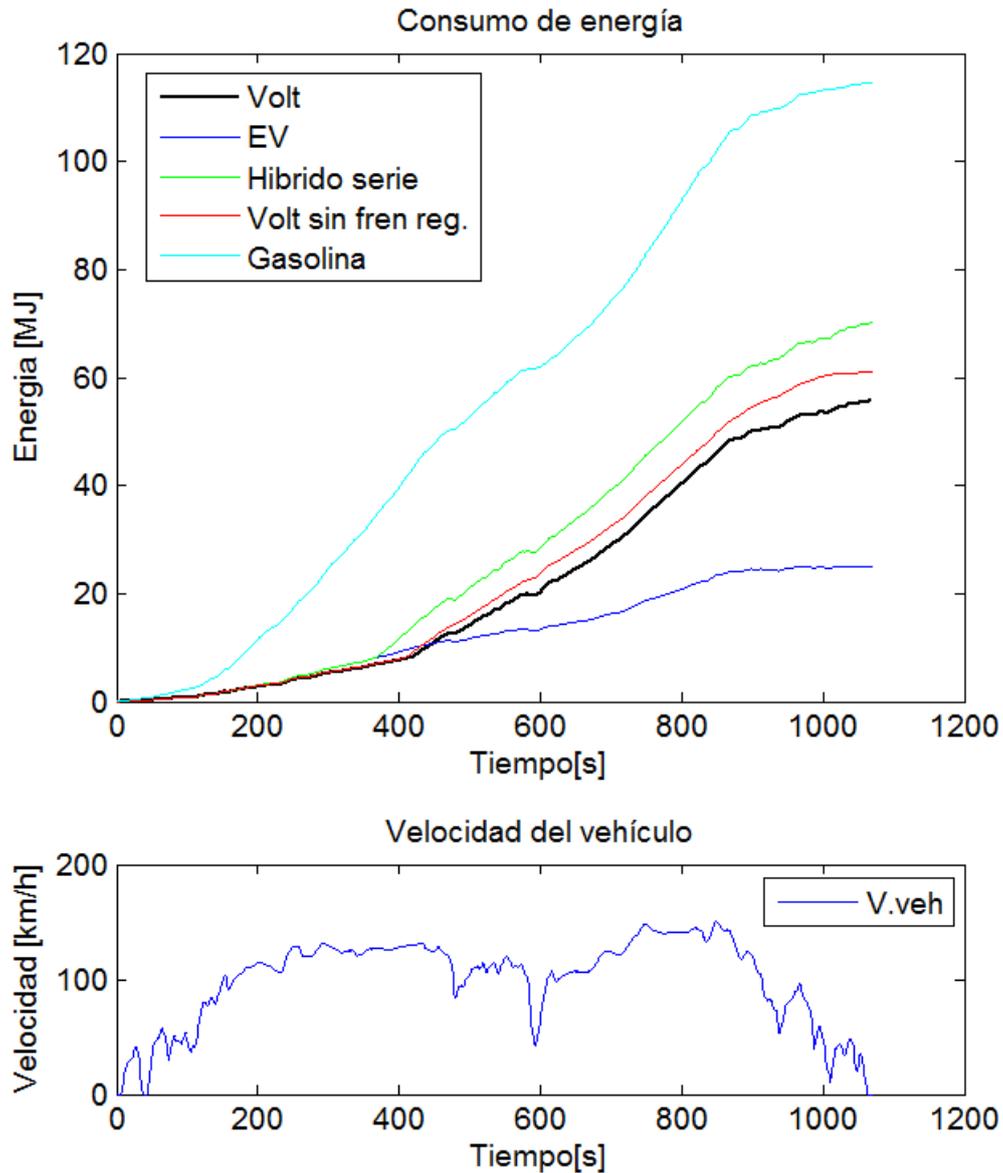


Figura 4.18. Comparativa de consumos para el ciclo Artemis Highway

Hacia el segundo 400 es cuando el Volt, híbrido en serie y Volt sin frenada cambian a los modos de recarga, ya que la pendiente del consumo se hace considerablemente más pronunciada. Debido a las frenadas, el Volt es siempre más óptimo que su homólogo sin frenada y ambos, a su vez, son más eficientes que el híbrido en serie, haciéndose notar el efecto de los modos 2 y 4 optimizados. Prueba de ello es que el híbrido en serie (línea verde) llega antes al 80% de carga, con lo cual arranca también antes el modo 3 de recarga.

Por otro lado está el gasolina, que aunque es el que más consume de todos, lo hace de una forma más eficiente con respecto a su comportamiento en

urbano del ciclo NEDC, ya que el régimen de funcionamiento del gasolina es más óptimo para velocidades altas.

4.3.3 Ciclo de conducción de NREL a Vail

La siguiente tabla ofrece los resultados de consumo obtenidos por cada vehículo en el ciclo de conducción de NREL a Vail.

Ciclo de NREL a Vail					
	Volt	Híbrido en serie	Eléctrico puro*	Volt sin frenada	Gasolina
Recorrido [km]	139,7	139,7	51,08	139,7	139,7
Estado de la batería final [%]	86,44	85,83	-	81,49	-
Litros a los 100 km	4,030	4,874	-	4,589	6,597
Energía total [MJ]	213,2	257,1	-	245,0	342,7
Energía total por km [MJ/km]	1,528	1,842	-	1,753	2,458
Energía elec. por km [MJ/km]	0,028	0,026	0,737	0,043	-
Energía gas. por km [MJ/km]	1,500	1,816	-	1,710	2,458
Coste económico [€]	7,530	9,060	-	8,660	12,00
Autonomía [km]	2255	2032	54,6	1653	498

* El eléctrico puro (EV) no ha completado el test.

Un dato importante a mencionar son las elevadas autonomías obtenidas. Esto se debe a que el circuito es muy largo y gran parte de él se realiza bajando altura con pendientes negativas en las que se consume muy poco. Además los vehículos que disponen frenada regenerativa consiguen aprovechar energía en esos tramos, con lo que el resultado es una energía consumida por km muy baja.

La siguiente tabla recoge los datos de emisiones de los distintos vehículos:

Emisiones CO ₂ para ciclo de NREL a Vail en [gCO ₂ /km]					
	Volt	Híbrido en serie	Eléctrico puro	Volt sin frenada	Gasolina
España	113,5	136,8	-	130,4	181
Europa	114,3	137,5	-	131,6	181
Estados Unidos	116,2	139,5	-	134,5	181
China	118,3	141,8	-	137,9	181
Mundo	116	139,2	-	134,1	181

La siguiente figura muestra la gráfica comparativa de consumo de energía en mega julios de todos los vehículos para este circuito:

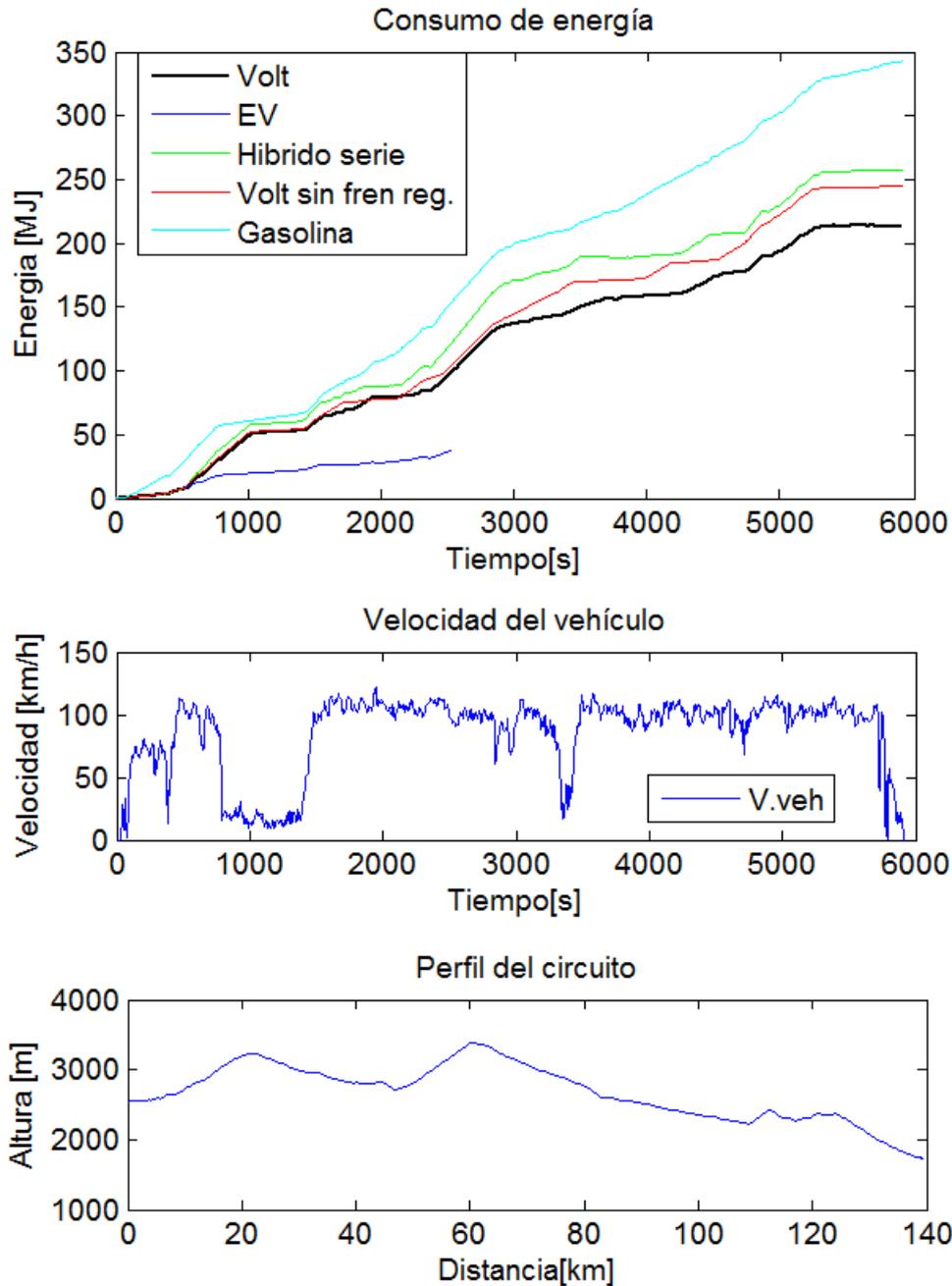


Figura 4.19. Comparativa de consumos para el ciclo Vail

En este ciclo, debido a su exigencia y a su longitud, el coste se ha incrementado considerablemente. Pero el más eficiente vuelve a ser nuestro Volt, en el que tanto los modos 2 y 4 como el sistema de frenada han intervenido de manera muy positiva. Sin embargo, de haber acabado el test, el eléctrico hubiese sido de nuevo el más eficiente a pesar de que solo tiene un motor eléctrico, confirmando así que es la gasolina la que incrementa el gasto energético por kilómetro de forma considerable. Pero el eléctrico solo depende de su batería,

mientras que los demás tienen una fuente de energía auxiliar que hace aumentar mucho su autonomía. Si echamos un vistazo a las emisiones vemos que las emisiones por km son considerablemente más bajas con respecto al ciclo Artemis. Esto se debe en gran medida a las ventajas que tienen las pendientes negativas para la recarga. Lógicamente se hace mucho más rápido y de manera más eficiente una recarga bajando que subiendo, lo que ha permitido que los modos eléctricos intervengan durante más tiempo.

4.4 Comparaciones individuales

A continuación vamos a comparar por separado nuestro Volt con el Volt sin el sistema de frenada regenerativa para analizar más detenidamente las ventajas de tenerlo frente a no tenerlo y compararemos también nuestro Volt con el híbrido en serie para ver las ventajas de tener el sistema ENG - GEN frente a no tenerlo. Para ambas comparaciones usaremos el ciclo de NREL a Vail, ya que las diferencias son más apreciables. Por último vamos a comparar nuestro Volt con el eléctrico EV.

4.4.1 Volt vs Volt sin frenada regenerativa

Los resultados de uno y otro son los siguientes:

	Volt	Volt sin frenada
Recorrido [km]	139,7	139,7
Energía total [MJ]	213,2	245,0
Energía total por km [MJ/km]	1,528	1,753
Estado de la batería final [%]	86,44	81,49
Litros a los 100 km	4,030	4,589
Coste económico [€]	7,530	8,660
Autonomía [km]	2255	1653

La siguiente figura muestra la evolución del estado de carga de la batería para cada uno:

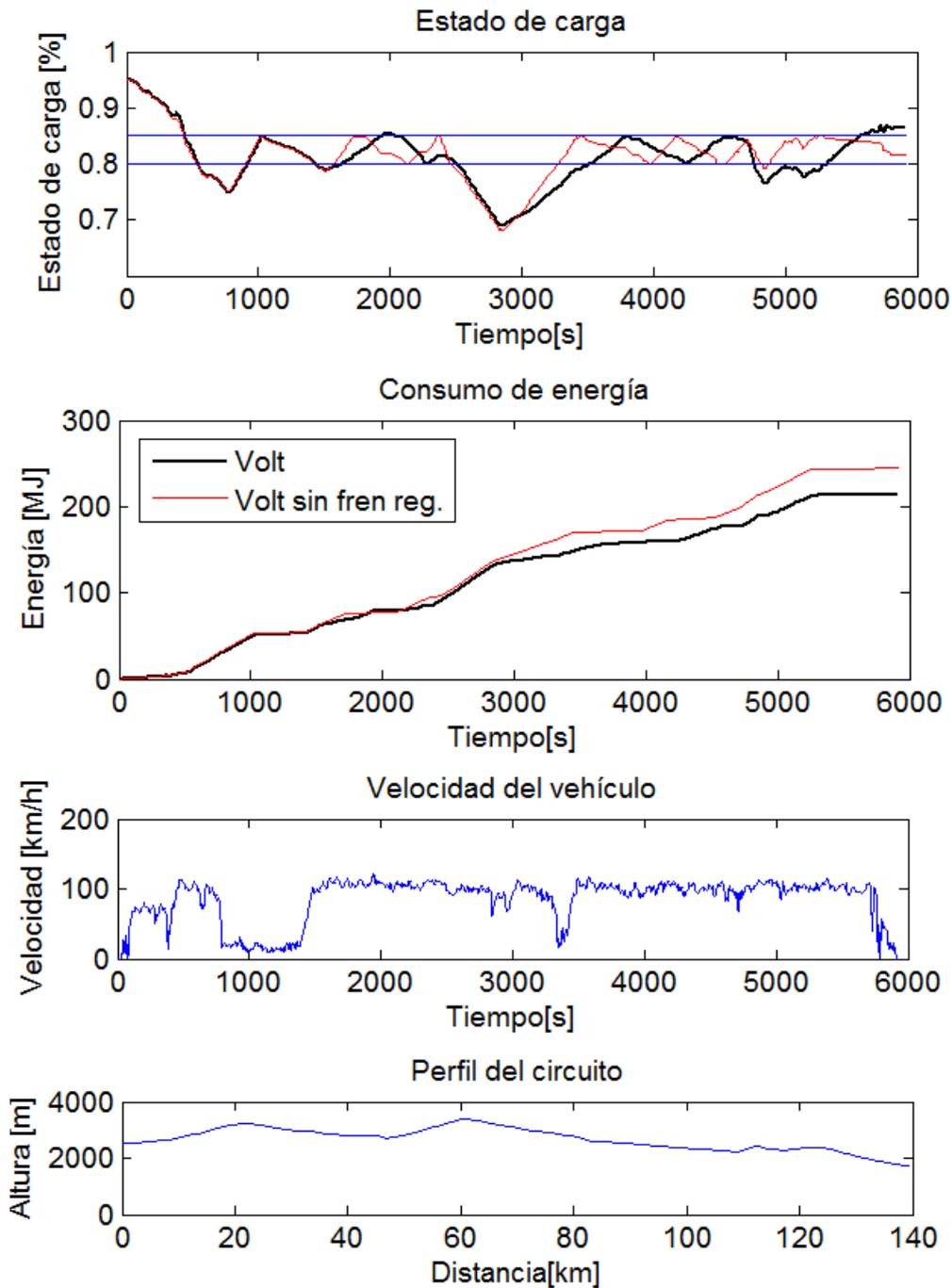


Figura 4.20. Comparativa Volt vs Volt sin frenada en el ciclo Vail

En la figura anterior podemos ver cómo va evolucionando el estado de carga y el consumo de energía a lo largo del circuito para uno y otro. En un principio los dos vehículos siguen la misma tendencias y consumo de energía ya que ambos operan en los mismos modos (1 y 2), incluso en la recarga. A partir del segundo 1500 aproximadamente en la que ambos coincide con una recarga

durante un periodo de aceleración comienzan las diferencias. Si analizamos el conjunto de estado de carga de la batería, en el Volt se observa que las recargas siempre se hacen más lentas que en el Volt sin frenada regenerativa. Esto se debe a que el Volt, al usar el modo 3* en las frenadas (ver apartado 3.3.1.1.3 *Frenadas*) para no saturar la batería, permite que se reduzcan las revoluciones del motor de gasolina hasta el ralentí y que la recarga proceda íntegramente de la frenada. Esta potencia de carga procedente de la frenada, salvo en algunos casos, es menor que la potencia de carga que suministra el sistema ENG - GEN pero como durante estos tiempos de frenada el consumo de gasolina es mínimo hace que el balance de consumo de energía en MJ sea positivo en favor del Volt. Esto se hace notar especialmente en los tramos de pendiente negativa, es decir, cuando el vehículo va cuesta abajo donde va pisando constantemente el freno. El modo 3* permite en estos tramos circular durante mucha distancia con el motor a ralentí y mientras que al mismo tiempo se va recargando la batería. Donde se puede ver este caso claramente es en las recargas que efectúan los dos a partir del segundo 3000 aproximadamente, que equivale al km 60 donde comienza el tramo de pendiente negativa. Por tanto, la frenada regenerativa no solo permite volver a aprovechar la energía que invertimos antes para acelerar sino que además te permite un ahorro de gasolina durante una recarga, traduciéndose finalmente en un ahorro tanto económico como de emisiones.

4.4.2 Volt vs Híbrido

Los resultados de uno y otro son los siguientes:

	Volt	Híbrido en serie
Recorrido [km]	139,7	139,7
Energía total [MJ]	213,2	257,1
Energía total por km [MJ/km]	1,528	1,842
Estado de la batería final [%]	86,44	85,83
Litros a los 100 km	4,030	4,874
Coste económico [€]	7,530	9,060
Autonomía [km]	2255	2032

La siguiente figura muestra la evolución del estado de carga de la batería para cada uno.

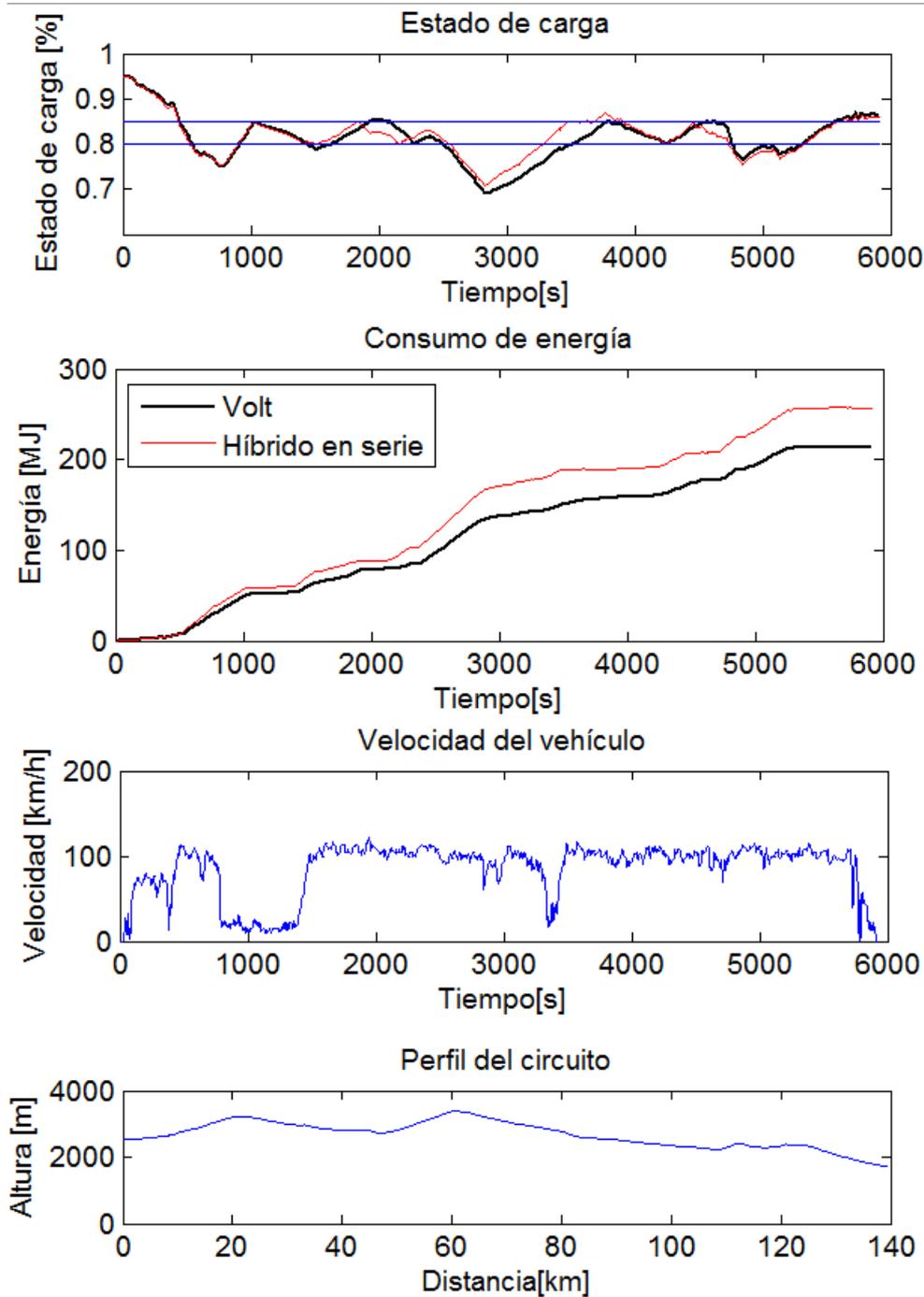


Figura 4.21. Comparativa Volt vs Híbrido en serie en el ciclo Vail

En la figura se puede ver la evolución del estado de carga y del consumo del híbrido en serie comparado con nuestro Volt. El híbrido en serie solo dispone de los modos 1, 3 y del modo 3* para las frenadas en recarga, lo que implica que en la

impulsión el motor vaya a muy altas revoluciones y que en las recargas la potencia de carga del sistema ENG - GEN sea constante a 31,06 Kw. Esto hace que las descargas y las recargas sean más rápidas que en nuestro Volt pero no por ello más óptimas. En la gráfica de estado de carga de la batería se observa que cuando se producen cargas y descargas en las que la variación de velocidad es pequeña o aceleraciones lentas donde el Volt opera en modo 2 o 4, el híbrido en serie siempre realiza esas cargas y descargas más rápidas, ya que lo hace en modo 1 o 3. Se ve que incluso cuanto más rápidas son con respecto al Volt más aumenta también la diferencia de consumo entre uno y otro. Esto se debe a la reducción de la velocidad de giro del motor que implica el acoplamiento del generador a la transmisión, sobre todo cuando las velocidades son altas (superiores a 90 km/h). Algo parecido ocurre en las recargas; en el modo 4 en el que también se acopla el generador a la transmisión, el motor de gasolina no gira a los 350 rad/s como en el híbrido en serie o en su modo 3 sino que lo hace a velocidades más reducidas pero manteniendo igualmente una potencia de carga superior a la que se consume, ya que el motor eléctrico ha reducido su velocidad. El efecto que produce el modo 4 es que se recarga más lentamente pero de una forma más óptima, ya que el motor gira a menos revoluciones que en el modo 3.

4.4.3 Volt vs Eléctrico EV

Los resultados de uno y otro son los siguientes:

	Volt	Eléctrico puro
Recorrido [km]	139,7	29,55
Energía total [MJ]	213,2	24,97
Energía total por km [MJ/km]	1,528	0,845
Estado de la batería final [%]	86,44	48,16
Litros a los 100 km	4,030	-
Coste económico [€]	7,530	1,090
Autonomía [km]	2255	54,6

Para vías rápidas el vehículo eléctrico es sin duda el más eficiente en cuanto a consumo de energía se refiere y también el que menos contamina. No es así para circuitos urbanos, donde el Volt se comporta como un eléctrico puro pero

dispone del modo 2 para demandas de par bajos que es más óptimo que realizar la impulsión solo con el motor eléctrico.

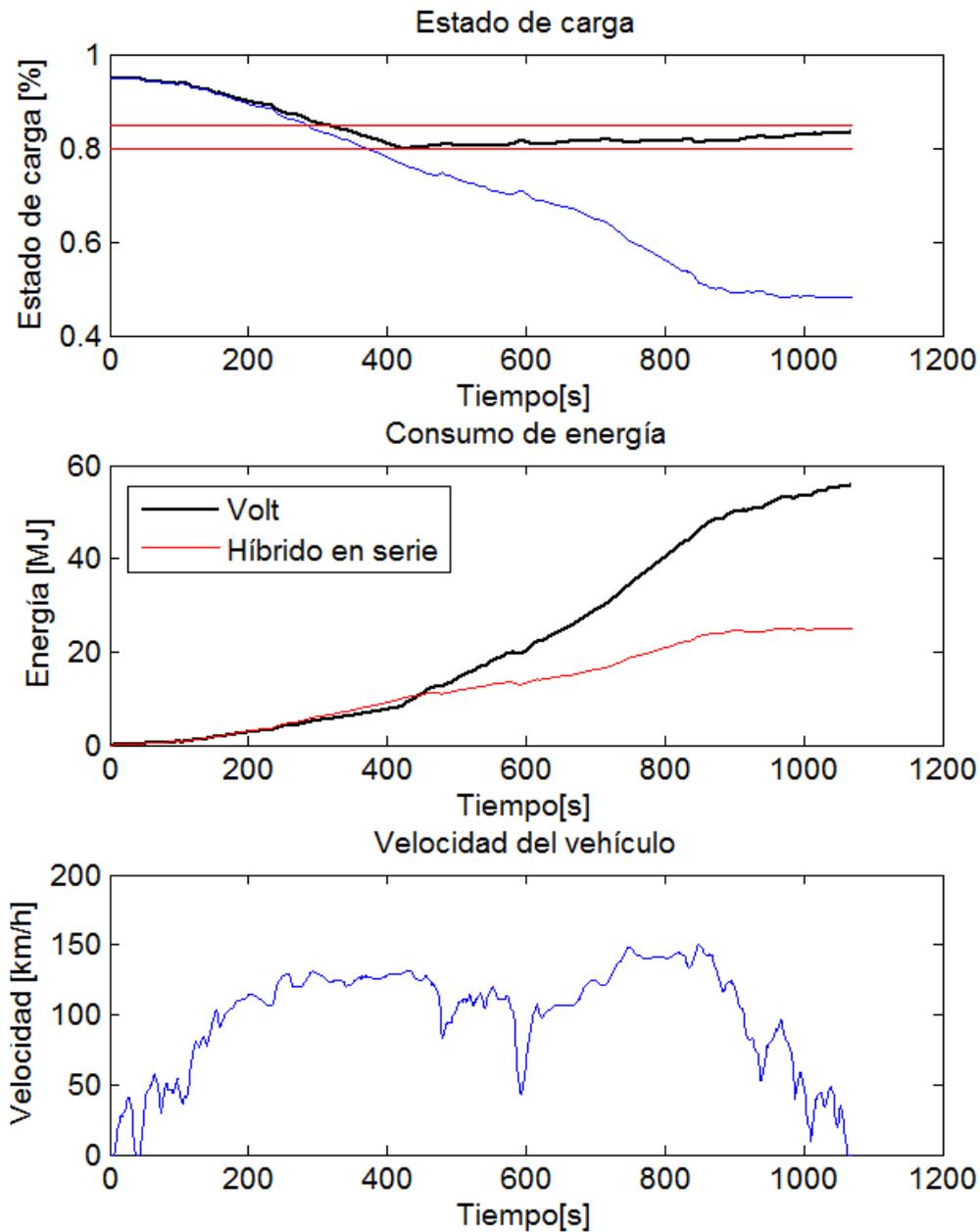


Figura 4.22. Comparativa Volt vs Eléctrico EV en el ciclo Artemis highway

En el ciclo Artemis highway, la diferencia de consumo de energía es muy grande entre el eléctrico (EV) y nuestro Volt. Esto se traduce en una gran diferencia de emisiones (el EV emite 67,7 gCO₂/km mientras que el Volt emite hasta 124,4 gCO₂/km.) y de coste (7,5 € del Volt frente a 1,1 del EV). El hecho de que el

eléctrico suprime el gasto de gasolina hace que aventaje mucho a nuestro Volt en cuanto a consumos se refiere. El problema del eléctrico reside en su autonomía; si observamos el gráfico de la evolución del estado de carga observamos que el estado de carga baja hasta el 48%, mientras que el Volt hace uso de sus modos de recarga y no baja del 80%. Esto permite que el Volt tenga una autonomía de más de 500 km y pueda hacer este circuito hasta 16 veces seguidas sin recargar combustible. En cambio el eléctrico puro no es capaz de completar dos veces seguidas el circuito, ya que el estado de carga mínimo de su batería es del 25%. Por tanto, el concepto de un vehículo eléctrico de rango extendido como nuestro Volt es sacrificar un poco el coste y las emisiones incorporando una fuente auxiliar de energía a cambio de conseguir una autonomía igual a los vehículos convencionales de motor térmico.

5. Conclusiones

Donde se exponen de forma resumida, aquellas conclusiones que se derivan de los resultados obtenidos y una valoración personal del conjunto del trabajo.

El objetivo de este proyecto era conseguir diseñar una estrategia de control capaz de optimizar el vehículo eléctrico de rango extendido propuesto y lograr que éste pueda ser comercializado en Europa cumpliendo con los límites de emisiones de CO₂ establecidos en 120 gCO₂/km por la comisión europea COM 2007/19. Los resultados de emisiones obtenidos en el ciclo de conducción NEDC que es el de homologación obligatoria para todos los vehículos de acuerdo a la directiva 98/69/EC han sido de 37,6 gCO₂/km en Europa, por tanto, el Chevrolet Volt con nuestra estrategia de control podría ser matriculado en Europa sin sanciones.

En un ciclo de conducción urbano como el NEDC el vehículo se comporta como un eléctrico puro (EV), consumiendo toda la energía necesaria de la batería. Las emisiones que ello produce son por tanto las asociadas a la producción eléctrica según los datos de mix eléctrico del año 2011. En estos circuitos, el modo 2 con nuestra optimización en el que el generador se acopla a la transmisión es muy importante para retrasar al máximo la recarga por gasolina y conseguir así una mayor autonomía eléctrica.

En el ciclo de conducción Artemis highway que simula un recorrido por una vía rápida, es de vital importancia el modo 4. Éste modo optimizado por nuestra estrategia de control permite una recarga más efectiva que si se hubiese que hacerla en modo 3. Con el modo 4 se consigue reducir la velocidad del motor eléctrico y disminuir el consumo de potencia eléctrica, ya que interviene el generador que tiene mayor eficiencia. Esto hace que para realizar la recarga sean necesarias menos revoluciones del motor de gasolina que en el modo 3 y en consecuencia la recarga se haga más lenta pero consumiendo menos gasolina.

En el ciclo de conducción de NREL a Vail la mejora que supone el modo 4 optimizado se hace más visible aún. A ello hay que sumarle el modo de operación que hemos incorporado para las frenadas, al que hemos denominado modo 3*. Este modo opera cuando el vehículo frena en medio de una recarga por gasolina. La estrategia de control lo que hace es poner a ralentí el motor de gasolina y minimizar el consumo de combustible dejando toda la capacidad de carga de la batería a la potencia eléctrica que procede de la frenada. En este circuito supone un ahorro importante de energía, ya que son abundantes los tramos de pendientes negativas (cuesta abajo) y con frecuencia la batería se recarga con el mínimo

consumo de gasolina posible. Otro de los aspectos que tuvimos muy en cuenta es la conservación y el uso óptimo de nuestra batería. Por ello dotamos a la estrategia de control y a la optimización de un bloque que limita la entrega de potencia, en el que si la potencia eléctrica de carga o descarga supera los límites de saturación de nuestra batería, el bloque actúa limitando el par entregado. Ésta limitación se hace visible en algunas de las frenadas del ciclo de NREL a Vail, pero especialmente se hace visible en los test de aceleración. El hecho de que nuestra batería se sature en la descarga a 110 kw hace que nuestro vehículo tarde 1,38 segundos más en alcanzar los 100 km/h que en el caso de que no existiera esta limitación. Con la limitación de par nuestro vehículo alcanza los 100 km/h en 10,38 segundos.

Una parte muy importante del estudio de este PFC reside en comparar los consumos de energía obtenidos por nuestro vehículo con otros vehículos que no tienen nuestra optimización o tienen distinta arquitectura mecánica. Adaptamos nuestro vehículo para conseguir un vehículo eléctrico puro (EV), un híbrido dispuesto en serie, un vehículo de gasolina y nuestro Volt pero sin sistema de frenada regenerativa.

Con los resultados obtenidos podemos concluir que el vehículo eléctrico (EV) que solo dispone de un motor eléctrico (equivalente al modo 1) es el más eficiente tanto en urbano como en carretera. El problema que tiene el eléctrico puro es que no tiene suficiente autonomía como para realizar el mismo recorrido que un vehículo de gasolina. Por ello la solución más cercana es la hibridación del vehículo, en la que tanto el híbrido en serie como nuestro Volt sacrifican emisiones y coste económico a cambio de conseguir más autonomía utilizando una fuente de energía auxiliar como la gasolina.

Los resultados de la comparación que hemos realizado entre el híbrido en serie y nuestro Volt revelan que el Volt es más eficiente tanto en circuitos urbanos como en los de carretera. Esto se debe principalmente a los modos 2 y 4 optimizados. En las situaciones en las que se pretende mantener una cierta velocidad son mucho más ventajosos los modos optimizados de nuestro Volt. La diferencia se hace especialmente importante durante las recargas. Mientras que el híbrido recarga la batería con una potencia de carga lo suficientemente elevada como para que no se produzcan situaciones en las que el consumo sea mayor que

la recarga, lo que implica que el motor de gasolina gire a casi 3500 rpm, nuestro Volt reduce el consumo de potencia para así poder reducir también la velocidad de giro del motor de gasolina, consiguiendo así una recarga más efectiva que la de los híbridos.

Las ventajas de nuestro vehículo con respecto a los vehículos de gasolina son notables en todos los aspectos. Tras analizar los resultados obtenidos vemos que un vehículo eléctrico de rango extendido tiene las ventajas de un vehículo eléctrico en ciudad y la autonomía de los gasolina para carretera. Las diferencias de consumo de energía y emisiones son considerables para ambos casos. Todo ello supone un ahorro en coste económico. En el circuito de NREL a Vail en el que la exigencia de energía es alta, el coste por km de nuestro Volt es de 5 cts/km frente a los 8 cts/km del gasolina.

Por último hemos comparado nuestro Volt con frenada regenerativa con nuestro Volt pero sin frenada regenerativa. En el circuito de carretera de NREL a Vail donde las diferencias se acentúan, se ha obtenido un ahorro de energía de hasta el 13 % disponiendo del sistema.

Mi valoración personal acerca del estudio realizado en este PFC es que los vehículos eléctricos de rango extendido están preparados para sustituir a los vehículos de gasolina convencionales a corto plazo. Aunque su coste de adquisición es más alto que los vehículos de gasolina con las mismas prestaciones, este tipo de vehículos solucionan el problema de aquellos usuarios que emplean un vehículo eléctrico para ciudad y uno convencional para recorridos largos, ya que un eléctrico de rango extendido tiene las ventajas de los dos. Además, siendo enchufable se logra también la capacidad de ser totalmente independiente de los combustibles fósiles, convirtiéndose en un vehículo ideal para recorridos urbanos diarios.

Finalizo mi valoración dando algunas ideas de futuros proyectos o trabajos.

La primera propuesta es modificar el simulador del vehículo de tal forma que se conecte eléctricamente el generador con el motor eléctrico. Esto permite que el sistema ENG - GEN pueda suministrar potencia eléctrica directamente al motor sin pasar por la batería, de tal forma que el motor eléctrico coja la energía

almacenada en la batería y producida por el sistema ENG - GEN. Con esto conseguiríamos aprovechar al máximo la capacidad del motor eléctrico sin saturar la batería, lo que mejoraría las prestaciones del vehículo en las aceleraciones ganando 1,4 segundos en el test de 0 a 100 km/h. Eso sí, a costa de gastar combustible, aunque siempre se puede dejar como opcional para el usuario, incorporando un nuevo modo de "conducción deportiva".

Otra idea que propongo es realizar una estimación de la energía que va a necesitar el circuito antes de realizarlo. Podríamos suponer que el usuario introduce su recorrido a través de un GPS, conociéndose a la perfección el circuito. Con esto se podría flexibilizar el límite de estado de carga de la batería para el cual nuestro vehículo cambia a los modos de recarga, establecido en 80 % de manera que éste límite no fuese fijo, sino variable. Con esto nos podríamos ahorrar unas cuantas recargas o todas, en el supuesto de que esa evaluación inicial nos indicase que la batería tiene energía suficiente para realizar el circuito sin agotarse.

6. Bibliografía

Donde se incluye un listado de todas las fuentes bibliográficas consultadas

6.1 Libros

- [1] Nada, M. y Sauret, P.: El medio ambiente y el automóvil. RACC, 2009
- [2] Barceló, J.: Simulación de sistemas. Isdefe. 1996

6.2 Artículos científicos

- [3] Liu, J. et al "Modeling, Configuration and control optimization of power split hybrid vehicles". SAE Paper, 2007
- [4] Falières et al., "*A Contradictory Analysis of GM Voltec powertrain*", European Electric Vehicle Conference (EEVC), 2011
- [5] U. D. Grebe and L. T. Nitz, "VOLTEC – The propulsion system for Chevrolet Volt and Opel Ampera", ATZ autotechnology, 02/2011
- [6] R. Parrish et al., "*Voltec Battery Design and Manufacturing*", SAE Paper 2011-01-1360, 2011.
- [7] M. A. Miller, A. G. Holmes, B. M. Conlon and P. J. Savagian, "*The GM Voltec 4ET50 Multi-Mode Electric Transaxle*", SAE Paper 2011-01-0887, 2011
- [8] A. Sciarretta, L. Guzzella, et al., "On the power split control of parallel hybrid vehicles: from global optimization towards real-time control", *Automatisierungstechnik*, 2003.
- [9] Liu. J, et al., "Modeling and control of a power-split hybrid vehicle", SAE Paper, 2008.
- [10] Liu. J, Zoran. F, et al., "Integrated, Feed-Forward Hybrid Electric Vehicle Simulation in SIMULINK and its Use for Power Management Studies", SAE Paper 2001-01-1334
- [11] André, M. "Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles", Report INRETS-LTE 0411. June 2004

- [12] Markel, T. Brooker, A. "ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling", Journal of Power Sources 110 (2002)

6.3 Manuales

- [13] Simulación de sistemas de control continuos con MATLAB y Simulink. Universidad de Gijón. 2006
- [14] Simulación de sistemas con Simulink. 2006
- [15] Guía práctica para el cálculo de emisiones de efecto invernadero. Versión 2011

6.4 Páginas web

- [16] www.mathworks.es/es/help/simulink
- [17] europa.eu/legislation_summaries/internal_market/
- [18] www.chevrolet.es
- [19] servicios.elpais.com/gasolineras/
- [20] www.idae.es

6.5 Proyectos fin de carrera

- [21] Híjar Frdz, G. Estudio energético de un vehículo híbrido con pila de combustible. Escuela técnica superior de ingeniería industrial de Barcelona.
- [22] Arévalo, J. Montaje y programación bajo MATLAB de una mesa de ensayos de vibraciones. Escuela de Ingeniería Superior de Almería.

6.6 Otros

- [23] TNO report, *Review and Analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO₂-emissions from passenger cars*, 2006
- [24] International Energy Agency (IEA) report, *CO₂ emissions from fuel combustion: highlights*, 2011

7. Anexos

7.1 ANEXO I: Características técnicas de las máquinas

7.1.1 Motor eléctrico

7.1.1.1 Mapa de eficiencias del motor eléctrico

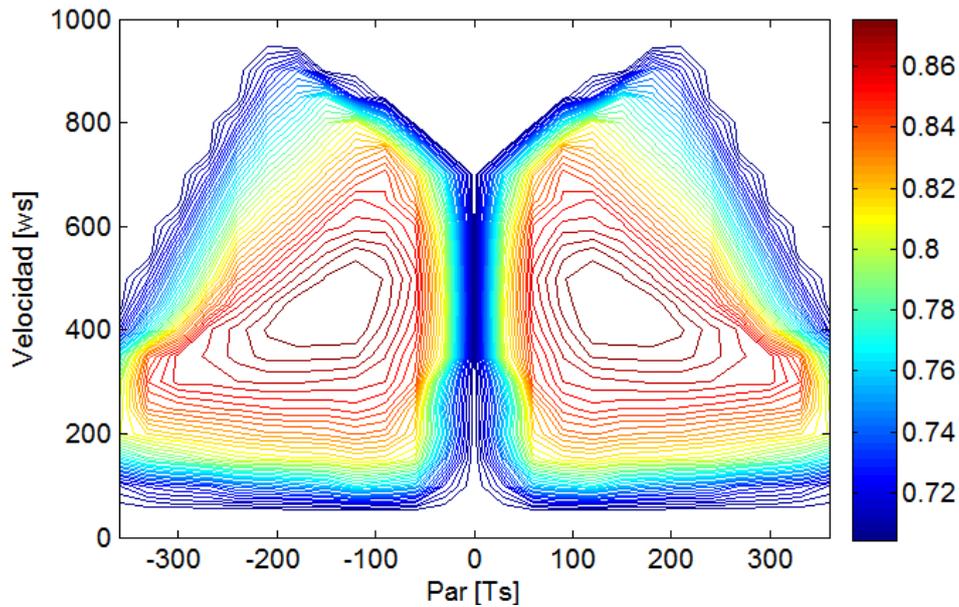


Figura A1. Mapa de eficiencias del motor eléctrico

7.1.1.2 Mapa de potencias del motor eléctrico

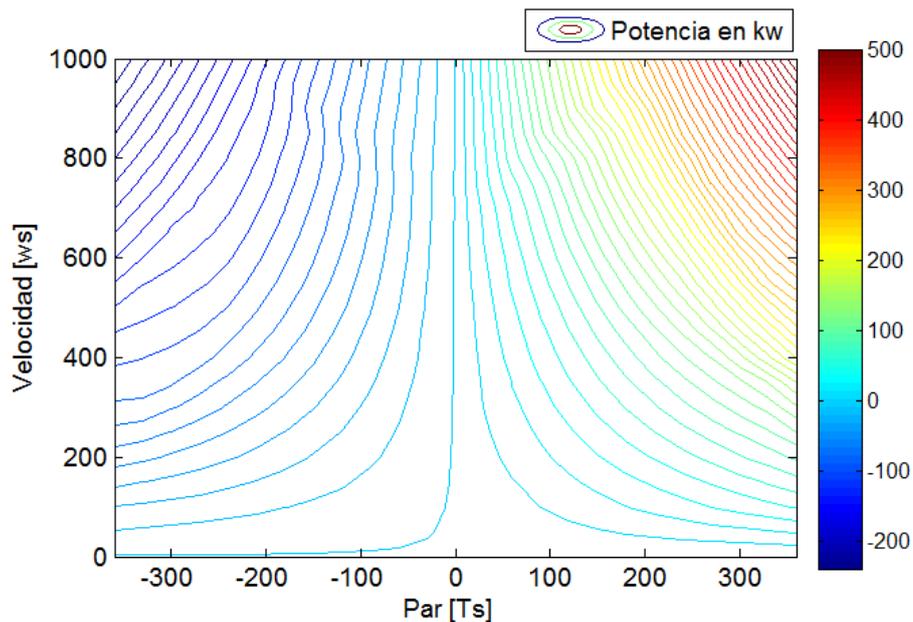


Figura A2. Mapa de potencias del motor eléctrico

7.1.1.3 Mapa de pares limitados del motor eléctrico

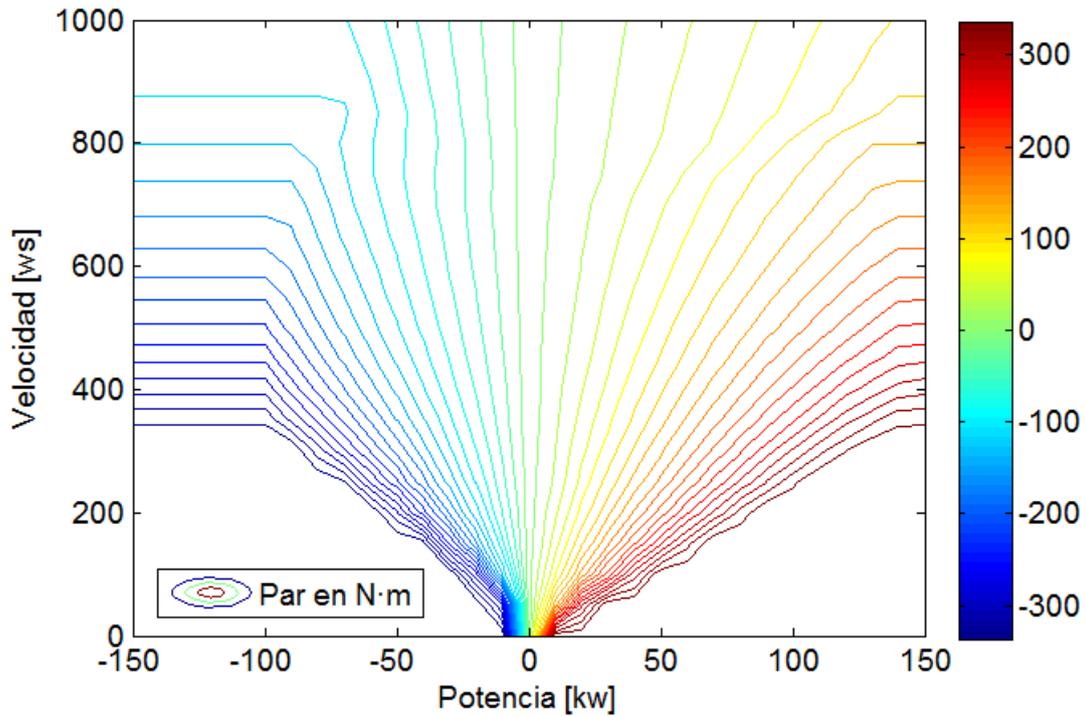


Figura A3. Mapa de pares limitados

7.1.1.4 Pares máximo y mínimo del motor eléctrico

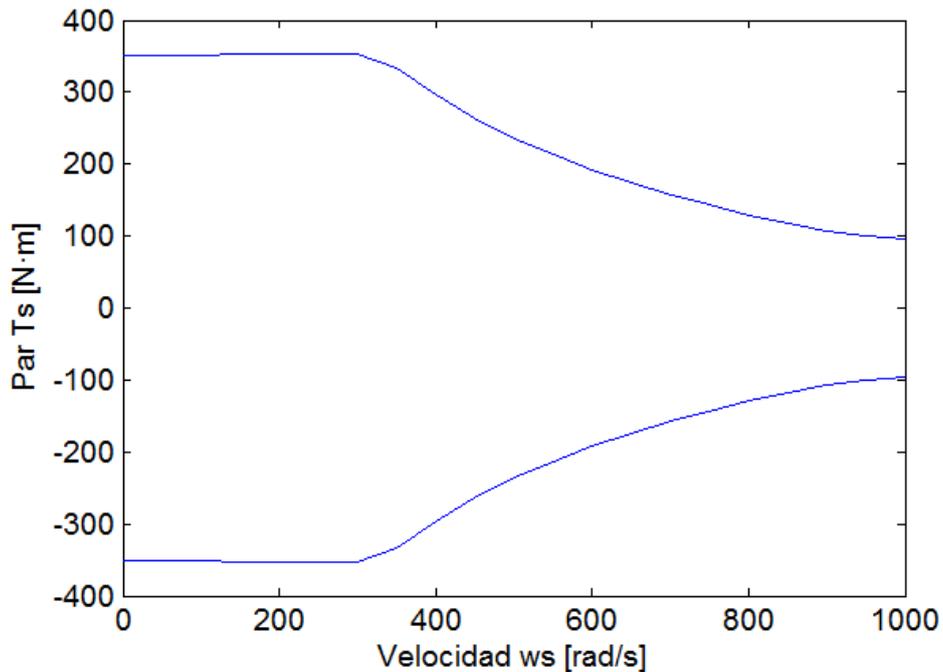


Figura A4. Curvas de par máximo y mínimo en función de la velocidad

7.1.2 Generador eléctrico

7.1.2.1 Mapa de eficiencias del generador eléctrico

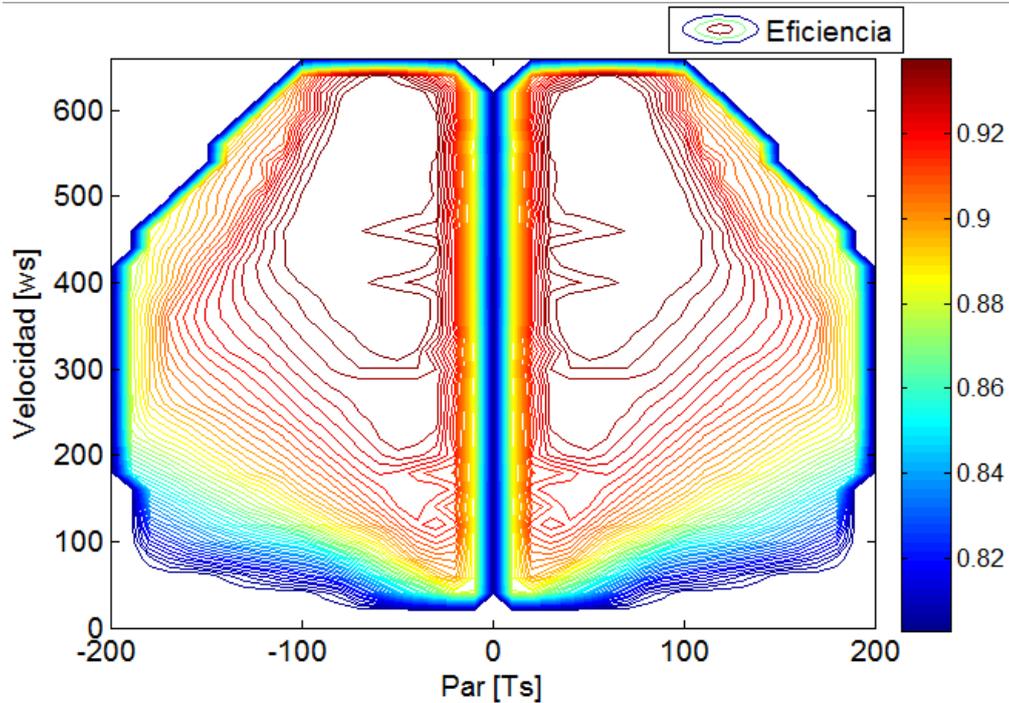


Figura A5. Mapa de eficiencias del generador eléctrico

7.1.2.2 Mapa de potencias del generador eléctrico

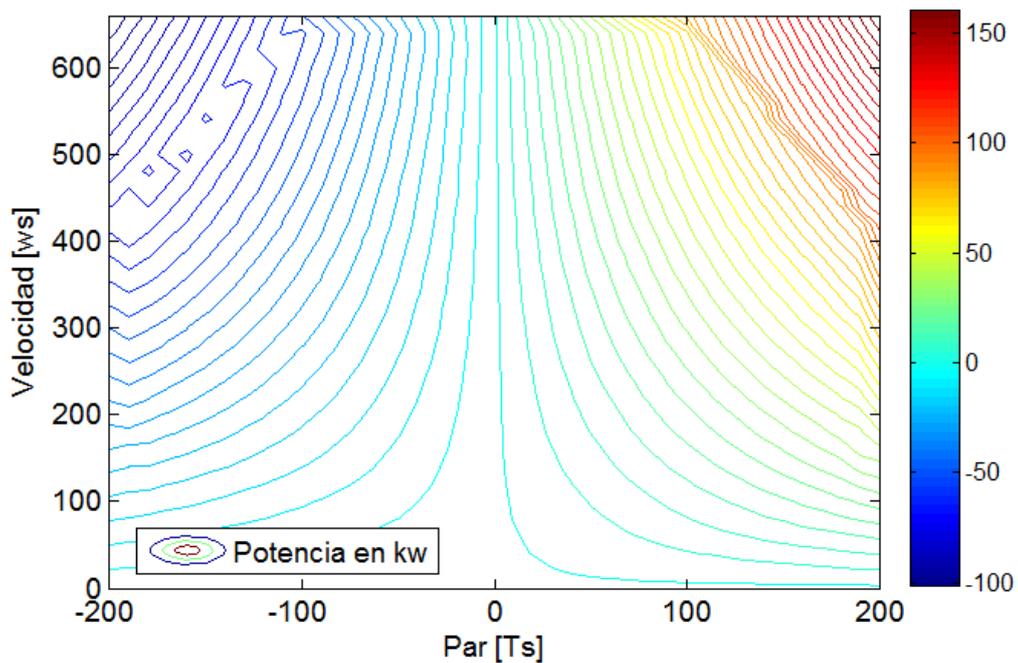


Figura A6. Mapa de potencias del generador eléctrico

7.1.2.3 Pares máximo y mínimo del generador eléctrico

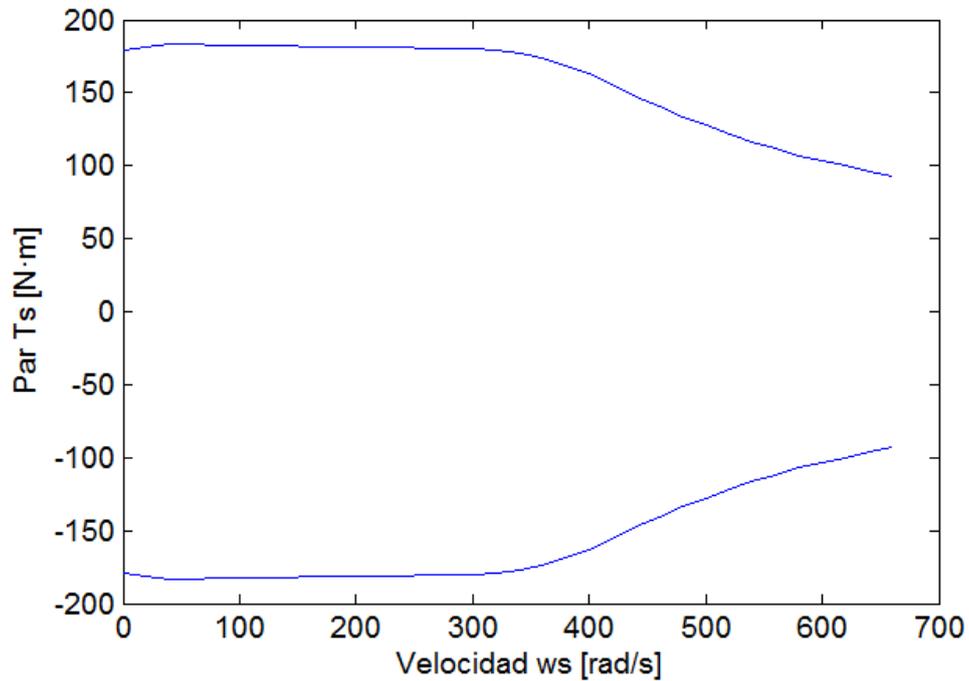


Figura A7. Curvas de par máximo y mínimo en función de la velocidad

7.1.3 Motor térmico

7.1.3.1 Mapa de consumos del motor térmico

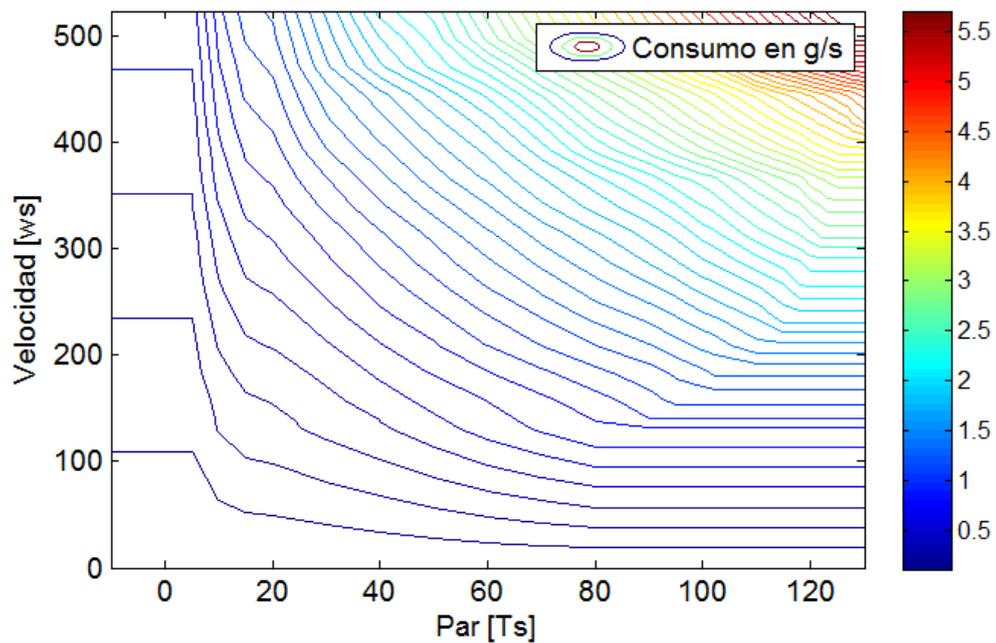


Figura A8. Mapa de consumos del motor de gasolina

7.1.3.2 Par máximo del motor térmico

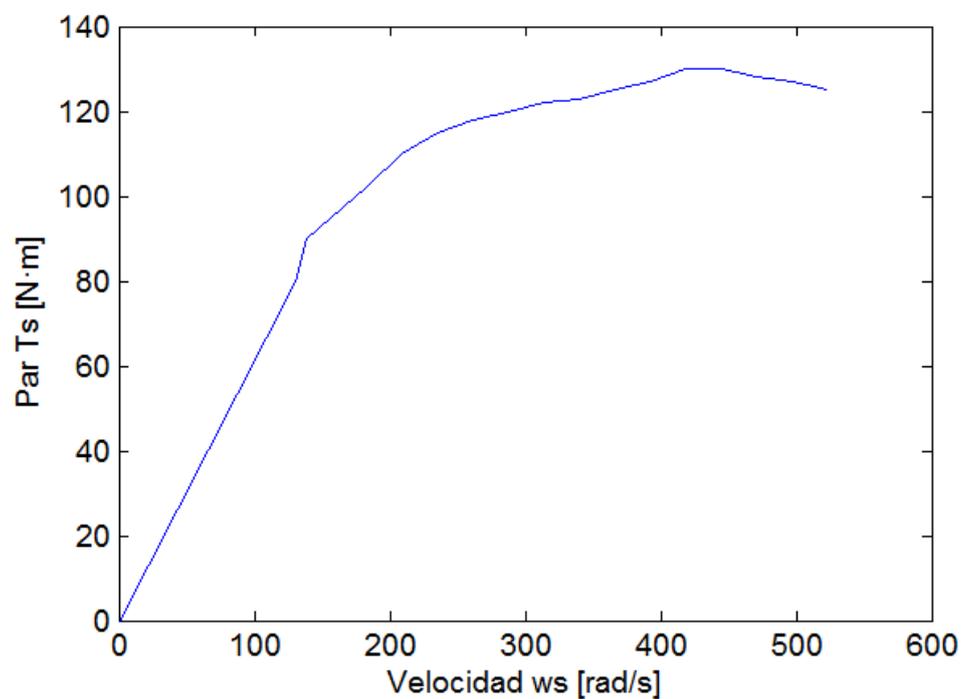


Figura A9. Par máximo en función de la velocidad del motor de gasolina

7.2 ANEXO II: Códigos fuente en MATLAB

7.2.1 Estrategia de control Chevrolet Volt

```
function [a] = modos(u)
% IMPORTANTE: flag = 0; save fla.mat flag;
c1 = 1;
c2 = 0;
c3 = 0;
%flag = 0;
on = 0;
Teng = 0;
wgen = 0;
ws = 0;
mode = 0;
p = 83/37;
load fla.mat

soc = u(1);
wr = u(2);
wc = u(3);
Tc = u(4);

if soc<0.80 % MODO 3 3* 4 se detecta
    if Tc<0 %MODO 3*
        c1 = 1;
        c2 = 0;
        c3 = 1;
        flag = 1;
        on = 1;
        wgen = 104.7;
        Teng = 0;
        ws = wc*(p+1);
        mode = 35;
    else
        if wr>100 %MODO 4
            c1 = 0;
            c2 = 1;
            c3 = 1;
            flag = 1;
            on = 1;
            Teng = 95;
            wgen = wr;
            ws = wc*(p+1)-wr*p;
            mode = 40;
        else %MODO 3
            c1 = 1;
            c2 = 0;
            c3 = 1;
            flag = 1;
            on = 1;
```

```

        wgen = 350;
        Teng = 95;
        ws = wc*(p+1);
        mode = 30;
    end
end
else
    if flag == 1
        if soc<0.85 % MODO 3 3* 4 continua la carga
            if Tc<0
                c1 = 1;
                c2 = 0;
                c3 = 1;
                flag = 1;
                on = 1;
                wgen = 104.7;
                Teng = 0;
                ws = wc*(p+1);
                mode = 35;
            else
                if wr>100 %MODO 4
                    c1 = 0;
                    c2 = 1;
                    c3 = 1;
                    flag = 1;
                    on = 1;
                    Teng = 95;
                    wgen = wr;
                    mode = 40;
                    ws = wc*(p+1)-wr*p;
                else %MODO 3
                    c1 = 1;
                    c2 = 0;
                    c3 = 1;
                    wgen = 350;
                    Teng = 95;
                    on = 1;
                    flag = 1;
                    ws = wc*(p+1);
                    mode = 30;
                end
            end
        end
    else % MODOS 1 2 Carga completada
        if wr>0 % MODO 2
            c1 = 0;
            c2 = 1;
            c3 = 0;
            flag = 0;
            on = 0;
            Teng = 0;
            wgen = wr;
            mode = 20;
            ws = wc*(p+1)-wr*p;
        else % MODO 1

```

```

        c1 = 1;
        c2 = 0;
        c3 = 0;
        flag = 0;
        on = 0;
        Teng = 0;
        wgen = 0;
        mode = 10;
        ws = wc*(p+1);
    end % FIN MODOS 1 2
end % OVER 85%
else
    % MODOS 1 2 Descargandose
    if wr>0 % MODO 2
        c1 = 0;
        c2 = 1;
        c3 = 0;
        flag = 0;
        on = 0;
        Teng = 0;
        wgen = wr;
        mode = 20;
        ws = wc*(p+1)-wr*p;
    else % MODO 1
        c1 = 1;
        c2 = 0;
        c3 = 0;
        flag = 0;
        on = 0;
        Teng = 0;
        wgen = 0;
        mode = 10;
        ws = wc*(p+1);
    end % FIN MODOS 1 2
end % FLAG
end
a = [c1,c2,c3,on,Teng,wgen,mode,ws];
save fla.mat flag;
```

7.3 ANEXO III: Cálculo de costes económicos y de emisiones

7.3.1 Cálculo de costes

7.3.1.1 Chevrolet Volt

- a) Ciclo de conducción NEDC

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,8742) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,177 \text{ €}$$

- b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,8344) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,270 \text{ €}$$

$$Coste_{gas} = 1,003 [kg] \cdot \frac{1}{0,750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1,301 \left[\frac{\text{€}}{l} \right] = 1,740 \text{ €}$$

$$Coste_{total} = 0,270 + 1,740 = 2,010 \text{ €}$$

- c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,8644) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,200 \text{ €}$$

$$Coste_{gas} = 4,225 [kg] \cdot \frac{1}{0,750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1,301 \left[\frac{\text{€}}{l} \right] = 7,329 \text{ €}$$

$$Coste_{total} = 0,200 + 7,329 = 7,529 \text{ €}$$

7.3.1.2 Híbrido en serie

- a) Ciclo de conducción NEDC

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,8599) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,210 \text{ €}$$

- b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,7805) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,396 \text{ €}$$

$$Coste_{gas} = 1,234 [kg] \cdot \frac{1}{0,750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1,301 \left[\frac{\text{€}}{l} \right] = 2,141 \text{ €}$$

$$Coste_{total} = 0,396 + 2,141 = 2,537 \text{ €}$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,8583) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,214 \text{ €}$$

$$Coste_{gas} = 5,102 [kg] \cdot \frac{1}{0,750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1,301 \left[\frac{\text{€}}{l} \right] = 8,850 \text{ €}$$

$$Coste_{total} = 0,214 + 8,850 = 9,064 \text{ €}$$

7.3.1.3 Eléctrico (EV)

a) Ciclo de conducción NEDC

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,8599) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,210 \text{ €}$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,4816) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 1,094 \text{ €}$$

7.3.1.4 Volt sin frenada regenerativa

a) Ciclo de conducción NEDC

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,8512) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,231 \text{ €}$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,8435) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,249 \text{ €}$$

$$Coste_{gas} = 1,112 [kg] \cdot \frac{1}{0,750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1,301 \left[\frac{\text{€}}{l} \right] = 1,929 \text{ €}$$

$$Coste_{total} = 0,396 + 2,141 = 2,178 \text{ €}$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$Coste_{elec} = (0,95 - 0,8149) \cdot 16 [kwh] \cdot 0,146 \left[\frac{\text{€}}{kwh} \right] = 0,316 \text{ €}$$

$$Coste_{gas} = 4,809 [kg] \cdot \frac{1}{0,750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1,301 \left[\frac{\text{€}}{l} \right] = 8,342 \text{ €}$$

$$Coste_{total} = 0,316 + 8,342 = 8,658 \text{ €}$$

7.3.1.5 Vehículo de gasolina

7.3.1.5.1 Vehículo de gasolina adaptado

a) Ciclo de conducción NEDC

$$Coste_{gas} = 0,7 [kg] \cdot \frac{1}{0.750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1.301 \left[\frac{€}{l} \right] = 1,214 €$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$Coste_{gas} = 2,306 [kg] \cdot \frac{1}{0.750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1.301 \left[\frac{€}{l} \right] = 4,00 €$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$Coste_{gas} = 6,896 [kg] \cdot \frac{1}{0.750} \left[\frac{l}{kg} \right] \cdot 1.301 \left[\frac{€}{l} \right] = 12,00 €$$

7.3.1.5.2 Chevrolet Cruze

a) Ciclo de conducción NEDC

$$litros_{gas} = 0,075 [l/km] \cdot 11 [km] = 0,825 l$$

$$Coste_{gas} = 0,825 [l] \cdot 1.301 \left[\frac{€}{l} \right] = 1,07 €$$

7.3.2 Cálculo de emisiones

7.3.2.1 Emisiones en España

7.3.2.1.1 Chevrolet Volt

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8742) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 323,8 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 323,8 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 29,43 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8344) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 493,8 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,003 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3141 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,003 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 535 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 4170 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 141 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8644) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 365,6 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,225 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 13231,5 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,225 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 2253,3 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 15850 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 113,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.1.2 Híbrido en serie

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 384,8 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 384,8 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 35 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,7805) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 724 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,234 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 3865 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,234 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 658 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 5247 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 177,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8583) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 392 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (5,102 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 15978 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (5,012 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2721 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 19091 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 136,8 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.1.3 Eléctrico puro

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 384,8 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 384,8 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 35 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,4816) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 2000 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 2000 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 67,72 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.1.4 Volt sin frenada regenerativa

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8512) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 422 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 422 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 38,3 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8435) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 455 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,112 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3482 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,112 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 593 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 4530 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 153,3 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8149) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 74,16 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 577 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,809 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 15060 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,809 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2568 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 18202 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 130,4 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.1.5 Vehículo de gasolina

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{gas}: (0,7 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2192 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (0,7 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 373 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 2565 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 233 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{gas}: (2,306 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 7222 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (2,306 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 1230 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 8452 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 286 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{gas}: (6,896 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 21596 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (6,896 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3678 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 25273 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 181 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.2 Emisiones en Europa

7.3.2.2.1 Chevrolet Volt

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8742) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 413,46 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 413,46 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 37,58 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8344) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 630,5 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,003 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3141 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,003 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 535 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 4306 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 145,7 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8644) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 467 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,225 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 13231,5 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,225 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2253,3 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 15952 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 114,3 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.2.2 Híbrido en serie

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 491,4 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 491,4 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 44,7 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0.95 - 0,7805) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 924,6 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,234 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3865 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,234 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 658 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 5447 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 184,35 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8583) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 500 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (5,102 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 15978 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (5,102 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2721 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 19199 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 137,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.2.3 Eléctrico puro

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 491,47 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 491,47 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 44,7 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0.95 - 04816) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 2555 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 2555 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 86 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.2.4 Volt sin frenada regenerativa

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8512) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 539 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 539 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 49 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0.95 - 08435) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 581 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,112 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3482 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,112 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 593 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 4656 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 157,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8149) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 94,7 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 737 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,809 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 15060 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,809 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2568 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 18365 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 131,6 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.3 Emisiones en Estados Unidos

7.3.2.3.1 Chevrolet Volt

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8742) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 641,7 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 641,7 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 58,3 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8344) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 982,14 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,003 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3141 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,003 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 535 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 4658 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 157,6 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8644) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 727,25 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,225 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 13231,5 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,225 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2253,3 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 16212 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 116,2 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.3.2 Híbrido en serie

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 765,5 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 765,5 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 69,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,7805) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1440 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,234 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3865 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,234 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 658 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 5963 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 201,8 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8583) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 799 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (5,102 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 15978 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (5,012 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2721 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 19478 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 139,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.3.3 Eléctrico puro

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 765,5 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 765,5 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 69,6 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,4816) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 3979,5 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 3979,5 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 134,67 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.3.4 Volt sin frenada regenerativa

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8512) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 839,4 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 839,4 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 76,31 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8435) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 904,8 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,112 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3482 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,112 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 593 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 4980 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 168,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8149) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 147,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1147 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,809 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 15060 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,809 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2568 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 18776 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 134,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.4 Emisiones en China

7.3.2.4.1 Chevrolet Volt

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8742) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 907,27 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 907,27 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 82,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8344) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1383,6 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,003 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3141 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,003 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 535 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 5059,6 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 171,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8644) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1024,5 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,225 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 13231,5 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,225 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2253,3 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 16509 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 118,3 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.4.2 Híbrido en serie

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1078,4 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 1078,4 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 98 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,7805) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 2028,8 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,234 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3865 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,234 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 658 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 6551,8 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 221,7 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8583) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1097,6 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (5,102 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]}) \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 15978 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (5,012 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]}) \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 2721 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 19796,5 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 141,8 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.4.3 Eléctrico puro

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1078,4 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 1078,4 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 98 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,4816) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 5606,4 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 5606,4 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 189,73 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.4.4 Volt sin frenada regenerativa

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8512) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1182,5 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 1182,5 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 107,5 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0.95 - 0.8435) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1274,7 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,112 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3482 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,112 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 593 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 5349,7 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 181 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8149) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 207,8 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1617 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,809 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 15060 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,809 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2568 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 19245 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 137,9 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.5 Emisiones media mundial

7.3.2.5.1 Chevrolet Volt

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8742) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 611,3 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 611,3 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 55,6 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0.95 - 0,8344) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 932,2 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,003 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3141 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,003 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 535 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 4608 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 156 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8644) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 690 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,225 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 13231,5 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,225 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 2253,3 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 16175 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 116 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.5.2 Híbrido en serie

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 726,5 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 726,5 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 66 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,7805) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1366,8 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,234 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 3865 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,234 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 658 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 5890 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 199 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8583) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 739 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (5,102 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 15978 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (5,012 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 2721 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 19438,4 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 139,2 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.5.3 Eléctrico puro

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8599) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 726,5 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 726,5 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 66 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,4816) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 3777 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 3777 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 127,8 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.2.5.4 Volt sin frenada regenerativa

a) Ciclo de conducción NEDC

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8512) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 796,7 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 796,7 [gCO_2] \cdot \frac{1}{11 [km]} = 72,4 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8435) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 868,5 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (1,112 [kg] \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]}) = 3482 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (1,112 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 593 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 4943 [gCO_2] \cdot \frac{1}{29,55 [km]} = 167,3 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$E_{elec}: (0,95 - 0,8149) \cdot 57,6 [MJ] \cdot 140 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 1089,4 [gCO_2]$$

$$E_{gas}: (4,809 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 73,4 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 15060 [gCO_2]$$

$$E_{PDgas}: (4,809 [kg]) \cdot \frac{1 [l]}{0,75 [kg]} \cdot 32 \frac{MJ}{l} \cdot 12,5 \frac{[gCO_2]}{[MJ]} = 2568 [gCO_2]$$

$$E_{total}: 18717 [gCO_2] \cdot \frac{1}{139,56 [km]} = 134,1 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]$$

7.3.3 Cálculo de autonomías

7.3.3.1 Chevrolet Volt

a) Ciclo de conducción NEDC

$$Consumo_{gas}: \frac{1,69 + 1,5}{2} = 1,59 \left[\frac{MJ}{km} \right]$$

$$A_{bat}: \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,38 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 106 [km]$$

$$A_{gas}: \frac{1224 [MJ_{gas}]}{1,59 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 770 [km]$$

$$A_{total}: 125 + 770 [km] = 876 [km]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$A_{bat}: \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,20 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 202 [km]$$

$$A_{gas}: \frac{1224 [MJ_{gas}]}{1,69 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 724 [km]$$

$$A_{total}: 125 + 770 [km] = 926 [km]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$A_{bat}: \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,028 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 1439 [km]$$

$$A_{gas}: \frac{1224 [MJ_{gas}]}{1,5 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 816 [km]$$

$$A_{total}: 1439 + 816 [km] = 2255 [km]$$

7.3.3.2 Híbrido en serie

a) Ciclo de conducción NEDC

$$Consumo_{gas}: \frac{2,075 + 1,816}{2} = 1,631 \left[\frac{MJ}{km} \right]$$

$$A_{bat}: \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,452 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 89 [km]$$

$$A_{gas}: \frac{1224 [MJ_{gas}]}{1,631 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 750 [km]$$

$$A_{total}: 89 + 750 [km] = 839 [km]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$A_{bat}: \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,302 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 133 [km]$$

$$A_{gas}: \frac{1224 [MJ_{gas}]}{2,075 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 590 [km]$$

$$A_{total}: 133 + 590 [km] = 723 [km]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$A_{bat} : \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,026 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 1550 [km]$$

$$A_{gas} : \frac{1224 [MJ_{gas}]}{2,540 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 482 [km]$$

$$A_{total} : 1550 + 482 [km] = 2032 [km]$$

7.3.3.3 Eléctrico puro

a) Ciclo de conducción NEDC

$$A_{bat} : \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,452 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 89 [km]$$

$$A_{total} : 89 [km]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$A_{bat} : \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,302 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 133 [km]$$

$$A_{total} : 133 [km]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$A_{bat} : \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,737 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 54,6 [km]$$

$$A_{total} : 54,6 [km]$$

7.3.3.4 Volt sin frenada regenerativa

a) Ciclo de conducción NEDC

$$Consumo_{gas} : \frac{1,872 + 1,710}{2} = 1,791 \left[\frac{MJ}{km} \right]$$

$$A_{bat} : \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,497 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 81 [km]$$

$$A_{gas} : \frac{1224 [MJ_{gas}]}{1,791 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 683 [km]$$

$$A_{total} : 81 + 683 [km] = 764 [km]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$A_{bat} : \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,185 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 218 [km]$$

$$A_{gas} : \frac{1224 [MJ_{gas}]}{1,872 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 654 [km]$$

$$A_{total} : 218 + 590 [km] = 872 [km]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$A_{bat} : \frac{40,3 [MJ_{elec}]}{0,043 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 937 [km]$$

$$A_{gas} : \frac{1224 [MJ_{gas}]}{1,710 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 716 [km]$$

$$A_{total} : 937 + 716 [km] = 1653 [km]$$

7.3.3.5 Vehículo de gasolina

a) Ciclo de conducción NEDC

$$A_{gas} : \frac{1224 [MJ_{gas}]}{3,213 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 381 [km]$$

$$A_{total} : 381 [km]$$

b) Ciclo de conducción Artemis highway

$$A_{gas} : \frac{1224 [MJ_{gas}]}{3,921 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 312 [km]$$

$$A_{total} : 312 [km]$$

c) Ciclo de conducción de NREL a Vail

$$A_{gas}: \frac{1224 [MJ_{gas}]}{2,458 \left[\frac{MJ}{km} \right]} = 498 [km]$$

$$A_{total}: 498 [km]$$